Н. Я. Бобир
А. Н. Лобанов
Г. Д. Федорук

ФОТОГРАММЕТРИЯ

Н. Я. Бобир,
А. Н. Лобанов,
Г. Д. Федорук

528.7.

ФОТОГРАММЕТРИЯ

Под общей редакцией
профессора А. Н. ЛОБАНОВА

Допущено Министерством
высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности «Аэрофотогеодезия»

1976

МОСКВА «НЕДРА»
1974

УДК 528.7 (21) + 528.7 (203) (075.8)

Бобир Н. Я., Лобанов А. Н., Федорук Г. Д. Фотограмметрия. М., «Недра», 1974. 472 с.

В книге излагаются теория фотограмметрии и методы обработки снимков с целью создания топографических карт или фотодокументов и решения различных нетопографических задач. Рассмотрены теория и устройство основных фотограмметрических и стереофотограмметрических приборов и перспективы развития фотограмметрии.

Предназначена для студентов аэрофотогеодезической специальности институтов инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии.

Табл. 14, пл. 294, список лит. — 66 названий.

Б $\frac{20702 - 503}{043(01) - 74}$ 96 — 75

© Издательство «Недра», 1974

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник создан на кафедре фотограмметрии Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии по программе, утвержденной Учебно-методическим управлением по высшим учебным заведениям МВ и ССО СССР.

Главы 1, 2 (кроме § 5), 3—8, 14, 15, 18, 21, 22, 24, 25 и «Перспективы развития фотограмметрии» написал профессор А. Н. Лобанов, главы 9—13 — профессор Н. Я. Бобир, главу 19 — А. Н. Лобанов и доцент Г. Д. Федорук, главы 16, 17, 20, 23, 26 — Г. Д. Федорук. § 5 главы 2 написал доктор технических наук И. Ф. Куштин.

Авторы выражают глубокую признательность заслуженным деятелям науки и техники РСФСР Ф. В. Дробышеву и М. Д. Коншину, доктору технических наук Ф. Ф. Лысенко, доцентам М. И. Бурову и Р. П. Овсянникову, а также преподавателям кафедр фотограмметрии ВИА имени В. В. Куйбышева и МИИГАиК за ценные пожелания и замечания, данные при обсуждении рукописи учебника.

Заведующий кафедрой фотограмметрии МИИГАиК заслуженный деятель науки и техники РСФСР профессор А. Н. Лобанов

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ФОТОГРАММЕТРИЯ И ЕЕ СВЯЗИ С ДРУГИМИ ДИСЦИПЛИНАМИ

Фотограмметрия* определяет формы, размеры и положение объектов по их фотографическим изображениям.

Фотограмметрия применяется в различных областях науки и техники: в геодезии и астрономии, военно-инженерном деле и артиллерии, архитектуре и строительстве, географии и океанологии, судебной медицине и криминалистике, атомных испытаниях и космических исследованиях и т. д.

Широкое использование фотограмметрии в народном хозяйстве и обороне страны обусловливают следующие ее достоинства:

1. Высокая точность измерений, так как снимки объектов получаются прецизионными фотокамерами, а обработка их выполняется строгими методами на точных приборах и электронных цифровых вычислительных машинах.

2. Большая производительность, достигаемая благодаря тому, что измеряются не сами объекты, а их изображения.

3. Полная объективность и достоверность результатов измерений, так как изображения объектов получаются фотографическим способом.

4. Возможность получения в короткий срок информации о состоянии всего объекта и отдельных его частей. Например, снимки всей поверхности земного шара можно получить с искусственного спутника Земли за несколько суток.

5. Возможность изучения неподвижных и быстро или медленно движущихся объектов, а также скоротечных или медленно проходящих процессов, например летящего снаряда, вулканического извержения, деформации колеса автомобиля в момент движения, интенсивности движения городского транспорта, эррозии почвы, движения ледников, осадки и деформации зданий и других сооружений и т. д.

6. Исследование объектов бесконтактным (дистанционным) способом, что имеет особое значение в условиях, когда объект недоступен или когда пребывание в зоне объекта не безопасно для жизни человека, например в случае атомных исследований.

Форму, размеры и положение объекта можно определить, если сфотографировать его с двух точек (рис. 1). Пусть P_1 и P_2 — пара снимков объекта O, полученная с точек S_1 и S_2; a_1, a_2 и b_1, b_2 — изображения точек A и B объекта. Вообразим, что объект после фотографирования удален. По снимкам можно получить модель объекта. Для этого достаточно придать снимкам то положение, которое они занимали относительно друг друга во время съемки, и

---

* Происходит от греческих слов: photos — свет, gramma — запись и metreo — измеряю.

восстановить по ним связки лучей, существовавшие в момент фотографирования. Тогда каждая пара соответственных лучей, например a_1S_1 и a_2S_2 или b_1S_1 и b_2S_2, будет пересекаться, в результате чего образуется м о д е л ь, подобная объекту. Изменяя расстояние S_1S_2 между вершинами связок, можно получить модель в любом масштабе. Модель используют для измерения объекта. В частности, после ориентирования модели относительно планшета E составляют карту.

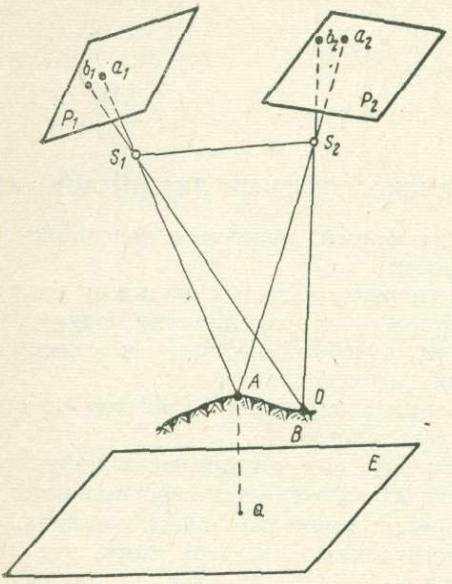


Рис. 1

Метод измерения объектов, основанный на использовании свойств пары снимков, называется с т е р е о ф о т о г р а м м е т р и ч е с к и м *.

В частном случае, когда объект плоский, задачи фотограмметрии ре-

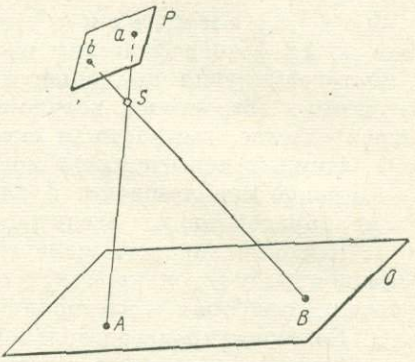


Рис. 2

шаются по одиночным снимкам. Так, на рис. 2 модель объекта получена по снимку P в результате пересечения восстановленной связки лучей с плоскостью O. В этом случае масштаб модели зависит от удаления плоскости O от вершины связки S.

Метод измерения объектов, основанный на свойствах одиночного снимка, называется ф о т о г р а м м е т р и ч е с к и м.

Фотограмметрия тесно связана с точным приборостроением, авиацией, космонавтикой, физикой, химией, электронной техникой, математикой, геодезией и картографией.

Точное приборостроение обеспечивает фотограмметрию высококачественными фотоаппаратами и приборами для измерения снимков. Самолеты, как носители фотоаппаратов, позволяют быстро фотографировать земную поверхность. Более широкие возможности для фотограмметрического исследования Земли, Луны и других небесных тел открыли космические корабли.

Достижения физики и особенно оптики способствуют совершенствованию фотограмметрических приборов и методов. Например, создание сверхширокоугольных объективов позволило заменить фотограмметрический метод съемки

---

* Стерео — от греческого слова stereos — пространственный.

равнинной и холмистой местности стереофотограмметрическим, т. е. получать по снимкам не только контуры, но и высоты.

Химическая промышленность создает черно-белые и цветные фотоматериалы и химикалии.

Электронная техника используется для самолетовождения и управления космическими кораблями, а также для определения элементов внешнего ориентирования снимков в полете и автоматизации процессов фотограмметрической обработки снимков.

Математика применяется в теории фотограмметрии и при решении многих практических задач. Например, для определения координат точек местности по снимкам используются строгие математические методы и современная вычислительная техника.

Геодезия обеспечивает фотограмметрию опорными точками, необходимыми для сгущения по снимкам опорной сети с целью составления топографических карт. Методы картографии используются при составлении по снимкам и оформлении топографических карт.

§ 2. ФОТОТОПОГРАФИЯ. ВИДЫ И МЕТОДЫ ФОТОТОПОГРАФИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Фототопография определяет координаты отдельных точек местности и создает топографические карты по снимкам. Фототопография является составной частью фотограмметрии.

Комплекс процессов, позволяющих создать по снимкам карту местности, называется фототопографической съемкой. В этот комплекс входят: фотографирование местности, полевые геодезические работы и камеральные фотограмметрические работы.

В зависимости от технических средств, применяемых для фотографирования местности, различают три вида фототопографической съемки: наземную фототопографическую, аэрофототопографическую и комбинированную.

Наземная фототопографическая съемка основана на фотографировании местности фототеодолитом с точек земной поверхности. Этот вид съемки часто называют фототеодолитной, или наземной, стереофотограмметрической съемкой.

Аэрофототопографическая съемка предусматривает фотографирование местности аэрофотоаппаратом, установленным на самолете или на каком-либо другом летательном аппарате.

Комбинированная фототопографическая съемка представляет собой сочетание фототеодолитной съемки и аэрофототопографической. При этом местность фотографируется дважды: фототеодолитом с наземных станций и аэрофотоаппаратом с самолета. По наземным снимкам обычно сгущается опорная геодезическая сеть, а по аэроснимкам составляется топографическая карта.

Наземная фототопографическая съемка использовалась для картографирования горных районов. В настоящее время при изучении больших территорий она менее эффективна, чем аэрофототопографическая съемка, и применяется для создания планов небольших участков, когда аэрофотосъемка нерентабельна.

Для аэрофототопографической съемки применяются два метода — комбинированный и стереотопографический.

Комбинированный метод использует свойства одиночного снимка и позволяет получить контурную часть карты, а рельеф зарисовать в поле приемами мензульной съемки.

Этот метод широко применялся для съемки равнинных и холмистых районов. По мере развития стереотопографического метода роль комбинированного метода уменьшалась. В настоящее время он используется для съемки плоскоравнинных районов, когда рельеф местности плохо просматривается стереоскопически и не может быть достаточно точно изображен по снимкам.

Стереотопографический метод использует свойства пары снимков и позволяет снимать в камеральных условиях не только контуры, но и рельеф местности.

Он является основным методом картографирования, так как обеспечивает:

— высокое качество карт при минимальных затратах сил и средств;

— детальное изучение территории по снимкам в лабораторных условиях в любое время и независимо от погоды;

— исследование труднодоступных и вовсе недоступных районов — тундр, пустынь, горных хребтов, территории противника и т. д.;

— возможность механизации и автоматизации всех производственных процессов.

Стереотопографическим методом создаются карты высокогорных, горных, холмистых и равнинных районов. Его применяют и для съемки плоскоравнинных районов, например, в мелиорации.

В стереотопографическом методе различают два способа составления карты по снимкам — универсальный и дифференцированный.

Универсальный способ основан на использовании прибора, позволяющего выполнить все процессы обработки пары снимков: получить модель, ориентировать ее относительно планшета, зарисовать контуры и рельеф.

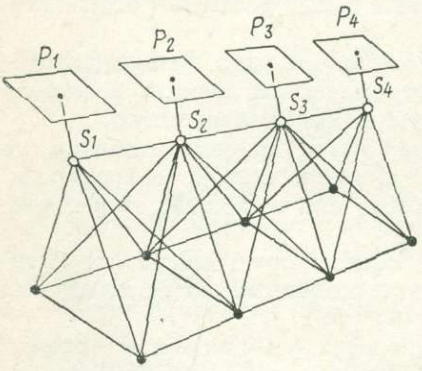


Рис. 3

Дифференцированный способ решает задачу составления карты на двух приборах — стереометре и проекторе (фототрансформаторе). Стереометр служит для изображения на снимках рельефа в горизонталях, а проектор — для переноса контуров и горизонталей со снимков на планшет.

Для ориентирования модели при составлении карты необходимы опорные точки — опознанные на снимках контурные точки, положение которых определено в системе координат, принятой в геодезии. Опорные точки определяются в камеральных условиях методом фототриангуляции, которая позволяет сгущать опорную геодезическую сеть. Фототриангулирование заключается в том, что новые опорные точки определяются по модели, для построения которой использовано несколько или много пар снимков, принадлежащих к одному или нескольким маршрутам (рис. 3). При этом ориентирование такой модели относительно геодезической системы координат выполняется по нескольким опорным точкам, полученным методами геодезии.

Для составления карты необходимо еще опознать объекты местности, изобразившиеся на снимках, и уметь определить их характеристики, т. е. выполнять дешифрирование снимков. Оно может быть полевым, камеральным и комбинированным. Чаще используется комбинированное деши-

фрирование — в поле составляются снимки-эталоны с результатами дешифрирования наиболее характерных для данного района объектов, а затем эти образцы применяются для камерального дешифрирования остальных снимков.

§ 3. КРАТКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ ФОТОГРАММЕТРИИ

Фотограмметрия возникла вскоре после изобретения фотографии и получила наиболее широкое приложение в топографии.

Первая наземная фототопографическая съемка выполнена французским инженером Лосседа в 1860 г. Затем этот вид съемки успешно применили Паганини в Италии, Гартль в Австрии, Девиль в Америке и др.

В 1858 г. во Франции фотограф Надар получил снимки с аэростата.

В начале XX века фирма Цейсса создала измерительные фотокамеры и точные приборы для обработки снимков.

Начало развития фототопографии в России относится к концу XIX века, когда Р. Ю. Тилле, П. И. Шуров, Б. Б. Голицын и др. составили планы по наземным снимкам для трассирования железных дорог и решения других инженерных задач, а А. М. Кованько получил аэроснимки с воздушного шара.

В 1899 г. вышла в свет книга Г. Н. Шебуева и Н. Н. Веселовского «Геометрические основания фотограмметрии».

Большую роль в развитии фотограмметрии сыграл изданный в 1908—909 гг. капитальный трехтомный труд Р. Ю. Тилле «Фототопография в современном развитии».

В 1904—1905 гг. во время русско-японской войны В. Ф. Найденов фотографировал с воздушного шара районы расположения противника под Мукденом и по аэроснимкам составил планы этих районов. В 1907 г. он опубликовал первый учебник «Измерительная фотография и применение ее в воздухоплавании» для слушателей Военно-инженерной академии.

Р. Ю. Тилле разработал многообъективный аэрофотоаппарат, а В. Ф. Найденов — фототрансформатор для преобразования наклонных снимков в горизонтальные.

В годы первой мировой войны аэрофотосъемка применялась главным образом для воздушной разведки противника. Для этого был разработан аэрофотоаппарат В. Ф. Потте. Первое фотографирование с самолета выполнено в 1914 г. при осаде Перемышля. По аэроснимкам составлены схемы к плану города. Военно-инженерное ведомство создало фотограмметрические части.

Однако фотограмметрия в царской России не получила должного признания и распространения вследствие недооценки ее возможностей и отсутствия промышленности точного приборостроения.

Широкие перспективы перед фотограмметрией открыла Великая Октябрьская социалистическая революция, которая по-новому поставила задачу изучения производительных сил страны с целью использования их для строительства социализма. Исключительно большое значение для развития фотограмметрии имел и имеет известный декрет В. И. Ленина, изданный в 1919 г., об организации государственной геодезической службы, перед которой была поставлена задача картографирования территории СССР с целью всемерной помощи развитию производительных сил страны.

При решении этой задачи аэрофотосъемка признана наиболее эффективным методом изучения территории для выявления природных ресурсов. Для широкого использования этого метода необходимо было организовать научные исследования, разработать технологию, подготовить кадры и создать базу для производства фотограмметрических аппаратов и приборов.

В развитии аэрофотограмметрии в Советском Союзе можно отметить три периода.

Первый период (1918—1929 гг.) характеризуется организацией фотограмметрических предприятий и подготовки кадров, а также разработкой комбинированного метода и выполнением первых опытных и производственных работ этим методом.

В 1919 г. Военно-топографическая служба создала фотограмметрические отделения, на базе которых организован первый аэрофототопографический отряд. В том же году открылась Высшая аэрофототопографическая школа Красного военно-воздушного флота (В. Ф. Найденов, П. П. Соколов, К. В. Чибисов, Н. С. Герасимов).

В 1920 г. Н. М. Алексапольский начал чтение курса фотограмметрии в Московском межевом институте, а в 1926 г. в этом же институте, названном Московским геодезическим, открылось аэрофотогеодезическое отделение, преобразованное затем в факультет. Этим было положено начало планомерной подготовке кадров в области фотограмметрии. Несколько позже к подготовке специалистов в этой области приступили и другие вузы — Московский институт землеустройства, Новосибирский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, Львовский политехнический институт и др., а также ряд топографических техникумов.

В 1925 г. общества «Добролет» и «Укрвоздухпуть» создали производственные аэрофотосъемочные подразделения (Н. М. Алексапольский, П. П. Соколов, В. С. Цвет-Колядинский, Д. А. Сольский). В Военно-топографической службе под руководством Н. М. Алексапольского разработан комбинированный метод, позволивший повысить качество и производительность работ по сравнению с мензульной съемкой.

Второй период (1930—1945 гг.) характеризуется использованием комбинированного метода, а также созданием и широким применением дифференцированного способа, позволившего значительно сократить полевые работы по сравнению с мензульной съемкой и комбинированным методом. Аэрофототопографические методы стали основными при картографировании страны в масштабе 1 : 100 000 и отдельных районов ее в масштабах 1 : 50 000 и 1 : 25 000.

В 1930 г. организована лаборатория Ф. В. Дробышева для разработки новых фотограмметрических приборов, а в 1931 г. — Научно-исследовательский институт аэросъемки, в дальнейшем слившийся с Научно-исследовательским институтом геодезии и картографии. В последующие годы исследования в области фотограмметрии выполняются в Центральном научно-исследовательском институте геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК), в высших учебных заведениях (Московский и Новосибирский институты инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии — МИИГАиК и НИИГАиК, Московский институт инженеров землеустройства, Военно-инженерная академия имени В. В. Куйбышева, Львовский политехнический институт и др.), в Лаборатории аэрометодов АН СССР, в Новосибирском институте прикладной геодезии и во многих других организациях.

В начале 1930 г. разработан способ ВТО, который отличается от комбинированного метода тем, что горизонтали проводятся на снимках с помощью стереоскопа по пикетным точкам, набранным в поле или полученным упрощенными приемами сгущения высот в пределах каждой пары. Со снимков контуры и горизонтали переносятся на планшет с помощью пантографа или проектора (Г. Ф. Гапочко, Ф. Я. Герасимов и др.).

Однако объем полевых работ в способе ВТО оставался значительным. С целью сокращения их предложен дифференцированный способ создания карт (Ф. В. Дробышев, М. Д. Коншин, Г. В. Романовский) и различные способы фотограмметрического сгущения геодезического обоснования: ромбическая фототриангуляция (Н. М. Алексапольский, Ф. В. Дробышев, Г. П. Жуков, В. Ф. Дейнеко), пространственная фототриангуляция (А. С. Скиридов), дифференцированный способ пространственной фототриангуляции (Г. П. Жуков), способ прямой линии (Г. В. Романовский), способ неискаженной модели (М. Д. Коншин, Г. В. Романовский). Для практического применения этих способов созданы широкоугольные и сверхширокоугольные объективы (М. М. Русинов), топографические аэрофотоаппараты (С. П. Шокин, Г. Г. Гордон), стереометры (Ф. В. Дробышев), мультиплекс (Н. В. Викторов, М. М. Русинов и др.). Эти способы успешно применены для картографирования больших территорий в ограниченные сроки.

В годы Великой Отечественной войны по аэроснимкам выявлялись укрепления противника, его боевые порядки и вооружение, составлялись и обновлялись топографические карты и планы городов, создавались измерительные фотодокументы.

Третий период развития фотограмметрии связан с послевоенным восстановлением и развитием народного хозяйства. Для решения этой задачи произведено картографирование многих районов страны в крупных масштабах в весьма ограниченные сроки. Этот период характеризуется дальнейшим развитием теории фотограмметрии, использованием последних достижений физики, электроники и вычислительной техники для повышения точности и темпов фотограмметрических работ.

Успешному решению проблем, возникших перед фотограмметрией в послевоенное время, в значительной степени способствовали теоретические исследования члена-корреспондента Академии Наук СССР Н. Г. Келля и проф. Н. А. Урмаева.

Разработана теория стереофотограмметрической обработки снимков с преобразованными связками проектирующих лучей (М. Д. Коншин, Г. В. Романовский, Ф. В. Дробышев, А. Н. Лобанов, Г. П. Жуков, В. Я. Финковский и др.). На базе этой теории созданы оригинальные универсальные стереоприборы, из которых широкое применение получили стереограф и стереопроектор.

В практику аэрофотосъемки внедрены способы фиксации элементов внешнего ориентирования снимков с помощью статоскопа (Ю. С. Доброхотов, К. П. Бычковский), радиовысотомера (М. Д. Коншин, Г. В. Романовский, Н. П. Кожевников, И. Л. Гилль) и радиогеодезических станций (А. И. Грузинов, М. Д. Коншин, Н. Д. Назаров, И. А. Богданов). Созданы гиростабилизированная установка (Н. Ф. Орелкин, С. П. Шокин, М. Д. Коншин), аэрофотоаппарат АФА-41, топографическая аэрофотоустановка и радиогеодезическая система «Рым» (Г. В. Романовский, В. И. Кораблев, А. Л. Старосельский, В. А. Горелик и др.).

Для фототриангуляции применены универсальные стереоприборы (Ф. В. Дробышев, Г. В. Романовский, Н. А. Соколова, М. Н. Ютанов, В. И. Кораблев, П. В. Будылов и др.). В практику работ на этих приборах внедрен способ пространственной фототриангуляции с преобразованными связками проектирующих лучей (М. Д. Коншин, А. Н. Лобанов, Г. П. Жуков, Н. П. Лавров, Г. А. Ошурков).

Разработан и внедрен в производство аналитический способ пространственной фототриангуляции, основанный на применении электронной цифровой

вычислительной машины и позволивший значительно повысить точность фотограмметрического сгущения опорной сети и производительность работ (А. Н. Лобанов, М. Д. Коншин, Г. В. Романовский, И. Д. Каргополов, Ф. Ф. Лысенко, В. Я. Финковский, М. М. Машимов, В. А. Полякова, И. Т. Антипов и др.). В связи с этим созданы высокоточные автоматизированные стереокомпараторы (В. Д. Дервиз, Е. В. Филимонов и др.).

Расширена область применения стереотопографического метода с целью создания карт масштаба 1 : 5000 и крупнее (Н. А. Соколова).

Дальнейшее совершенствование получили аэрофотосъемочная оптика (М. М. Русинов, Д. С. Волосов), разработаны объективные методы оценки качества изображения (О. А. Герасимова), применены цветные фотоматериалы, расширившие возможности дешифрирования аэроснимков (В. Я. Михайлов, Л. М. Гольдман, Н. П. Лаврова и др.).

Положено начало применению электронной техники при составлении топографических карт и фотодокументов по снимкам. Разработаны электронный фототрансформатор (М. П. Бордюков, В. И. Смирнов), дифференциальные фототрансформаторы (Е. И. Калантаров, Г. П. Жуков, Ф. В. Дробышев, П. С. Александров), предложен аналитический фототрансформатор (А. Н. Лобанов, И. Г. Журкин).

Продолжены исследования по автоматизации стереоскопических измерений, начатые А. С. Скиридовым еще в 1924 г. — разрабатывается изогипсограф (Г. Д. Федорук), предложен аналитический фотокартограф (А. Н. Лобанов, И. Г. Журкин).

Новые перспективы открылись перед фотограмметрией в связи с использованием космических кораблей для изучения планет и их спутников. Советские ученые впервые сфотографировали обратную сторону Луны и получили панорамные снимки лунной поверхности. По этим снимкам составлена фотокарта Луны и планы места посадки автоматической станции, а также планы участков, по которым перемещался луноход (МИИГАиК, Институт космических исследований АН СССР, Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга, ЦНИИГАиК).

Достижения советской фотограмметрии являются результатом мощного и непрерывного развития нашего социалистического государства, успешно решающего грандиозные задачи преобразования природы в интересах человека.

Глава 2

ОПТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

§ 4. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

В основе построения изображения объекта с помощью идеального объектива лежат законы геометрической оптики: прямолинейность распространения света в однородной среде, законы отражения и преломления лучей на границе двух сред.

Идеальный объектив удовлетворяет следующим условиям:

1. Пучок лучей, исходящий из одной точки, т. е. гомоцентрический пучок, после прохождения объектива остается гомоцентрическим. Отсюда следует, что каждая точка изображается точкой.

2. Плоскость, перпендикулярная к оптической оси, изображается также плоскостью, перпендикулярной к этой оси.

3. Изображение плоского объекта, расположенного перпендикулярно к оптической оси, подобно самому объекту.

На рис. 4 представлен идеальный объектив и его основные элементы: F и F' — передний и задний фокусы, FF' — оптическая ось, H и H' — передняя и задняя главные плоскости, S и S' — передняя и задняя главные точки, с которыми совпадают передняя и задняя узловые точки (предполагается, что объектив находится в однородной среде — воздухе), F_0 и F'_0 — передняя и задняя фокальные плоскости, $f_{об}$ и $f'_{об}$ — переднее и заднее фокусные расстояния. В данном случае $f_{об} = f'_{об}$.

Из оптики известно, что главные плоскости оптически сопряжены и линейное увеличение в них $\beta = +1$. Отсюда следует, что с точкой q плоскости H оптически сопряжена точка q' плоскости H'. При этом $S'q' = Sq$. Угловое увеличение в

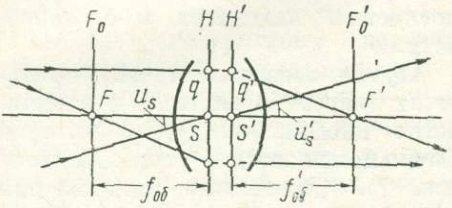


Рис. 4

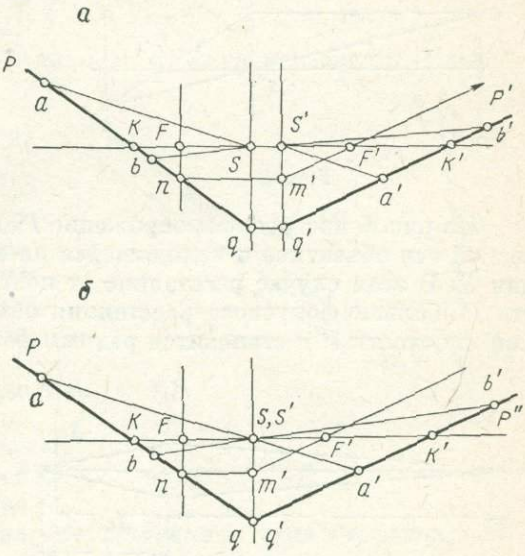


Рис. 5

узловых точках $\beta = +1$. Поэтому углы u_S и u'_S равны, т. е. сопряженные лучи, проходящие через узловые точки, взаимно параллельны.

Зная основные элементы объектива, можно построить сопряженные лучи, когда падающие лучи параллельны оптической оси, или проходят через передний фокус, или направлены к передней узловой точке.

Построим изображение плоскости P, представленной на рис. 5, *а* следом, пересекающим оптическую ось в точке K.

Продолжим след плоскости P до пересечения с главной плоскостью в точке q. Для построения следа оптически сопряженной плоскости достаточно найти изображения двух точек, принадлежащих следу плоскости P. Пусть такими точками будут q и точка n, находящаяся в передней фокальной плоскости.

Изображение точки q находится в точке q', а изображение точки n — на луче $m'F'$ в бесконечности. Поэтому изображение сопряженной плоскости пройдет через точку q' параллельно лучу $m'F'$.

Оптически сопряженные точки плоскостей P и P' лежат на взаимно параллельных лучах: $Sa \parallel S'a'$, $Sb \parallel S'b'$, $SK \parallel S'K'$. Отсюда следует, что оптическое изображение плоскости является ее центральной проекцией. При этом для пространства объекта центром проекции служит передняя узловая точка (внешний центр), а для пространства изображения — задняя узловая точка (внутренний центр).

При построении изображения объекта внешний и внутренний центры проекции можно считать совпадающими, так как расстояние между главными плоскостями не влияет на направление лучей в пространстве изображений, а следовательно, и на размеры изображения. Поэтому изображения в плоскостях P' и P'' на рис. 5, *а*, *б* конгруэнтны.

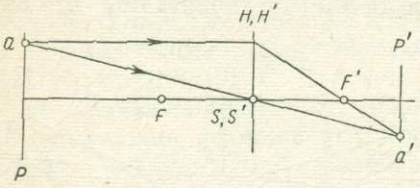


Рис. 6

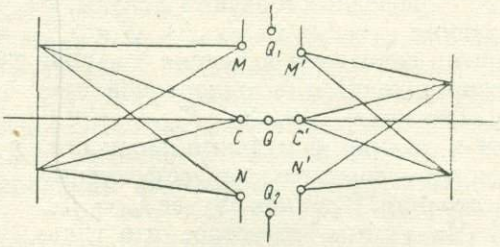


Рис. 7

На рис. 6 построено изображение P' плоскости P, перпендикулярной оптической оси объектива и находящейся на конечном расстоянии от центра проекции S. В этом случае расстояние от центра проекции до сопряженной плоскости P' больше фокусного расстояния объектива. Оно уменьшается при удалении плоскости P и становится равным фокусному расстоянию объектива, когда плоскость P находится в бесконечности.

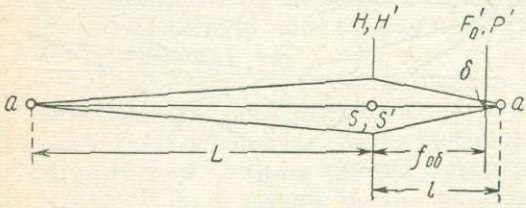


Рис. 8

Пучок световых лучей, проходящих через объектив, ограничивается диафрагмой Q_1Q_2, которая обычно помещается внутри объектива (рис. 7). Оптические изображения отверстия диафрагмы линзами объектива, расположенными между диафрагмой и объектом, а также между диафрагмой и изображением, называются соответственно входным MN и выходным $M'N'$ отверстиями, или зрачками объектива. Оба зрачка и диафрагма взаимно сопряжены. С центром диафрагмы Q сопряжены центры зрачков C и C', которые являются физическими центрами проекции.

В симметричном объективе входной и выходной зрачки всегда находятся в соответствующих главных плоскостях, так как диафрагма расположена посередине объектива. Поэтому физические и геометрические центры проекции в этих объективах совмещены. В несимметричном объективе зрачки и главные плоскости не совпадают, поэтому не совпадают физические и геометрические центры проекции. Это несовпадение не вызывает искажений в изображении плоского объекта, а при изображении пространства на плоскости оно вносит малые искажения, не имеющие никакого практического значения.

В топографических фотоаппаратах светочувствительный слой фотопластинки или фотопленки устанавливается в фокальной плоскости (рис. 8). Теоретически с точками фокальной плоскости сопряжены бесконечно удаленные точки. Но практически в этой плоскости получается резкое изображение и точек, находящихся на конечном расстоянии от объектива. Найдем минимальное расстояние L от объектива до точки объекта при условии, что изображение этой точки в фокальной плоскости имеет кружок нерезкости, не превышающий заранее заданной величины.

Из оптики известно, что

$$\frac{1}{L}+\frac{1}{l}=\frac{1}{f_{об}},$$

откуда

$$L=\frac{l}{l-f_{об}}f_{об},$$

но

$$\frac{l}{l-f_{об}}=\frac{d}{\delta},$$

где d — диаметр выходного зрачка, δ — диаметр кружка нерезкости. Следовательно,

$$L=\frac{d}{\delta}f_{об}. \qquad (2.1)$$

Пусть $f_{об}=200$ мм, относительное отверстие объектива $d:f_{об}=1:6$, т. е. $d=33$ мм. Потребуем, чтобы $\delta=0{,}02$ мм. Применительно к аэрофотосъемке это означает, что в данном случае минимальная высота фотографирования $H=L=330$ м.

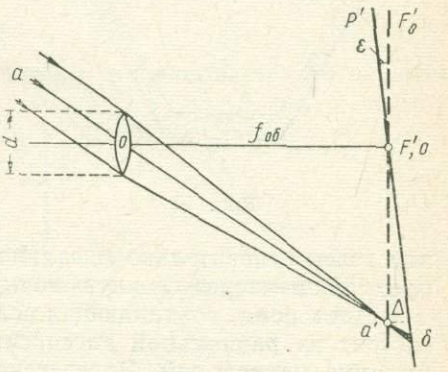


Рис. 9

Теперь подсчитаем допустимую ошибку установки эмульсионного слоя фотопластинки или фотопленки в положение, перпендикулярное оптической оси объектива. Пусть плоскость этого слоя проходит через задний фокус объектива, но составляет угол ε с фокальной плоскостью (рис. 9). Тогда удаленная точка A изобразится в виде кружка с диаметром δ. Можно написать

$$\frac{\delta}{d}=\frac{\Delta}{f_{об}}=\frac{x\varepsilon}{f_{об}}, \qquad (2.2)$$

где $\Delta=x\varepsilon$, а $x=oa'$. Потребуем, чтобы $\delta=0{,}02$ мм. Тогда при $d:f_{об}=1:6$ и $x=80$ мм получим $\varepsilon=5'$.

§ 5. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ФОТОКАМЕРЫ ДИСТОРСИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ ВНУТРЕННЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Фотокамера, предназначенная для выполнения топографической съемки, имеет жесткую конструкцию и состоит из корпуса *1*, объектива *2* и прикладной рамки *3* (рис. 10). Прикладная рамка находится в задней фокальной плоскости F'_o объектива *. С этой плоскостью совмещается светочувствительный слой фотопластинки *4* или фотопленки.

Прямая, проходящая через узловую точку объектива S перпендикулярно к плоскости прикладной рамки, называется оптической осью фотокамеры или главным лучом. Пересечение оптической оси фотокамеры с плоскостью прикладной рамки образует главную точку снимка.

В плоскости прикладной рамки имеются четыре координатные метки (рис. 11), которые изображаются на каждом снимке и определяют систему

* В плоскости наилучшего изображения.

координат $o'xy$. Линии, соединяющие противоположные метки, должны быть взаимно перпендикулярны, а точка пересечения их o' должна совпадать с главной точкой снимка o *.

Расстояние от внутреннего центра проекции S' до плоскости прикладной рамки называется фокусным расстоянием фотокамеры.

Элементы внутреннего ориентирования определяют положение внутреннего центра проекции S' относительно плоскости прикладной рамки. К ним относятся координаты x_0, y_0 главной точки o и фокусное расстояние фотокамеры $f = S'o$.

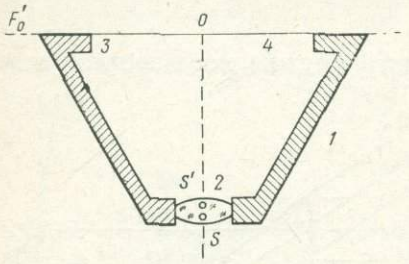


Рис. 10

До сих пор мы считали объектив идеальным, дающим строго подобное (ортоскопическое) изображение фигуры, расположенной в плоскости, перпендикулярной к оптической оси. В реальном объективе ортоскопия может быть нарушена. Нарушение ортоскопии называется дисторсией.

Различают дисторсию центрированного объектива и нецентрированного. Дисторсия центрированного объектива вызывает смещение точек относительно идеального положения по радиальным направлениям, проходящим через главную точку снимка o.

Дисторсия, возникающая вследствие погрешностей центровки объектива, состоит из радиальной дисторсии и тангенциальной, направленной перпендикулярно радиальной. Вследствие дисторсии изображение, построенное объективом, отличается от центральной проекции. Исследования М. Д. Коншина

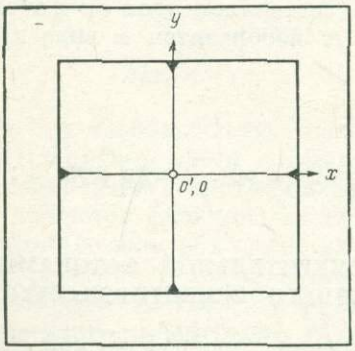


Рис. 11

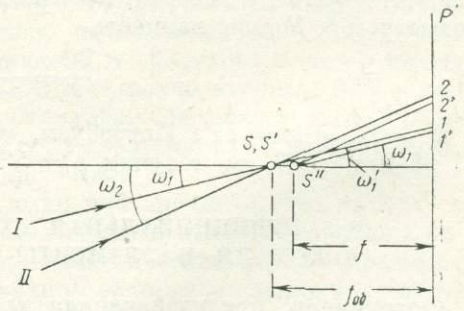


Рис. 12

показали, что при точных методах обработки снимков необходимо учитывать радиальную и тангенциальную дисторсию.

При определении фокусного расстояния фотокамеры вместо действительного S' выбирают фиктивный внутренний центр проекции S'' так, чтобы центральная проекция наиболее близко подходила к оптическому изображению в плоскости прикладной рамки (рис. 12).

Пусть S и S' — совмещенное положение внешнего и внутреннего центров проекции, $IS1$ — луч, изображающий точку I объекта. Вследствие дисторсии

* Это условие выполняется нестрого.

$\omega_1 \neq \omega_1'$. $1'$ — точка центральной проекции, полученная в результате пересечения с плоскостью P' луча $S''1^e$ параллельного лучу $1S$. Найдем смещения точек $1, 2, \ldots, n$ оптического изображения, расположенных на расстояниях $r_1, r_2, \ldots, r_n$ от оптической оси, относительно соответственных точек $1', 2', \ldots, n'$ центральной проекции.

Отрезкам $r_1, r_2, \ldots, r_n$ оптического изображения на центральной проекции соответствуют

$$r_1' = f \operatorname{tg} \omega_1;$$
$$r_2' = f \operatorname{tg} \omega_2;$$
$$\ldots\ldots$$
$$r_n' = f \operatorname{tg} \omega_n.$$

Разность между соответственными отрезками r' и r называется фотограмметрической дисторсией

$$\left.\begin{aligned} \delta_1 &= f \operatorname{tg} \omega_1 - r_1 \\ \delta_2 &= f \operatorname{tg} \omega_2 - r_2 \\ &\ldots\ldots\ldots \\ \delta_n &= f \operatorname{tg} \omega_n - r_n \end{aligned}\right\}. \qquad (2.3)$$

Фокусное расстояние фотокамеры определяется под условием

$$\sum_1^n \delta^2 = \min.$$

Решая систему уравнений (2.3) по способу наименьших квадратов, получаем нормальное уравнение

$$[\operatorname{tg}^2 \omega] f - [r \operatorname{tg} \omega] = 0,$$

отсюда

$$f = \frac{[r \operatorname{tg} \omega]}{[\operatorname{tg}^2 \omega]}. \qquad (2.4)$$

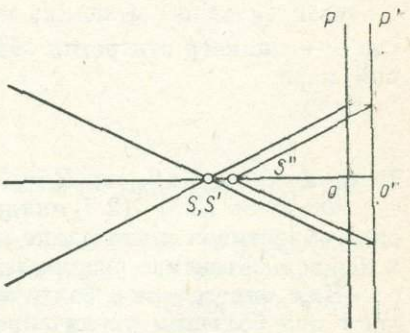


Рис. 13

Определив f, найдем фиктивный центр проекции и по формулам (2.3) фотограмметрическую дисторсию.

Углы ω можно измерять на оптической скамье, наблюдая через объектив фотокамеры перекрестия контрольной сетки, установленной в плоскости прикладной рамки. Контрольная сетка представляет собой точную пятимиллиметровую квадратную сетку, нанесенную на плоскопараллельную стеклянную пластинку.

При геометрическом анализе снимка за внешний центр проекции принимают переднюю узловую точку объектива S. С этой точкой совмещают и фиктивный внутренний центр проекции S'', перемещая соответственно плоскость снимка из положения P' в положение P так, чтобы $So = S''o' = f$ (рис. 13).

§ 6. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СНИМКА

Разрешающая способность снимка зависит от разрешающей силы объектива фотокамеры и разрешающей способности эмульсионного слоя и характеризует их свойство раздельно изображать мелкие детали объекта.

Библиотека

Разрешающая сила идеального объектива ограничена дифракцией света. Дифракция, в основе которой лежит волновая природа света, нарушает прямолинейное распространение лучей и создает сложное распределение освещенности в плоскости изображения. В результате этого точка изображается в виде круглого пятна, окруженного большим числом темных и светлых дифракционных колец с постепенно убывающей яркостью. В идеальном объективе 84% световой энергии сконцентрировано в пятне, а яркость первого кольца составляет лишь 2% от яркости пятна. Поэтому кольца для глаза мало заметны и не мешают наблюдениям. Радиус пятна

$$r = 1{,}22 \frac{\lambda}{d} f_{об}, \tag{2.5}$$

где λ — длина волны, d — диаметр отверстия объектива. Для $\lambda = 0{,}555$ мкм

$$r = 0{,}68 \frac{f_{об}}{d}. \tag{2.6}$$

Если $d : f_{об} = 1 : 6$, то $r = 4{,}1$ мкм.

Разрешающая сила объектива выражается наименьшим углом между лучами, изображающими две точки раздельно, или числом различимых линий на 1 мм изображения. В угловой мере разрешающая сила объектива

$$\varphi'' = \frac{140''}{d}, \tag{2.7}$$

где d — диаметр отверстия объектива, выраженный в миллиметрах, а в линейной мере

$$R = 1690 \frac{d}{f_{об}}. \tag{2.8}$$

Если $d : f_{об} = 1 : 6$, то $R = 282$ лин/мм.

Формулы (2.5)—(2.7) являются теоретическими. Фактическая разрешающая сила объективов значительно меньше теоретической. Это объясняется наличием в каждом объективе различных искажений.

Для определения фактической разрешающей силы объектива рассматривают под большим увеличением изображение миры, полученное в фокальной плоскости с помощью коллиматора.

Разрешающая способность эмульсионного слоя выражается числом различимых линий на 1 мм фотоизображения и определяется путем фотографирования миры с помощью высококачественного объектива.

Разрешающую способность снимка, т. е. системы объектив + эмульсионный слой, находят в результате фотографирования данным фотоаппаратом миры в лабораторных или полевых условиях.

Экспериментальные исследования показали, что между разрешающей силой R объектива, разрешающей способностью N эмульсионного слоя и разрешающей способностью R_0 системы объектив + эмульсионный слой существует связь

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R} + \frac{1}{N}. \tag{2.9}$$

Разрешающая способность наземных снимков около 100 лин/мм, аэроснимков — 50 лин/мм в центре и 20 лин/мм на краях.

Величина R_0 существенно изменяется в зависимости от контраста миры, условий фотографирования и способа обработки фотоматериала. Кроме того,

визуальная оценка качества изображения миры носит субъективный характер. Поэтому разрешающая способность определяется с невысокой точностью.

В последние годы нашли применение другие способы оценки изобразительных свойств системы объектив + эмульсионный слой. Одним из них является способ, основанный на определении частотно-контрастных характеристик (ЧКХ), показывающих зависимость между частотой штрихов N и контрастом их изображения K. Для определения ЧКХ используют миры с синусоидальным распределением плотности и электронно-оптическую скамью. Графики ЧКХ для различных участков поля зрения приведены на рис. 14. По этим графикам можно найти и разрешающую способность как предельное значение частоты, при которой еще разрешаются отдельные штрихи.

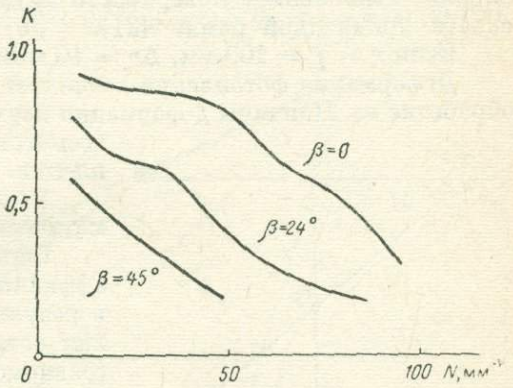


Рис. 14

На разрешающую способность снимка существенно влияет сдвиг изображения в плоскости прикладной рамки, вызванный поступательным движением самолета. Согласно исследованиям О. А. Герасимовой [5, 6] сдвиг изображения

$$\delta = 0{,}7\frac{W}{H}ft, \qquad (2.10)$$

где W — путевая скорость, f — фокусное расстояние фотокамеры, H — высота фотографирования, t — выдержка.

Методы фотограмметрической обработки снимков основаны на предположении, что фотокамера в момент экспонирования неподвижна и все лучи проходят через единый центр проекции. Поэтому величина сдвига не должна вызывать больших ошибок измерения снимков.

Нерезкость изображения вызывают и вибрации самолета. Влияние их сводится к возможному минимуму с помощью аэрофотоустановки, снабженной амортизаторами.

§ 7. ВЛИЯНИЕ ОШИБКИ ВЫРАВНИВАНИЯ ФОТОПЛЕНКИ. ДЕФОРМАЦИЯ ФОТОМАТЕРИАЛОВ

Снимок отличается от идеальной центральной проекции, так как имеет искажения, вызванные дисторсией объектива фотокамеры, ошибками выравнивания фотопленки, деформацией ее и атмосферной рефракцией.

Характер искажений, вызванных дисторсией объектива, рассмотрен выше. Фотограмметрическая дисторсия объективов, используемых для измерительных целей, не превышает 30 мкм. Искажения, вносимые дисторсией, являются систематическими и могут быть учтены при обработке снимков.

Влияние ошибки выравнивания фотопленки в плоскости прикладной рамки фотокамеры показано на рис. 15, на котором соответственно a' и a — изображения точки объекта на плоскости прикладной рамки P и поверхности

эмульсионного слоя, b — основание перпендикуляра, опущенного из точки a на плоскость P. Пусть $oa' = r$ и $a'b = \Delta r$. Тогда

$$\Delta r = \frac{r}{f}\Delta f. \tag{2.11}$$

По этой формуле определяют искажение Δr радиус-вектора точки, обусловленное отклонением поверхности эмульсионного слоя в данной точке от плоскости прикладной рамки [21].

Если $r = f = 100$ мм, $\Delta r = 10$ мкм, то $\Delta f = 10$ мкм.

Деформация фотопленки возникает главным образом при фотографической обработке ее. Причины деформации изучаются в курсе фотографии. Рассмотрим геометрическую сущность деформации фотопленки.

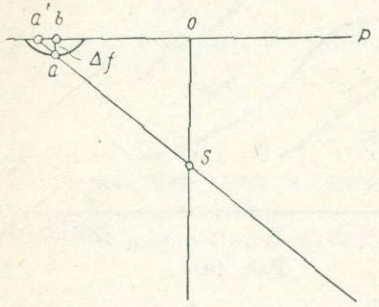


Рис. 15

Различают два вида деформации — систематическую и случайную.

Систематическая деформация представляет аффинное преобразование. Например, квадрат в результате систематической деформации может остаться квадратом, изменив только размер (равномерная деформация), или принять форму прямоугольника (неравномерная деформация), ромба (деформация сдвига), параллелограмма (неравномерная деформация со сдвигом). Равномерная деформация легко учитывается при фотограмметрических работах. Остальные виды систематической деформации учесть сложно и практически не всегда возможно. Исследования показали, что фотопленка имеет главным образом неравномерную деформацию, которая характеризуется разностью величин деформации вдоль и поперек фильма. Обычно она не превышает 30 мкм на протяжении 90 мм.

Случайная деформация не подчиняется законам аффинного преобразования. Для лучших сортов фотопленки на ацетатной основе она не больше 15 мкм и 6 мкм для пленки на малодеформирующейся основе в пределах квадрата 20 × × 20 см². Одна из причин случайной деформации — неоднородность строения подложки [3, 6, 21].

Деформация обычной фотобумаги в 2—3 раза больше деформации фотопленки. Фотобумага с металлической прослойкой и фотопластинки практически не деформируются.

Деформацию фотоматериалов необходимо учитывать в тех случаях, когда ее влияние выходит за пределы погрешностей измерения снимков.

§ 8. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ

При выводе формул фотограмметрии предполагается, что световой луч от объекта до центра проекции прямолинеен. В действительности луч света, проходя через атмосферные слои с различной плотностью, искривляется. Это явление, называемое р е ф р а к ц и е й, необходимо учитывать при обработке результатов точных фотограмметрических измерений.

Угол фотограмметрической рефракции (рис. 16) равен

$$r_f = \rho'' \frac{y}{AS}, \tag{а}$$

где $\rho'' = 206265''$, а элементарный участок BB' пути светового луча

$$dy = D_i \frac{dr_c}{\rho''}. \qquad (б)$$

На границе элементарных слоев с показателями преломления n и $n + dn$, используя известный из геометрической оптики закон преломления Снеллиуса

$$n_i \sin \varphi_i = (n_i + dn) \sin (\varphi_i + dr_c) = (n_i + dn)(\sin \varphi_i \cos dr_c + \cos \varphi_i \sin dr_c)$$

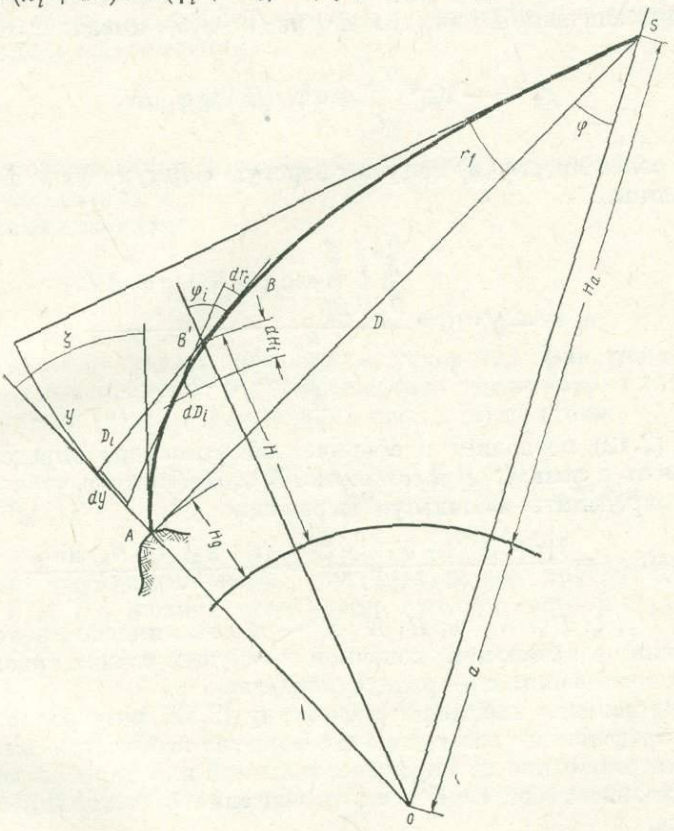


Рис. 16

и полагая в виду малости значения $dr_c \cos dr_c = 1$, $\sin dr_c = dr_c/\rho''$, получим

$$dr_c = -\rho'' \frac{dn}{n_i} \operatorname{tg} \varphi_i.$$

Для воздуха $n \approx 1{,}0003$, поэтому с высокой степенью точности можно принять $n = 1$. Тогда

$$dr_c = -\rho'' \operatorname{tg} \varphi_i \, dn = -\rho'' \cdot 10^{-6} \operatorname{tg} \varphi_i \, dN, \qquad (в)$$

где индекс преломления $N = (n - 1) \cdot 10^6$.

В свою очередь, на рис. 16

$$dD_i = \sec \varphi_i \, dH,$$

откуда

$$\left.\begin{aligned} D_i &= \int_{H_g}^{H} \sec \varphi_i \, dH \\ D &= \int_{H_g}^{H_a} \sec \varphi_i \, dH \end{aligned}\right\}. \qquad (г)$$

Подставляя значение D_i из (г) и dr_0 из (в) в (б), имеем:

$$dy = -10^{-6} \left(\int_{H_g}^{H} \sec \varphi_i \, dH \right) \operatorname{tg} \varphi_i \, dN.$$

С учетом этого вместо (а) получим строгую формулу угла фотограмметрической рефракции

$$r_f = -\rho'' \cdot 10^{-6} \frac{\int_{N_g}^{N_a} \left(\int_{H_g}^{H} \sec \varphi_i \, dH \right) \operatorname{tg} \varphi_i \, dN}{\int_{H_g}^{H_a} \sec \varphi_i \, dH} \qquad (2.12)$$

Формула (2.12) позволяет в сферической атмосфере определять углы r_f для любых высот и зенитных расстояний. В этой формуле угол φ_i в текущей точке можно определить, используя выражение

$$\sin \varphi_i = \frac{(a+H_g)(1+N_g)\sin \zeta}{(a+H)(1+N)} = \frac{(a+H_a)(1+N_a)\sin \varphi}{(a+H)(1+N)}, \qquad (2.13)$$

в котором H_g, N_g, ζ; H_a, N_a, φ; H, N, φ_i — высота, индекс преломления и зенитное расстояние в начальной, конечной и текущей точках траектории светового луча соответственно; a — радиус планеты.

Строгое вычисление входящих в формулу (2.12) интегралов невозможно, поэтому для определения угла r_f по этой формуле необходимо выполнять приближенное интегрирование по формулам трапеций или парабол, для чего атмосферу нужно разбивать на слои и иметь сведения о состоянии атмосферы на границах слоев.

При зенитных расстояниях $\zeta \leqslant 70°$ можно пренебречь кривизной атмосферных слоев и с достаточной точностью считать, что $\varphi_i = \zeta$. С учетом этого вместо (в) получим

$$dr_c = -\rho'' \cdot 10^{-6} \operatorname{tg} \zeta \, dN, \qquad (д)$$

а вместо (г) —

$$D_i = H_i \sec \zeta; \quad D = (H_a - H_g) \sec \zeta. \qquad (е)$$

Тогда, учитывая (д) и (е) и интегрируя по частям, вместо (2.12) получим

$$r_f = -\frac{\rho'' \cdot 10^{-6} \operatorname{tg} \zeta}{H_a - H_g} \int_{N_g}^{N_a} H \, dN = \frac{\rho'' \cdot 10^{-6} \operatorname{tg} \zeta}{H_a - H_g} \left[\int_{H_g}^{H_a} N \, dH - (H_a - H_g) N_a \right]. \qquad (ж)$$

Очевидно, любую атмосферу можно разбить на слои такой толщины, внутри каждого из которых ее можно считать политропной. Интеграл в формуле (ж) с учетом этого положения можно представить в виде

$$\int_{H_g}^{H_a} N\,dH = \int_{H_g}^{H_1} N\,dH + \int_{H_1}^{H_2} N\,dH + \ldots + \int_{H_n}^{H_a} N\,dH. \qquad (з)$$

Для газовой среды, имеющей плотность ρ, давление p и абсолютную температуру T, индекс преломления

$$N = N_0 \frac{pT_0}{Tp_0} = \frac{N_0}{\rho_0}\rho, \qquad (и)$$

где N_0 — индекс преломления газовой среды, плотность которой ρ_0, давление p_0 и абсолютная температура T_0.

В политропной атмосфере

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{\gamma H}{T_0}\right)^{\frac{g}{R\gamma}-1}, \qquad (к)$$

где R, g, γ — удельная газовая постоянная, ускорение силы тяжести и вертикальный градиент температуры; T_0 — абсолютная температура слоя, плотность которого ρ_0. С учетом (и) и (к) для первого слоя в (з) получим

$$N_0 \int_{H_g}^{H_1} \left[1 - \frac{\gamma (H - H_g)}{T_0}\right]^{\frac{g}{R\gamma}-1} dH = \frac{N_0 T_0}{p_0}\frac{R}{g}(p_g - p_1).$$

Аналогичные выражения можно получить и для других слоев. Тогда, учитывая, что R и g в каждом слое можно считать постоянными, вместо (з) имеем:

$$\int_{H_g}^{H_a} N\,dH = \frac{N_0 T_0}{p_0}\frac{R}{g}(p_g - p_a). \qquad (л)$$

Учитывая (л) и принимая $C_0 = \rho'' \frac{N_0 T_0}{p_0} \cdot 10^{-6}$, вместо (ж) получим

$$r_f = C_0 \left[\frac{R(p_g - p_a)}{g(H_a - H_g)} - \frac{p_a}{T_a}\right] \operatorname{tg} \zeta. \qquad (2.14)$$

Анализ вывода формулы (2.14) подтверждает т е о р е м у: для сферической модели атмосферы с произвольным по высоте распределением характеризующих ее параметров рефракция светового луча при зенитных расстояниях до 85° (для атмосферы Земли) практически зависит только от атмосферных условий в начале и конце траектории светового луча.

Формулы (2.12) и (2.14) позволяют определять фотограмметрическую рефракцию в атмосфере с произвольными параметрами. Для атмосферы Земли при $C_0 = 2902{,}42$ с дуги град/Па (для длины световой волны $\lambda = 0{,}530$ мк), $R = 287{,}0$ м^2/с^2 град, $g = 9{,}81$ м/с^2 вместо (2.14) получим

$$r_f = \left(0{,}6369\frac{p_g - p_a}{H_a - H_g} - 21{,}77\frac{p_a}{T_a}\right) \operatorname{tg} \zeta, \qquad (2.15)$$

где r_f — в секундах дуги, p_g, p_a в Па, H_g, H_a — в километрах, T_a — в градусах Кельвина.

При определении углов фотограмметрической рефракции с целью введения поправок в положение точек снимка для данного маршрута или даже всего участка аэросъемки во многих случаях можно считать величины p_a, T_a, H_a постоянными. Давление p_g зависит от высоты H_g. Положим

$$p_g = p_0 - \frac{H_g - H_0}{\Delta p},$$

где p_0 — давление в точке, имеющей высоту H_0 и расположенной на ближайшей к участку съемки метеостанции, на аэродроме и т. п., Δp — барометрическая ступень. С учетом этих соображений в формуле (2.15) переменными будут только H_g и ζ.

При зенитных расстояниях, больших 70°, необходимо учитывать сферичность атмосферных слоев, а углы r_f определять или по строгой формуле (2.12), или по приближенным, но достаточно точным, формулам [23].

Глава 3

НАБЛЮДЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ СНИМКОВ И МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

§ 9. МОНОКУЛЯРНОЕ ЗРЕНИЕ

Наблюдатель подсознательно устанавливает глаз так, чтобы изображение рассматриваемого объекта O было в наиболее чувствительном месте сетчатки — в центральной ямке f желтого пятна (рис. 17).

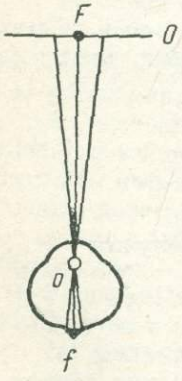


Рис. 17

Пересечение зрительной оси fo глаза с рассматриваемым предметом O называется *точкой фиксации монокулярного взора* F.

Поле зрения неподвижного глаза довольно обширно: 150° по горизонтали и 120° по вертикали. Однако боковые предметы глаз видит неясно.

Угол, составленный лучами, идущими из задней узловой точки глаза к краям центральной ямки, равен 1,5° (при наблюдении удаленных объектов) и называется *углом отчетливого зрения*.

Чтобы охватить зрением большие предметы, мы поворачиваем глаз, т. е. переводим его зрительную ось с одной точки на другую.

Две светящиеся точки не воспринимаются отдельно, если их изображения образуются на одной колбочке, так как каждая колбочка передает мозгу только одно ощущение. Две точки мы видим раздельно только в том случае, если между их изображениями на сетчатке имеется нераздраженная клеточка — колбочка или палочка. Таким образом, предельная острота зрения характеризуется углом, под которым из задней узловой точки глаза виден диаметр колбочки.

Минимальный угол, под которым наблюдатель еще видит раздельно две светящиеся точки, определяет *остроту монокулярного зрения первого рода*. Опытным путем получено, что для нормального глаза этот угол равен 45″.

Остроту монокулярного зрения второго рода характеризует минимальный угол, под которым глаз раздельно видит две параллельные линии. Для вертикальных линий этот угол равен 20″.

Острота зрения при наблюдении линий повышается потому, что линия изображается на целой группе колбочек. Вследствие этого мы видим, например телеграфный провод на расстоянии, во много раз превышающем то расстояние, с которого можно видеть шарик, диаметр которого равен сечению провода. Черную нить на светлом фоне можно заметить даже при ее угловой толщине около 0,5″.

Приведенные выше значения остроты монокулярного зрения относятся к случаю, когда изображения предметов попадают в центральную ямку. Острота зрения зависит от освещенности и формы объектов, от контрастности между объектами и фоном, опытности наблюдателя и от многих других факторов. Величина ее у различных наблюдателей и в различных условиях наблюдения колеблется в больших пределах — от нескольких секунд и даже десятых секунды до десяти минут.

Воспринимать глубину, т. е. оценивать расстояния до наблюдаемых предметов, мы можем при монокулярном зрении с помощью косвенных признаков. Например, если один предмет частично закрывает другой, мы считаем, что он ближе к нам, чем другой.

Законы перспективы также помогают нам оценивать удаленность объектов. Когда в поле зрения имеется ряд объектов одинаковой величины, расстояния до этих объектов мы оцениваем по сравнительной величине их кажущихся размеров. Так мы определяем расстояния вдоль полотна железной дороги по кажущемуся уменьшению ширины дороги или высоты телеграфных столбов.

Тени, отбрасываемые предметами, и уменьшение яркости и выпуклости отдаленных объектов вследствие поглощения света атмосферой тоже способствуют восприятию глубины.

Определять расстояния до близких предметов помогает еще аккомодация глаза. Чем ближе к наблюдателю предмет, тем более интенсивно происходит напряжение мускулов, изменяющих кривизну хрусталика. Каждому расстоянию от глаза до объекта соответствует определенное сокращение мускулов. Это позволяет нам судить о глубине, подобно тому как сокращение мускулов руки дает понятие о тяжести поднимаемых предметов.

Косвенные признаки оценки глубины одним глазом дают приблизительное, а иногда и неверное представление о расстояниях. Точную оценку глубины обеспечивает прямой ее признак — физиологический параллакс, который возникает при бинокулярном зрении.

§ 10. БИНОКУЛЯРНОЕ ЗРЕНИЕ

Зрение двумя глазами имеет существенное значение для восприятия пространственных соотношений рассматриваемых предметов.

При бинокулярном зрении наблюдатель устанавливает глаза так, чтобы их зрительные оси пересекались в том месте предмета, которое он желает отчетливо рассмотреть (рис. 18).

Точка пересечения зрительных осей F называется точкой фиксации бинокулярного взора. Изображения точки фиксации F находятся в центральных ямках f_1 и f_2.

Расстояние между передними узловыми точками глаз o_1 и o_2 называется глазным базисом. Величина глазного базиса у различных людей

различна и колеблется от 58 до 72 мм; среднее значение глазного базиса считается равным 65 мм.

Изображения одной и той же точки предмета, полученные на сетчатках обоих глаз, называются соответственными точками, а лучи, строящие эти изображения и проходящие через узловые точки, — соответственными лучами.

Любая пара соответственных лучей, например Aa_1 и Aa_2, находится в одной плоскости, проходящей через глазной базис и называемой зрительной плоскостью. Плоскость, в которой лежат зрительные оси обоих глаз, называется главной зрительной плоскостью. Положение этой плоскости определяется узловыми точками o_1 и o_2 и точкой фиксации F.

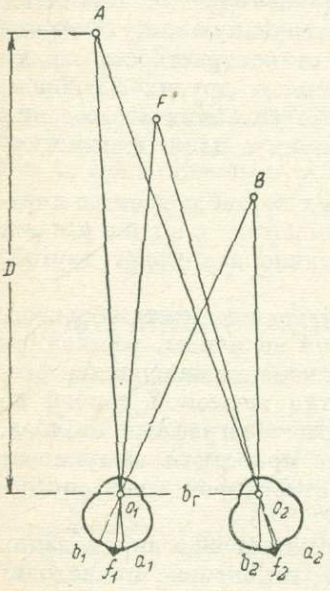


Рис. 18

Угол между зрительными осями глаз называется углом конвергенции, а угол между парой соответственных лучей — параллактическим углом. Эти углы для нормального зрения малы, особенно при наблюдении удаленных объектов. Поэтому их можно определять по приближенной формуле

$$\gamma = \frac{b_г}{D}, \qquad (3.1)$$

где $b_г$ — глазной базис, D — расстояние до рассматриваемой точки.

Если точка находится на расстоянии наилучшего зрения (25 см), то параллактический угол равен 15°. При близорукости расстояние наилучшего зрения уменьшается иногда до 8 см, а значение параллактического угла возрастает до 40°.

Чтобы отчетливо видеть предметы с расстояния 25 см близорукие и дальнозоркие пользуются очками.

Конвергенция зрительных осей физиологически связана с аккомодацией глаз. Эта связь заключается в том, что определенное состояние аккомодации стремится вызвать и определенную степень сведения зрительных осей и, наоборот, тому или иному сведению зрительных осей соответствует определенная степень аккомодации. Однако связь между конвергенцией и аккомодацией не является весьма строгой.

Бинокулярное зрение обладает двумя замечательными свойствами. Первым свойством является слияние в нашем зрительном впечатлении двух изображений, получаемых на сетчатках, в одно пространственное изображение. Второе свойство — оценка глубины, т. е. удаленности наблюдаемых объектов. Эти свойства тесно связаны с понятиями о симметричных и несимметричных точках на сетчатках, а также с физиологическим параллаксом.

Симметричные точки — такие точки сетчаток, которые лежат в одном и том же направлении и на одном и том же расстоянии относительно соответствующих центральных ямок сетчаток. Например, точки a_1 и a_2 на рис. 19 — пара симметричных точек. Положение их на сетчатках определяется направлением и величиной дуг f_1a_1 и f_2a_2. К симметричным точкам относятся, очевидно, и центральные ямки сетчаток.

Точки сетчаток, лежащие на различных расстояниях от центральных ямок, называются несимметричными (точки b_1 и b_2).

Если точка фиксации и какая-либо другая рассматриваемая точка, например точки F и A, находятся в бесконечности, то изображения каждой из точек получаются на симметричных точках сетчаток.

Точка фиксации изображается на симметричных точках сетчаток и при *любом другом положении ее в пространстве* (*см. рис. 18, 19*).

Совокупность всех точек пространства, которые при заданном положении точки фиксации дают изображения на симметричных точках сетчаток, называется гороптером. Для различных положений точки фиксации гороптер имеет различную форму.

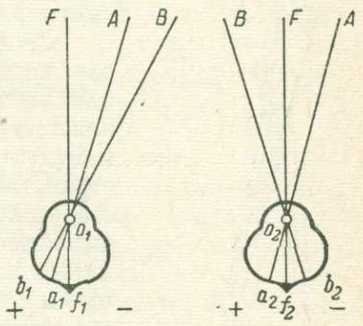


Рис. 19

Раздражение симметричных точек сетчаток всегда вызывает впечатление одиночного предмета. В этом случае два изображения всегда сливаются в нашем зрительном впечатлении в одно.

Если изображение предмета падает в обоих глазах на несимметричные точки, то тогда на сетчатках могут возникать двойные изображения. Однако двоение наступает не всегда. Если несимметричность раздраженных мест сетчаток не чрезмерна, то вместо двоения может возникнуть впечатление большей или меньшей удаленности данного объекта по сравнению с фиксируемым.

Опыт показал, что не двоятся только те точки рассматриваемых предметов, параллактические углы которых не отличаются от параллактического угла точки фиксации больше чем на 70′

$$|\gamma - \gamma_F| \leqslant 70'. \tag{3.2}$$

Основным фактором оценки глубины при бинокулярном зрении является физиологический параллакс, представляющий собой разность дуг, определяющих положение пары соответственных точек на сетчатках. Например, физиологический параллакс точки A (см. рис. 18)

$$\eta = \breve{f}_1 a_1 - \breve{f}_2 a_2.$$

Дуга считается положительной, если она расположена слева от центральной ямки.

Физиологический параллакс точки фиксации всегда равен нулю. Значение физиологического параллакса для какой-либо другой точки рассматриваемого предмета зависит от положения ее относительно точки фиксации. Если физиологический параллакс $\eta < 0$, то наблюдатель видит, что соответствующая точка (точка A) расположена дальше точки фиксации. Если же $\eta > 0$, то наблюдатель видит, что соответствующая точка (точка B) лежит ближе точки фиксации. Для всех точек, находящихся на гороптере, физиологический параллакс равен нулю. Поэтому мы не замечаем удаления точек гороптера относительно точки фиксации.

Таким образом, при заданной точке фиксации бинокулярного взора наблюдатель отчетливо видит только те предметы, которые находятся в поле отчетливого зрения глаз и которые имеют параллактические углы, отличающиеся

от параллактического угла точки фиксации не более чем на 70′. На рис. 20 область отчетливого бинокулярного зрения при данной точке фиксации заштрихована. Если не все рассматриваемые предметы попадают в эту область, то наблюдатель непрерывно меняет точку фиксации.

Боковые отклонения зрительных осей составляют 45°. Вследствие этого возникают разность расстояний от глаз до наблюдаемого предмета и разность масштабов его изображений на сетчатках глаз. Максимальное значение этой разности равно 16%, оно образуется, когда угол отклонения зрительной оси имеет предельную величину, а расстояние до объекта равно расстоянию наилучшего зрения. Это значение разности масштабов изображений не вызывает двоения рассматриваемого предмета.

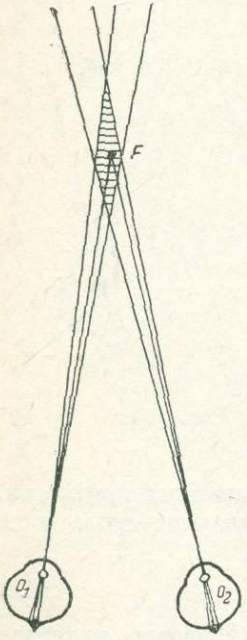


Рис. 20

Двоение наблюдаемой точки возникает также и в случае, когда ее изображения попадают на несоответственные параллели сетчаток, т. е. когда зрительные оси глаз не лежат в одной плоскости. Такого двоения у человека с нормальным зрением при наблюдении в естественном пространстве не бывает. Оно может возникнуть в процессе стереоскопического рассматривания снимков, если не выполнены некоторые условия, которые будут изложены ниже. Это двоение можно также вызвать искусственным путем, нажимая слегка при наблюдении какого-либо объекта на нижнюю часть глазного яблока. Тогда изображение на сетчатке сдвинется в вертикальном направлении и мы увидим объект двойным

Пусть мы отчетливо замечаем разность глубин точек A и F (см. рис. 18), и точка A движется по направлению к точке фиксации F. По мере приближения точки A к точке F мы будем ощущать уменьшение разности глубин этих точек. Наконец, точка A займет такое положение, при котором нам будет казаться, что она и точка F находятся на одинаковом удалении от нас, хотя в действительности разность глубин данных точек не равна нулю. Это явление объясняется ограниченностью остроты бинокулярного зрения.

Остротой бинокулярного зрения первого рода называется наименьшая разность параллактических углов двух точек, при которой мы еще замечаем разность глубин этих точек. Опытным путем установлено, что острота бинокулярного зрения первого рода равна 30″.

Пусть разность параллактических углов точек A и F равна остроте бинокулярного зрения $\Delta\gamma$. Найдем разность глубин, соответствующую этой разности параллактических углов.

Согласно (3.1) и рис. 18 для точки фиксации напишем

$$D = \frac{b_г}{\gamma}, \tag{3.3}$$

отсюда

$$\Delta D = -D^2 \frac{\Delta\gamma}{b_г}. \tag{3.4}$$

Следовательно, минимальная разность глубин, воспринимаемая при бинокулярном зрении, пропорциональна квадрату расстояния до точки фиксации.

Остротой бинокулярного зрения второго рода называется наименьшая разность параллактических углов для двух вертикальных прямых, при которой мы еще замечаем разность глубин этих прямых. Опыты показали, что острота бинокулярного зрения второго рода равна 10″.

Острота бинокулярного зрения у различных людей различна. Кроме того, она зависит от освещенности наблюдаемых предметов, контрастности их относительно фона, формы предметов, продолжительности рассматривания их и от других факторов. Приведенные выше значения остроты бинокулярного зрения являются средними для наблюдателей с нормальными глазами, рассматривающих объекты в благоприятных условиях. Эти величины приняты в фотограмметрии для расчетов.

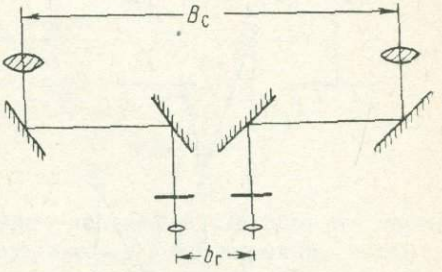


Рис. 21

Пусть точка фиксации удалена от наблюдателя настолько, что параллактический угол равен остроте бинокулярного зрения — 30″. В этом случае наблюдатель не может оценивать разность глубин точки фиксации и точек, лежащих дальше.

Расстояние, соответствующее параллактическому углу, равному остроте бинокулярного зрения, называется радиусом невооруженного бинокулярного зрения. Обозначив эту величину через R, найдем ее по формуле (3.3)

$$R = \frac{b_г}{\Delta\gamma} = \frac{65 \text{ мм } \rho''}{30''} = 450 \text{ м}.$$

Однако опыт показывает, что мы замечаем разность глубин и при расстояниях, значительно превышающих 450 м. Этот факт объясняется не физиологическим параллаксом, а косвенными признаками восприятия глубины: законами перспективы, тенями, уменьшением яркости и выпуклости удаленных предметов и др.

Радиус бинокулярного зрения можно увеличить с помощью телестереоскопа (рис. 21), призменного бинокля или стереотрубы, искусственно увеличивающих глазной базис (B_c вместо $b_г$) и повышающих остроту бинокулярного зрения благодаря увеличению, даваемому этими приборами.

Обозначив радиус вооруженного бинокулярного зрения через R', а увеличение прибора через v, получим

$$R' = \frac{B_c}{b_г} vR. \tag{3.5}$$

Коэффициент, стоящий перед R в правой части этого выражения, называется общей пластичностью

$$\omega = \frac{B_c}{b_г} v. \tag{3.6}$$

Итак, минимальная разность глубин, которую мы еще воспринимаем с помощью стереоприбора, в ω раз меньше соответствующей разности глубин, оцениваемой при невооруженном бинокулярном зрении.

§ 11. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ СНИМКОВ

Восприятие глубины возможно не только при наблюдении предметов, но и при рассматривании их плоских перспективных изображений.

Пусть A, F и B (рис. 22) — точки рассматриваемого наблюдателем предмета, o_1 и o_2 — узловые точки глаз, $a_1, f_1, b_1, a_2, f_2, b_2$ — изображения точек A, F и B на сетчатках левого и правого глаз, F — точка фиксации.

Пересечем пучки лучей o_1AFB и o_2AFB плоскостями P_1 и P_2, которые могут быть расположены произвольно. Точки a_1', f_1', b_1' и a_2', f_2', b_2' являются следами пучков на плоскостях и представляют собой перспективные изображения предмета с центрами проекций в точках o_1 и o_2.

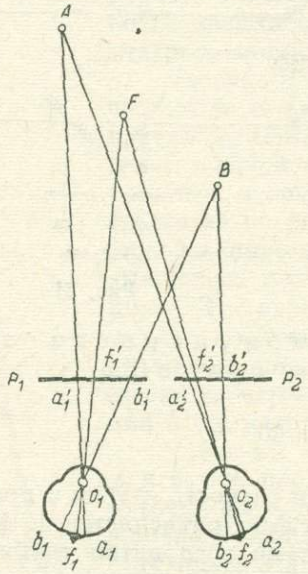


Рис. 22

Теперь удалим предмет и поставим между глазами вертикальный экран так, чтобы каждый глаз видел только соответствующую ему перспективу. Тогда левый глаз будет восстанавливать точку A на линии o_1a_1, а правый — на линии o_2a_2'. Поэтому при наблюдении двумя глазами точка будет казаться расположенной на пересечении линий $o_1a'_1$ и o_2a_2', т. е. в том месте, которое занимала в пространстве

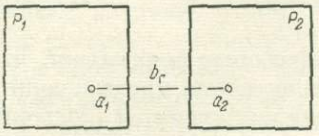


Рис. 23

соответствующая точка предмета. То же самое можно сказать и в отношении точек F и B.

Следовательно, рассматривая два плоских перспективных изображения одного и того же предмета, например два снимка, можно получить одно пространственное изображение, или, как говорят, стереоскопический эффект. Однако для этого необходимо выполнить ряд условий, вытекающих из рассмотренных выше особенностей бинокулярного зрения, а именно:

1. Снимки предмета должны быть получены с двух различных точек пространства.

2. Разность масштабов снимков не должна превышать 16% от их значений.

3. Каждым глазом должен наблюдаться отдельный снимок.

4. Снимки должны быть расположены относительно глаз так, чтобы соответственные зрительные лучи, например o_1a_1' и o_2a_2', пересекались. Это требование не является строгим, так как стереоэффект возникает и при небольшом расхождении соответственных зрительных лучей.

5. Угол, под которым пересекаются соответственные лучи, не должен превышать 16°.

6. При данном значении параллактического угла должна обеспечиваться соответствующая аккомодация.

Стереоскопический эффект можно получить невооруженным глазом. Для этого снимки устанавливают перед глазами так, чтобы расстояние между соответственными точками a_1 и a_2 было близким к величине глазного базиса, а линия, соединяющая эти точки, была параллельна ему (рис. 23). Затем снимки наблюдают, стараясь направить зрительные оси глаз параллельно друг другу, для чего требуется некоторое напряжение зрения. В результате вместо двух

Рис. 24

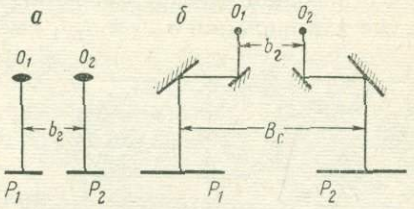


Рис. 25

плоских изображений наблюдатель увидит одно рельефное. Обычно это достигается только после более или менее продолжительной тренировки, которую целесообразно начинать с простых стереоскопических чертежей (рис. 24).

Стереоскопическое рассматривание снимков невооруженным глазом затрудняется тем, что конвергенция зрительных осей в этом случае значительно не соответствует аккомодации глаз: зрительные оси устанавливаются почти параллельно, а глаза аккомодируются на расстояние около 25 см.

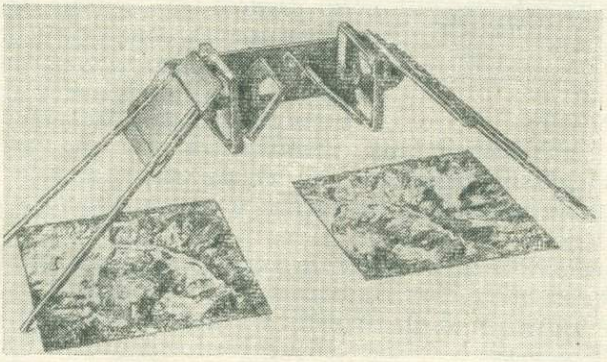


Рис. 26

Стереоскопический эффект получается легче с помощью стереоскопа.

Для рассматривания снимков небольшого формата (6 ×6 см) изготовляют линзовые стереоскопы (рис. 25, *а*), а для наблюдения снимков большого формата — зеркальные стереоскопы (рис. 25, *б*). Зеркальные стереоскопы часто снабжаются и линзами для рассматривания снимков с увеличением (рис. 26).

Расстояние d от глаза наблюдателя по ходу центрального луча до снимка называется главным расстоянием стереоскопа. Если в стереоскопе имеются линзы, то d измеряется от центра линзы по ходу центрального луча до снимка.

Увеличение стереоскопа

$$v = \frac{250}{d}, \tag{3.7}$$

где d должно быть выражено в мм.

Расстояние между центрами больших зеркал называется б а з и с о м с т е р е о с к о п а (B_c).

Для стереоскопического рассматривания снимки устанавливают так, чтобы начальные направления o_1o_2' и o_2o_1' были на одной прямой, параллельной базису стереоскопа, а расстояние между какой-либо парой соответственных точек, например a_1 и a_2 (рис. 27, *а*), приблизительно равнялось базису стереоскопа.

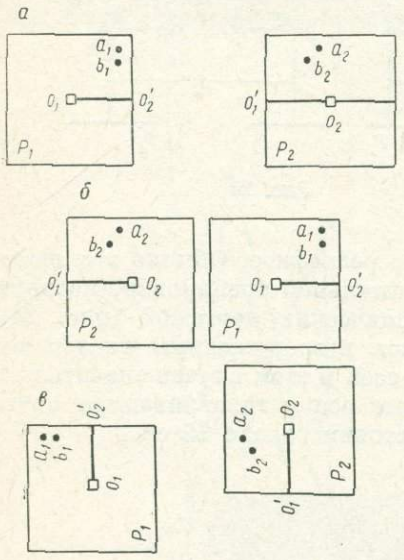


Рис. 27

Стереоскопический эффект получается прямым (горы изображаются горами, а низины — низинами), если левый глаз видит левый снимок, а правый глаз — правый (см. рис. 27, *а*), или обратным (горы изображаются низинами, низины — горами), если перед левым глазом установлен правый снимок, а перед правым — левый (рис. 27, *б*).

Пластичность стереоскопической модели будет максимальной, если начальные направления параллельны глазному базису. Если же начальные направления составляют некоторый угол с глазным базисом, то пластичность становится меньше. Она уменьшается по мере возрастания этого угла от 0 до 90°. Когда начальные направления перпендикулярны к глазному базису (рис. 27, *в*), пространственное изображение объекта становится плоским, получается так называемый нулевой стереоэффект.

Изменение пластичности модели при перестановке или вращении снимков возникает вследствие изменения величины и знака физиологического параллакса.

Подсчитаем минимальную разность высот Δh, оцениваемую с помощью стереоскопа при максимальном прямом (или обратном) стереоэффекте. Для этого используем формулу (3.3), заменив в ней расстояние от наблюдателя до объекта D и глазной базис $b_г$ соответственно высотой съемки H и базисом фотографирования B. Кроме того, разделим правую часть формулы на коэффициент $f : d$, представляющий собой увеличение изображения, наблюдаемого в стереоприборе, по сравнению с изображением, видимым невооруженным глазом в естественном пространстве с точки фотографирования. Получим

$$\Delta h = \frac{H^2 d}{Bf} \Delta\gamma, \tag{3.8}$$

где f — фокусное расстояние фотокамеры, d — главное расстояние стереоскопа, $\Delta\gamma$ — острота бинокулярного зрения первого рода.

Подставив в равенство (3.8) значения

$$B = \frac{H}{f} b \quad \text{и} \quad d = \frac{250}{v},$$

где b — базис фотографирования в масштабе снимка, а v — увеличение стереоприбора, найдем

$$\Delta h = 250 \frac{H}{vb} \Delta\gamma. \qquad (3.9)$$

Для стереоскопического рассматривания и дешифрировании снимков фирма Цейсса изготовила специальный прибор, названный интерпретоскопом (рис. 28).

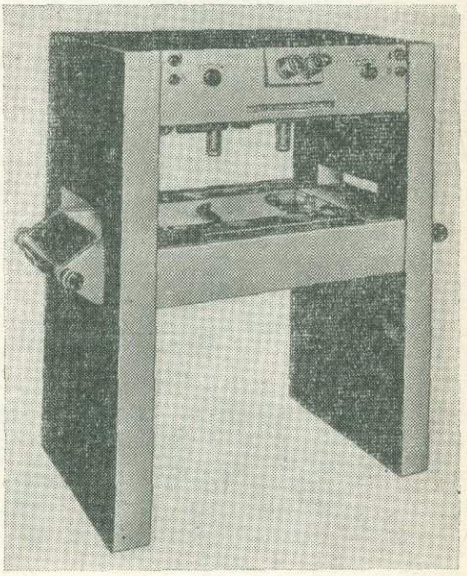


Рис. 28

Прибор состоит из стола с прозрачным стеклянным экраном, на котором устанавливаются снимки, и бинокулярного микроскопа. Микроскоп имеет две части — подвижную и неподвижную. Подвижная перемещается по двум взаимно перпендикулярным направлениям, что позволяет рассматривать различные части стереопары. Увеличение бинокулярного микроскопа можно изменить с помощью панкратической системы и двух взаимозаменяемых объективов с различными фокусными расстояниями. Изменение увеличения осуществляется плавно как одновременно в левой и правой ветвях бинокуляра, так и отдельно в каждой ветви. Это обеспечивает возможность выравнивания масштабов левого и правого изображений даже в случае, когда масштабы снимков, составляющих стереопару, значительно отличаются друг от друга. Изображения снимков можно оптически поворачивать, что позволяет наблюдать неразрезанный фильм и быстро переходить от прямого стереоэффекта к обратному или нулевому.

Наведение марки бинокуляра на точку стереомодели производится четырьмя движениями подвижной части наблюдательной системы: совместными движениями левого и правого объективов в продольном и поперечном направлениях и движениями одного объектива относительно другого в тех же направлениях. Перемещение одного объектива относительно другого в продольном направлении можно отсчитать, что необходимо для измерительных целей.

Интерпретоскоп выпускается в двух вариантах — с одним бинокуляром и с двумя. Для учебных целей второй вариант представляет наибольший интерес. На рис. 29 изображена оптическая схема интерпретоскопа с двумя бинокулярами. Здесь: *1* — первый бинокуляр, *2* — панкратическая система, *3* — светоделительный кубик, *4* — прямоугольная призма, *5* — оборачивающая система и *6* — второй бинокуляр. Второй вариант интерпретоскопа отличается от первого тем, что вместо прямоугольной призмы, направляющей все лучи от панкратической оборачивающей системы *2* в первый бинокуляр, применяется полупосеребренный кубик *3*, склеенный из двух прямоугольных призм и обеспечивающий пропускание 50% света через дополнительную прямоугольную призму *4* в плоскость промежуточного изображения. В этой плоскости расположена марка второго бинокуляра *6*. При помощи двухкомпонентной оборачи-

вающей системы *5* промежуточное изображение проектируется в плоскость изображения второго бинокуляра. Оба бинокуляра имеют одинаковую конструкцию.

Интерпретоскоп с двумя бинокулярами используется не только для обучения, но и для производственных целей при дешифрировании сложных объектов, когда возникает необходимость одновременного рассматривания стереопары двумя наблюдателями.

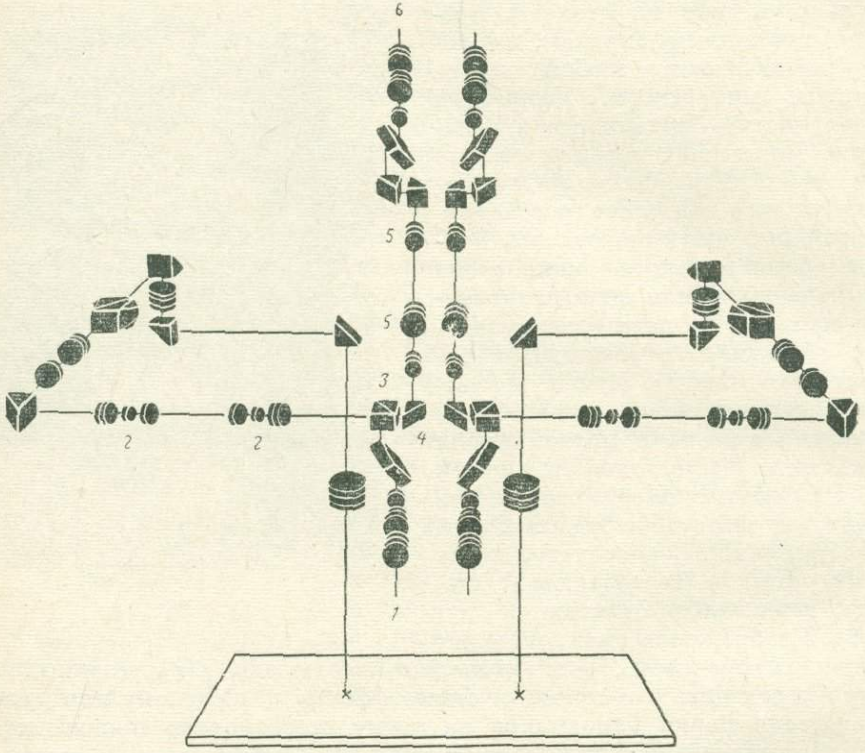


Рис. 29

Основные характеристики интерпретоскопа:

формат снимков	до 30×30 см
увеличение наблюдательной системы	от 2 до 6 и от 5 до 15×
поле зрения	$\frac{200 \text{ мм}}{\text{увеличение}}$
оптический поворот каждого изображения снимков	до 400g
допустимая разномасштабность снимка	до 1 : 7,5
точность отсчета разности продольных параллаксов	0,02 мм
размеры прибора	126×70×128 см
масса прибора	176 кг

§ 12. СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ СНИМКОВ И МОДЕЛИ

Координаты точек одиночного снимка можно измерить с помощью циркуля и масштабной линейки или с помощью специального прибора-монокомпаратора. Эти способы измерения снимков основаны на свойствах монокулярного зрения и называются монокулярными. Они не позволяют точно отождествлять неконтурные соответственные точки на соседних снимках.

Стереоскопические способы измерения снимков, основанные на свойствах бинокулярного зрения, обеспечивают высокую точность определения координат соответственных точек как контурных, так и неконтурных.

Способ мнимой марки. Способ мнимой марки предложен в 1899 г. Пульфрихом и применяется для измерения пары снимков и модели.

На пару снимков накладывают две марки — одну на левый снимок, другую — на правый. При стереоскопическом рассматривании снимков и марок наблюдатель видит пространственную модель и одну марку вместо двух. Две марки сливаются в нашем зрительном впечатлении в одну, как сливаются два снимка в одно рельефное изображение. Получаются мнимое изображение местности — стереоэффект и мнимая марка. Изменение положения марок на снимках вызывает пространственное перемещение мнимой марки. Благодаря этому мнимую марку можно совместить с любой точкой видимой модели. Если такое совмещение достигнуто, значит, действительные марки находятся на соответственных точках стереопары. Движения действительных марок учитываются, что позволяет измерять координаты и параллаксы точек стереопары.

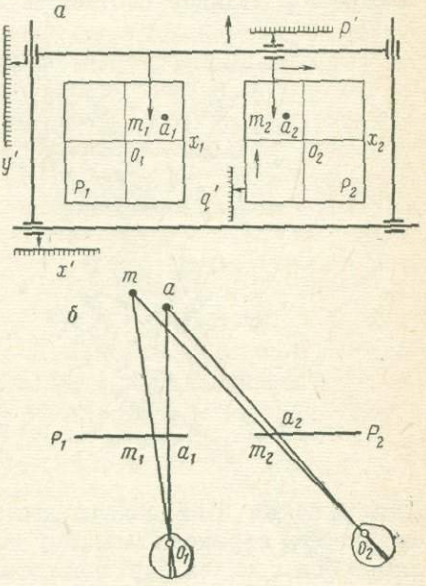


Рис. 30

Пусть, наблюдая, например, с помощью стереоскопа пару снимков P_1 и P_2 (рис. 30, *а*), мы получили стереоэффект. При этом снимки установлены так, что оси x их находятся на одной прямой. Наложим на снимки две одинаковые по форме и размерам марки m_1 и m_2 так, чтобы прямая m_1m_2 была параллельна оси x. Пусть марки имеют следующие движения:

— совместное движение, параллельное оси x,

— совместное движение, перпендикулярное оси x,

— движение одной марки относительно другой, параллельное оси x.

Кроме этих движений марок необходимо предусмотреть еще возможность смещения одного снимка относительно другого, перпендикулярно оси x.

Четырех движений вполне достаточно для совмещения марки m_1 с любой точкой снимка P_1, например с точкой a_1, и марки m_2 с соответствующей точкой a_2 снимка P_2.

Наблюдая снимки с помощью стереоскопа, мы увидим модель и мнимую марку m (рис. 30, *б*). Изменение расстояния между действительными марками m_1 и m_2 вызывает перемещение мнимой марки m по глубине. Если расстояние

между действительными марками больше расстояния между соответственными точками a_1 и a_2, то мнимая марка будет дальше точки a модели и наоборот.

Если мнимая марка совмещена с точкой a модели, то действительные марки m_1 и m_2 совмещены с соответственными точками a_1 и a_2. Наоборот, если действительные марки совмещены с соответственными точками, то мнимая марка наведена на соответствующую точку модели. Таким образом, можно стереоскопически опознавать на снимке точку, соответствующую данной точке на другом снимке. Пусть марка m_1 наведена на какую-либо точку снимка P_1, которая не является контурной и не может быть опознана монокулярно на снимке P_2. Найдем соответствующую точку на снимке P_2 стереоскопически.

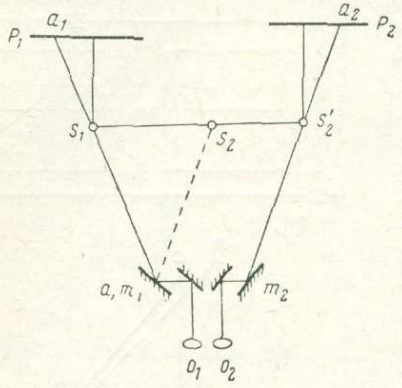


Рис. 31

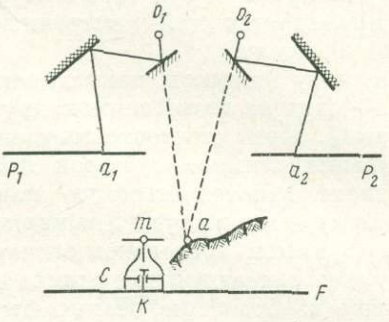


Рис. 32

Для решения этой задачи достаточно, не изменяя положения марки m_1 на снимке P_1, перемещать марку m_2 параллельно оси x и снимок P_2 перпендикулярно оси x до тех пор, пока мнимая марка не коснется модели.

Для измерения координат соответственных точек имеются шкалы x', y', p' и q', с помощью которых учитываются передвижения снимков.

На рис. 31 представлена схема измерения модели способом мнимой марки. Здесь действительные марки m_1 и m_2 нанесены на зеркальных экранах, находящихся в пространстве модели и перемещающихся по трем взаимно перпендикулярным направлениям. С помощью проектирующих камер с объективами S_1 и S_2 на экранах получаются изображения снимков P_1 и P_2. Рассматривая через бинокуляр эти изображения и марки, наблюдатель видит стереоэффект и мнимую марку. Совместными движениями действительных марок можно навести мнимую марку на любую точку видимой модели, а затем отсчитать координаты соответствующей точки действительной модели, например точки a.

Способ действительной марки. Этот способ предложен Девилем в 1902 г. для измерения модели.

Стереоскоп, с помощью которого рассматривается пара снимков P_1 и P_2, состоит из двух пар зеркал (рис. 32). Внутренние зеркала, находящиеся перед глазами наблюдателя o_1 и o_2, посеребрены на 50%. Благодаря этому наблюдатель видит не только модель, но и действительную марку m, расположенную в пространстве мнимой модели. Снимки имеют движения, необходимые для ориентирования их.

На рисунке a_1 и a_2 — пара соответственных точек на снимках, a — точка мнимой модели. Марка m находится на экране измерительного столика C,

который можно перемещать на планшете F. Высота марки изменяется путем передвижения экрана относительно столика. Столик имеет карандаш K, острие которого лежит на прямой, проходящей через марку перпендикулярно планшету. Таким образом, марку можно совместить с любой точкой модели и нанести соответствующую точку на планшет.

Пусть модель ориентирована относительно планшета. Тогда для составления карты местности достаточно с помощью измерительного столика ортогонально спроектировать на планшет контуры, видимые на модели, и провести горизонтали.

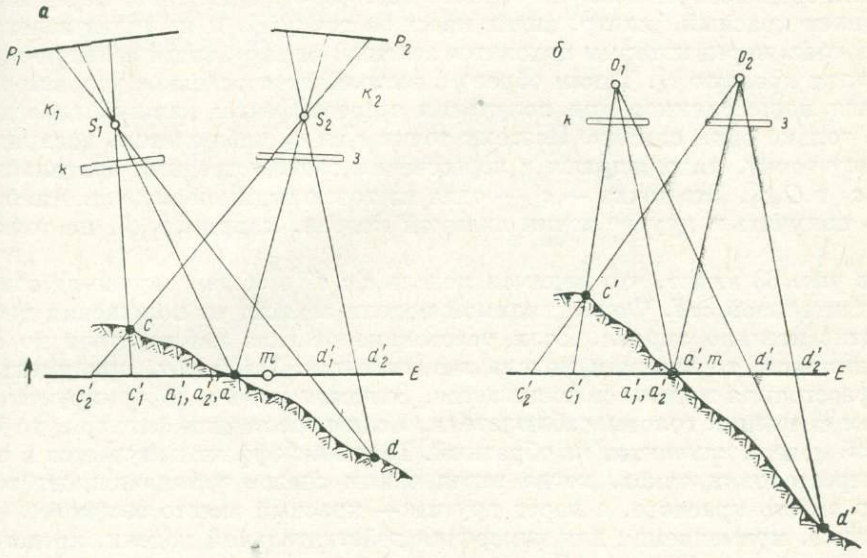


Рис. 33

Достоинством способа являются простая наблюдательная система и возможность одновременного рассматривания модели и оригинала составляемой карты. Однако увеличение наблюдательной системы недостаточное — меньше 1×. Условия наблюдения неблагоприятные. Форма модели меняется и зависит от положения головы наблюдателя, так как центрами проекции служат узловые точки глаз. Вследствие этого точность измерений низкая. Способ не нашел широкого применения.

Анаглифический способ. Анаглифический способ применяется для наблюдения и измерения модели. Сущность способа состоит в рассматривании совмещенных изображений пары снимков, окрашенных в дополнительные цвета. Для наблюдения используются цветные очки, позволяющие каждым глазом видеть только одно из совмещенных изображений. Благодаря этому наблюдатель воспринимает одноцветную пространственную модель сфотографированного объекта. Модель измеряется с помощью марки.

Пусть снимки P_1 и P_2 (рис. 33, *а*) проектируются на экран E с помощью камер K_1 и K_2. При этом изображения снимков накладываются друг на друга. Если снимки ориентированы, то каждая пара соответственных лучей пересекается, в результате чего образуется модель.

Чтобы видеть модель, перед одним снимком устанавливают красный фильтр *к*, перед другим — зеленый *з*. Вследствие этого изображения на экране окрашиваются в красный и зеленый цвета. Окрашенные изображения наблюдают через очки с фильтрами. Эти фильтры изготовлены так, чтобы каждый из них пропускал лучи, исходящие только от одного изображения, и поглощал лучи, идущие от другого. Зеленый фильтр пропускает зеленые лучи и задерживает красные. Поэтому, рассматривая через зеленый фильтр красную и зеленую точки, находящиеся на неосвещенном экране, мы видим только зеленую точку.

Наблюдая изображения на экране (рис. 33, *б*), один глаз, перед которым установлен красный фильтр, видит красную точку c'_1, и не видит зеленую c'_2. Другой глаз, перед которым находится зеленый фильтр, видит зеленую точку c'_2 и не видит красную c'_1. Таким образом, выполняется основное условие рассматривания пары снимков при получении стереоэффекта: каждый глаз должен видеть только один снимок. Поэтому точки c'_1 и c'_2 наблюдатель воспринимает как одну точку, находящуюся в пересечении соответственных зрительных лучей $O_1c'_1$ и $O_2c'_2$. Эта точка — c' — одна из точек видимой модели. Аналогично можно получить и другие точки видимой модели, например d', по точкам d'_1, и d''_2.

Из рис. 33 видно, что видимая модель $c'a'd'$ в общем случае не совпадает с действительной *cad*. Форма видимой модели зависит от положения наблюдателя относительно экрана. Если расстояние от глаз наблюдателя до экрана увеличивается, то видимая модель вытягивается. Наоборот, при уменьшении этого расстояния модель сплющивается. Видимая модель деформируется и при боковом смещении головы наблюдателя. Если переставить фильтры, то рельеф видимой модели изменится на обратный. Такой же эффект получается в результате перестановки очков, когда перед одним глазом устанавливают зеленый фильтр вместо красного, а перед другим — красный вместо зеленого.

Марка, применяемая для измерения действительной модели, представляет собой светящуюся точку *m*. Она находится на экране измерительного столика и наблюдается как левым, так и правым глазом. Перемещая измерительный столик на планшете и изменяя высоту экрана, можно совместить марку с любой точкой действительной модели, например с точкой *a*. Для этого достаточно навести марку на соответствующую точку видимой модели. С помощью измерительного столика можно спроектировать на планшет контуры и горизонтали модели, т. е. составить карту.

Вследствие неизбежных погрешностей изготовления фильтров через левую (правую) половину очков видно, хотя и слабо, и правое (левое) изображение на экране. Это изображение называется левым (правым) м е ш а ю щ и м и з о б р а ж е н и е м.

Отношение между яркостью мешающего и основного изображений называется м е ш а ю щ и м ф а к т о р о м. Если светофильтры подобраны хорошо, то мешающий фактор меньше 10%.

Согласно исследованиям Н. А. Соколовой яркость изображения, наблюдаемого даже через наиболее прозрачные светофильтры, в четыре раза меньше яркости изображения, видимого без фильтров. Эти данные характеризуют колоссальные потери света при использовании анаглифического способа. Кроме того, установлено, что точность измерения заметно снижается, если яркость одного изображения превышает яркость другого в три раза и больше.

Анаглифический способ, как способ наблюдения спроектированных изображений, предложен д'Альмейда в 1858 г.

Дальтоники с ярко выраженной потерей отличия цветов, особенно красного и зеленого, затрудняются, а иногда и не могут получить пространственное восприятие анаглифических изображений.

Способ анаглифов не применим для наблюдения цветных снимков.

Точность наведения марки. Пусть наблюдатель наводит марку m на точку a снимка, рассматривая эти два объекта невооруженным глазом (рис. 34). Наблюдатель заметит несовмещение ma только в случае, если оно рассматривается глазом под углом, превышающим остроту монокулярного зрения $\Delta\gamma$. Поэтому ошибку наведения марки можно найти по формуле

$$m_x = D\,\Delta\gamma,$$

где D — расстояние наилучшего зрения.

При $D = 250$ мм и $\Delta\gamma = 45''$ получим $m_x = 55$ мкм. С такой точностью можно навести марку на точку при невооруженном монокулярном зрении.

Если снимок измеряется с помощью монокомпаратора с увеличением v, то ошибка наведения марки будет меньше

$$m_x = D\,\frac{\Delta\gamma}{v}. \qquad (3.10)$$

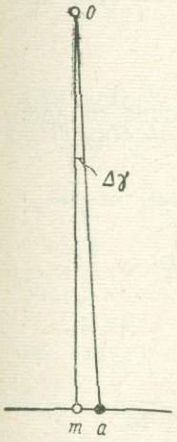


Рис. 34

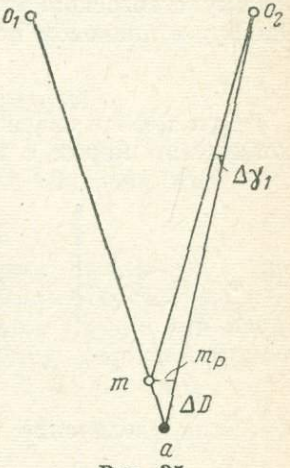


Рис. 35

Однако увеличение наблюдательной системы прибора не может быть беспредельным. Оно должно соответствовать разрешающей силе объектива аэрофотоаппарата

$$\varphi'' = \frac{140''}{d},$$

где d — диаметр рабочего отверстия объектива (мм).

Целесообразно потребовать, чтобы произведение $v\varphi''$ было равно остроте монокулярного зрения $\Delta\gamma$

$$v\varphi'' = \Delta\gamma,$$

отсюда

$$v = \frac{\Delta\gamma}{\varphi''} = \frac{d}{140}\,\Delta\gamma. \qquad (3.11)$$

Пусть $d = 30$ мм, $\Delta\gamma = 45''$. Тогда $v \approx 10^{\times}$.

Предпочтение следует отдать наблюдательной системе с переменным увеличением. Она позволяет устанавливать оптимальное увеличение в зависимости от выполняемого на приборе процесса. Например, при юстировке прибора желательно иметь увеличение порядка $20^{\times}$, а при измерении координат отдельных точек снимка — $10^{\times}$. Для съемки рельефа и контуров важно иметь достаточно большое поле зрения наблюдательной системы. Это условие выполняется при увеличении от 4 до $8^{\times}$.

Стереоскопические приборы позволяют измерять снимки и модель с большей точностью, чем монокулярные. Пусть наблюдатель совмещает марку m с точкой модели a (рис. 35). Разность удалений ΔD точек m и a относительно наблюдателя может быть замечена, как известно, только в случае, когда

разность параллактических углов этих точек больше остроты стереоскопического зрения $\Delta\gamma_1$. Величины ΔD и $\Delta\gamma_1$ связаны между собой уравнением (3.4)

$$\Delta D = -D^2 \frac{\Delta\gamma_1}{b_г}$$

где D — расстояние наилучшего зрения, $b_г$ — глазной базис наблюдателя.

Подставив в это выражение $D = 250$ мм, $b_г = 65$ мм и $\Delta\gamma_1 = 30''$, получим ошибку стереоскопического совмещения марки по глубине ($\Delta D = 0{,}14$ мм). Ошибку в плановом положении марки можно подсчитать так:

$$m_p = D\,\Delta\gamma_1.$$

При тех же значениях D и $\Delta\gamma_1$, получим $m_p = 36$ мкм. Такова точность совмещения марки с точкой при невооруженном бинокулярном зрении.

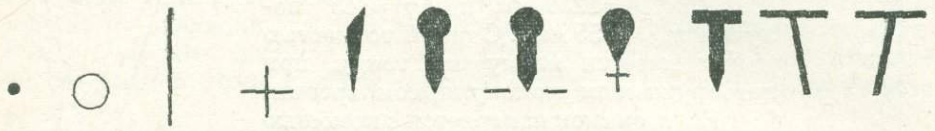


Рис. 36

Если увеличение наблюдательной системы прибора равно v, то

$$\Delta D = -D^2 \frac{\Delta\gamma_1}{b_г v}, \tag{3.12}$$

$$m_p = D \frac{\Delta\gamma_1}{v}. \tag{3.13}$$

Например, при $v = 10^{\times}$ будем иметь $\Delta D = 14$ мкм и $m_p = 3{,}6$ мкм.

Таким образом, точность наведения марки на точку зависит от остроты зрения и увеличения наблюдательной системы. Заметное влияние на точность визирования оказывают и другие параметры: форма и размеры измерительных марок, контраст их относительно наблюдаемого изображения, освещенность снимков или модели, степень утомления зрения и т. д.

В фотограмметрических приборах применяются различные марки (рис. 36). Стремление различать марку одинаково отчетливо на различных деталях снимка привело к созданию светящейся цветной марки. Такая марка была применена проф. А. Скиридовым в стереоуниверсале и получила широкое распространение в фотограмметрии.

В способе мнимой марки используются, как известно, две марки. Они должны быть одинаковыми по форме и размерам. Разность размеров марок не должна превышать 10%, в противном случае точность визирования заметно падает.

Детальные исследования измерительных марок выполнены О. А. Герасимовой [5].

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

НАЗЕМНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

Глава 4

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМУЛЫ НАЗЕМНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

§ 13. КООРДИНАТЫ ТОЧКИ ОБЪЕКТА И ЕЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА СНИМКАХ

В наземной фотограмметрии положение точки объекта определяют в пространственной прямоугольной системе координат $SXYZ$ или $OX_\Gamma Y_\Gamma Z_\Gamma$ (рис. 37).

Система координат $SXYZ$ — правая, она используется обычно при изучении взаимного расположения точек объекта и называется фотограмметрической. Начало и направления координатных осей этой системы могут быть выбраны произвольно. В частном случае начало совмещают с точкой фотографирования S, а плоскость XY устанавливают горизонтально.

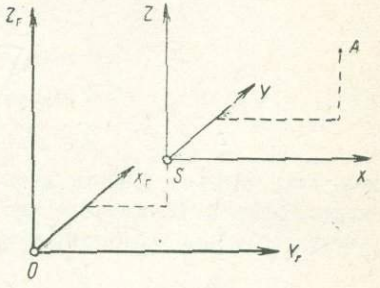


Рис. 37

Система координат $OX_\Gamma Y_\Gamma Z_\Gamma$ — левая, применяется при картографировании местности и называется геодезической. Плоскость $X_\Gamma Y_\Gamma$ этой системы всегда горизонтальна, ось X_Γ направлена на север, а ось Y_Γ — на восток.

Пусть начало фотограмметрической системы координат находится в точке фотографирования S, а координатные оси X и Y параллельны осям Y_Γ и X_Γ соответственно. Тогда геодезические координаты точки A местности можно найти по простым формулам

$$\left.\begin{aligned} X_\Gamma &= X_{\Gamma S} + Y \\ Y_\Gamma &= Y_{\Gamma S} + X \\ Z_\Gamma &= Z_{\Gamma S} + Z \end{aligned}\right\}, \qquad (4.1)$$

где $X_{\Gamma S}$, $Y_{\Gamma S}$, $Z_{\Gamma S}$ — геодезические координаты точки фотографирования S, а X, Y, Z — фотограмметрические координаты точки местности.

Для определения положения точки на снимке служит прямоугольная плоская система координат $o'xz$ (рис. 38). Начало этой системы находится в пересечении o' прямых, проходящих через координатные метки *1* и *2*, *3* и *4*, а ось x совпадает с первой из этих прямых. Вследствие погрешностей изготовления и юстировки фотокамеры начало координат o' не совпадает с главной точкой снимка o, а ось z не проходит через координатные метки *3* и *4*.

Координаты главной точки снимка обозначим через x_0 и z_0.

Пусть x_1, z_1 и x_2, z_2 — координаты соответственных точек a_1 и a_2 на стереопаре P_1—P_2 (рис. 39). Разность абсцисс соответственных точек называется продольным параллаксом, а разность аппликат — поперечным параллаксом

$$\left.\begin{aligned} p &= x_1 - x_2 \\ q &= z_1 - z_2 \end{aligned}\right\}. \tag{4.2}$$

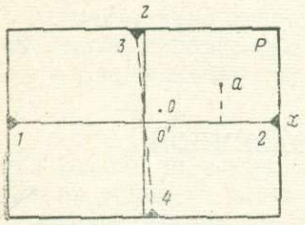


Рис. 38

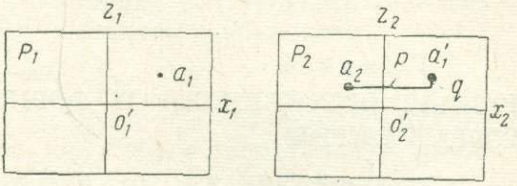


Рис. 39

Кроме плоской системы координат для определения положения точки снимка используется и пространственная $SXYZ$ (рис. 40). Обозначим координаты точки a снимка P в этой системе через X', Y', Z'.

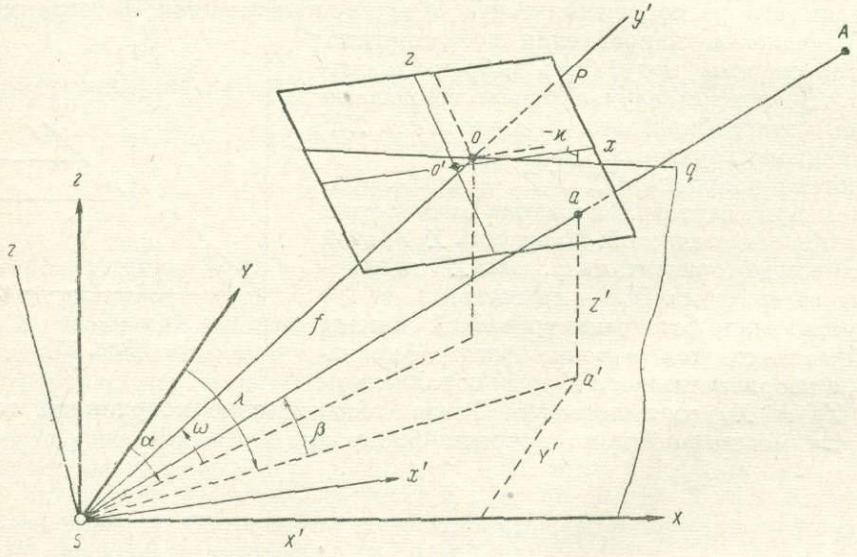


Рис. 40

Выразим пространственные координаты точки снимка через плоские. Для этого введем вспомогательную систему координат $Sx'y'z'$, начало которой находится в центре проекции, оси x' и z' параллельны соответствующим осям плоской системы координат $o'xz$, а ось y' совпадает с главным лучом So. Тогда координатами точки a в системе $Sx'y'z'$ будут

$$\left.\begin{aligned} x' &= x - x_0 \\ y' &= f \\ z' &= z - z_0 \end{aligned}\right\} \tag{4.3}$$

и по формулам преобразования координат, известным из аналитической геометрии, получим

$$\left.\begin{aligned} X' &= a_1(x-x_0)+a_2f+a_3(z-z_0)\\ Y' &= b_1(x-x_0)+b_2f+b_3(z-z_0)\\ Z' &= c_1(x-x_0)+c_2f+c_3(z-z_0) \end{aligned}\right\}, \tag{4.4}$$

где a_1, a_2, a_3 — косинусы углов, составленных осью X с осями x', y', z' (табл. 1); b_1, b_2, b_3 — косинусы углов, составленных осью Y с осями x', y', z'; c_1, c_2, c_3 — косинусы углов, составленных осью Z осями x', y', z'; f — фокусное расстояние фотокамеры.

Таблица 1

Координатные оси	x'	y'	z'
X	a_1	a_2	a_3
Y	b_1	b_2	b_3
Z	c_1	c_2	c_3

Косинусы a_i, b_i, c_i называются направляющими косинусами. Они связаны между собой шестью независимыми уравнениями

$$\left.\begin{aligned} a_1^2+a_2^2+a_3^2=1; \quad a_1b_1+a_2b_2+a_3b_3=0\\ b_1^2+b_2^2+b_3^2=1; \quad b_1c_1+b_2c_2+b_3c_3=0\\ c_1^2+c_2^2+c_3^2=1 \quad\quad c_1a_1+c_2a_2+c_3a_3=0 \end{aligned}\right\}. \tag{4.5}$$

Отсюда следует, что из девяти косинусов независимы только три или, что все равно, девять косинусов зависят от трех параметров. Для определения направляющих косинусов необходимо знать угловые элементы внешнего ориентирования снимка.

§ 14. ЭЛЕМЕНТЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ СНИМКОВ

Элементами ориентирования снимка называются величины, определяющие положение снимка в момент фотографирования (выдержки). Эти элементы разделяются на две группы: элементы внутреннего ориентирования и элементы внешнего ориентирования.

Элементы внутреннего ориентирования определяют положение центра проекции относительно снимка. К ним относятся фокусное расстояние f фотокамеры и координаты x_0 и z_0 главной точки o (см. рис. 40). Эти величины позволяют восстановить по снимку связку лучей, существовавшую в момент фотографирования.

Элементы внешнего ориентирования определяют положение связки лучей в момент фотографирования. В качестве таких элементов выберем следующие величины: координаты точки фотографирования $X_{г\,S}$, $Y_{г\,S}$, $Z_{г\,S}$, дирекционный угол α оптической оси камеры, угол наклона ω оптической оси камеры и угол поворота $\varkappa$ снимка (см. рис. 37 и 40). Угол $\varkappa$ лежит в плоскости снимка и составлен координатной осью x с главной горизонталью oq, которая получается как след плоскости, проходящей через оптическую ось So фотокамеры и координатную ось X.

Таким образом, положение одиночного снимка будет определено, если известны девять элементов ориентирования: три элемента внутреннего ориентирования и шесть элементов внешнего ориентирования.

Пара снимков, полученных различными фотокамерами, имеет 18 элементов ориентирования: 6 элементов внутреннего ориентирования — фокусные расстояния камер и координаты главных точек снимков, и 12 элементов внешнего ориентирования — координаты точек фотографирования, дирекционные углы и углы наклона оптических осей фотокамер и углы поворота снимков.

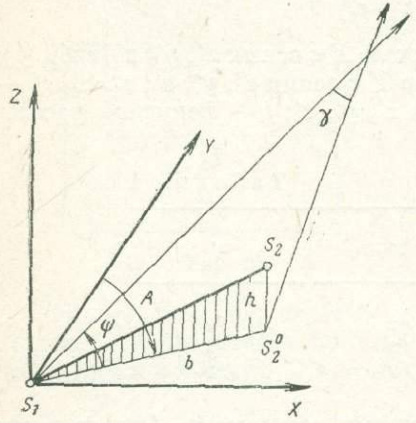


Рис. 41

В фототопографии съемка с концов базиса производится обычно одной и той же камерой. Поэтому элементы внутреннего ориентирования левого и правого снимков стереопары можно считать одинаковыми.

На практике обычно применяют другую систему элементов внешнего ориентирования пары снимков, исключающую необходимость определения координат правого конца базиса. В эту систему входят следующие величины: X_{rS}, Y_{rS}, Z_{rS} — координаты левой точки фотографирования, A — дирекционный угол базиса S_1S_2, ψ — горизонтальный угол в левом конце базиса, образованный базисом и осью камеры, ω_1 — угол наклона оптической оси камеры в левом конце базиса, $\varkappa_1$ — угол поворота левого снимка, b — горизонтальное проложение базиса, $h = S_2^0S_2$ — превышение правого конца базиса относительно левого, γ — угол конвергенции (горизонтальный угол между направлениями оптической оси в концах базиса), ω_2 — угол наклона оптической оси фотокамеры в правом конце базиса, $\varkappa_2$ — угол поворота правого снимка (см. рис. 37, 40 и 41).

§ 15. ОСНОВНЫЕ СЛУЧАИ СТЕРЕОСЪЕМКИ

В зависимости от значений элементов ориентирования снимков принято различать следующие основные случаи наземной стереосъемки: общий, конвергентный (рис. 42, *а*), параллельный (рис. 42, *б*, *в*) и нормальный (рис. 42, *г*).

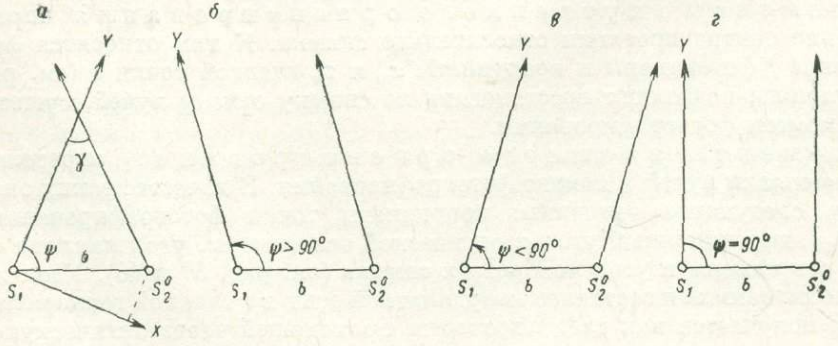


Рис. 42

В общем случае съемки каждый из элементов ориентирования может иметь любое значение. В остальных случаях углы поворота снимков и углы наклона оптической оси камеры равны нулю, т. е. съемка производится при горизонтальном положении оптической оси камеры.

В конвергентном случае съемки направления оптической оси камеры пересекаются ($\gamma \neq 0$).

В параллельном случае съемки направления оптической оси камеры взаимно параллельны ($\gamma = 0$).

В нормальном случае съемки направления оптической оси камеры перпендикулярны базису ($\psi = 90°$, $\gamma = 0$).

Общий случай съемки на практике применяется редко, так как обработка снимков, имеющих произвольные значения элементов ориентирования, сложна. Обычно используются последние три случая съемки, причем наибольшее распространение получил нормальный случай как наиболее простой.

§ 16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЯЮЩИХ КОСИНУСОВ

На рис. 43 представлены две системы координат: фотограмметрическая $SXYZ$ и вспомогательная $Sx'y'z'$, а также угловые элементы внешнего ориентирования снимка — α, ω и $\varkappa$.

Для определения направляющих косинусов произведем три поворота системы координат $Sx'y'z'$: 1) на угол $\varkappa$ вокруг оси y', 2) на угол ω вокруг оси x'', 3) на угол α вокруг оси Z.

В результате первого поворота система $Sx'y'z'$ займет положение $Sx''y''z''$. Этому повороту соответствует матрица

$$A_\varkappa = \begin{pmatrix} \cos\varkappa & 0 & -\sin\varkappa \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varkappa & 0 & \cos\varkappa \end{pmatrix},$$

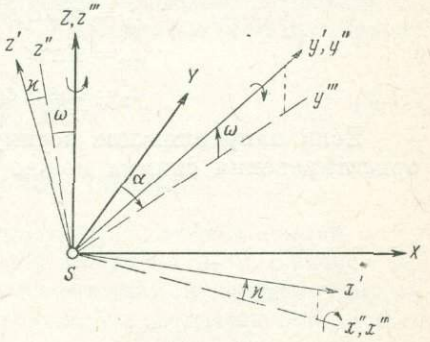


Рис. 43

элементы которой представляют собой косинусы, составленные осями x'', y'', z'' с осями x', y' и z'.

После второго поворота система $Sx''y''z''$ займет положение $Sx'''y'''z'''$. Этот поворот определяет матрица

$$A_\omega = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix},$$

элементы которой являются косинусами углов между осями x''', y''', z''' и x'', y'', z''.

В результате третьего поворота вспомогательная система координат совместится с системой $SXYZ$. Этому повороту соответствует матрица

$$A_\alpha = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

элементами которой служат косинусы углов между осями X, Y, Z и x''', y''', z'''.

Перемножив матрицы A_α, A_ω и $A_\varkappa$, получим матрицу $A_{\alpha\omega\varkappa}$, определяющую положение вспомогательной системы координат $Sx'y'z'$ относительно фотограмметрической $SXYZ$. Составляющие этой матрицы — направляющие косинусы a_i, b_i, c_i (см. табл. 1)

$$A_{\alpha\omega\varkappa} = A_\alpha A_\omega A_\varkappa = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}.$$

В результате перемножения матриц найдем

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= \cos\alpha\cos\varkappa - \sin\alpha\sin\omega\sin\varkappa \\ a_2 &= \sin\alpha\cos\omega \\ a_3 &= -\cos\alpha\sin\varkappa - \sin\alpha\sin\omega\cos\varkappa \\ b_1 &= -\sin\alpha\cos\varkappa - \cos\alpha\sin\omega\sin\varkappa \\ b_2 &= \cos\alpha\cos\omega \\ b_3 &= \sin\alpha\sin\varkappa - \cos\alpha\sin\omega\cos\varkappa \\ c_1 &= \cos\omega\sin\varkappa \\ c_2 &= \sin\omega \\ c_3 &= \cos\omega\cos\varkappa \end{aligned}\right\}. \qquad (4.6)$$

Если направляющие косинусы известны, то угловые элементы внешнего ориентирования снимка можно вычислить по формулам

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg}\alpha &= \frac{a_2}{b_2} \\ \sin\omega &= c_2 \\ \operatorname{tg}\varkappa &= \frac{c_1}{c_3} \end{aligned}\right\}, \qquad (4.7)$$

которые вытекают из (4.6).

Когда углы α, ω и $\varkappa$ малы, их тригонометрические функции можно разложить в ряды, сохраняя члены первого и второго порядков малости. В этом случае вместо (4.6) напишем

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= 1 - \frac{1}{2}\alpha^2 - \frac{1}{2}\varkappa^2 \\ a_2 &= \alpha \\ a_3 &= -\varkappa - \alpha\omega \\ b_1 &= -\alpha - \omega\varkappa \\ b_2 &= 1 - \frac{1}{2}\alpha^2 - \frac{1}{2}\omega^2 \\ b_3 &= -\omega + \alpha\varkappa \\ c_1 &= \varkappa \\ c_2 &= \omega \\ c_3 &= 1 - \frac{1}{2}\omega^2 - \frac{1}{2}\varkappa^2 \end{aligned}\right\}. \qquad (4.8)$$

§ 17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ УГЛОВ ПО СНИМКУ

Пусть с точки S получен снимок P (см. рис. 40). Точка a снимка — изображение точки A объекта.

Найдем горизонтальный угол λ и вертикальный угол β, определяющие положение направления SA в системе координат $SXYZ$.

Из рисунка следует, что

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg}\lambda &= \frac{X'}{Y'} \\ \operatorname{tg}\beta &= \frac{Z'}{\sqrt{X'^2+Y'^2}} \end{aligned}\right\}, \tag{4.9}$$

где X', Y', Z' — пространственные координаты точки a.

Для определения по этим формулам горизонтального и вертикального углов направления SA необходимо измерить плоские координаты x, y точки a снимка, вычислить направляющие косинусы по формулам (4.6) и пространственные координаты точки a по формулам (4.4).

Если снимок вертикальный ($\omega = 0$), а координаты главной точки x_0, z_0 и углы α, $\varkappa$ равны нулю, то $X' = x$, $Y' = f$, $Z' = z$ и формулы (4.9) принимают вид

$$\operatorname{tg}\lambda = \frac{x}{f}, \quad \operatorname{tg}\beta = \frac{z}{\sqrt{f^2+x^2}}. \tag{4.10}$$

§ 18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧЕК ОБЪЕКТА

Разберем несколько наиболее часто применяющихся случаев съемки.

Общая съемка. Пусть с концов базиса S_1S_2 получена пара снимков P_1 и P_2 (рис. 44). Изображения точки A объекта на снимках обозначим через a_1 и a_2. Найдем координаты точки A, полагая, что элементы ориентирования снимков известны.

Величина и направление базиса фотографирования определяются вектором $\overline{R_0}$ с началом в точке S_1, положение точки A — вектором $\overline{R}$, а положение точек a_1 и a_2 — векторами $\overline{R'_1}$ и $\overline{R'_2}$.

Векторы $\overline{R}$ и $\overline{R'_1}$ коллинеарны:

$$\overline{R} = N\overline{R'_1}, \tag{4.11}$$

где N — скаляр. Векторы $S_2A = \overline{R} - \overline{R_0}$ и $\overline{R'_2}$ также коллинеарны, т. е.

$$(\overline{R} - \overline{R_0})\,\overline{R'_2} = 0,$$

или

$$\overline{R}\,\overline{R'_2} = \overline{R_0}\,\overline{R'_2}.$$

Подставив в это выражение величину $\overline{R}$ из (4.11), получим

$$N(\overline{R'_1}\,\overline{R'_2}) = \overline{R_0}\,\overline{R'_2}. \tag{4.12}$$

Выражения (4.11) и (4.12) представляют собой формулы математической зависимости для пары снимков в векторной форме. Чтобы выразить эти

зависимости в координатной форме, спроектируем векторы (4.11) и (4.12) на координатные оси X, Y, Z. Тогда получим

$$\left.\begin{aligned} X = NX_1'; \quad Y = NY_1'; \quad Z = NZ_1' \\ N = \frac{Y_0Z_2' - Z_0Y_2'}{Y_1'Z_2' - Z_1'Y_2'} = \frac{Z_0X_2' - X_0Z_2'}{Z_1'X_2' - X_1'Z_2'} = \frac{X_0Y_2' - Y_0X_2'}{X_1'Y_2' - Y_1'X_2'} \end{aligned}\right\}, \tag{4.13}$$

где X_1', Y_1', Z_1' — координаты точки a_1 в системе S_1XYZ, X_2', Y_2', Z_2' — координаты точки a_2 в системе S_2XYZ, параллельной системе S_1XYZ, X_0, Y_0, Z_0 — координаты точки S_2 в системе S_1XYZ.

Итак, в общем случае съемки для определения координат точки объекта по формулам (4.13) следует измерить координаты изображений этой точки на левом и правом снимках, вычислить направляющие косинусы по формулам (4.6) и пространственные координаты точек снимков по формулам (4.4).

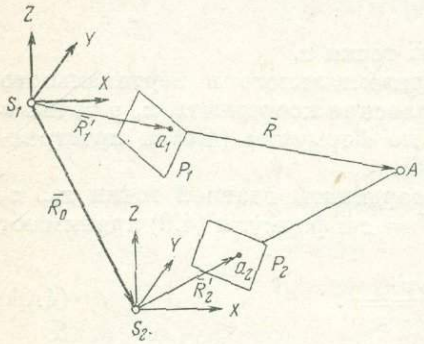


Рис. 44

Конвергентная съемка (см. рис. 42, *а*). В этом случае элементы α_1, ω_1, $\varkappa_1$, ω_2 и $\varkappa_2$ равны нулю, $\alpha_2 = -\gamma$. Поэтому, как следует из (4.6), направляющие косинусы для левого снимка $a_1 = b_2 = c_3 = 1$, а остальные равны нулю и для правого снимка

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos\gamma; & b_1 &= \sin\gamma; & c_1 &= 0; \\ a_2 &= -\sin\gamma; & b_2 &= \cos\gamma; & c_2 &= 0; \\ a_3 &= 0; & b_3 &= 0; & c_3 &= 1. \end{aligned}$$

Полагая, что координаты главной точки снимка равны нулю, по (4.4) получаем

$$X_1' = x_1; \quad X_2' = x_2\cos\gamma - f\sin\gamma;$$

$$Y_1' = f; \quad Y_2' = x_2\sin\gamma + f\cos\gamma;$$

$$Z_1' = z_1; \quad Z_2' = z_2.$$

Теперь вычислим величину N по (4.13)

$$N = \frac{X_0Y_2' - Y_0X_2'}{X_1'Y_2' - Y_1'X_2'}.$$

Подставим сюда $X_0 = b\sin\varphi$, $Y_0 = b\cos\psi$ и значения пространственных координат соответственных точек. Получим

$$N = b\frac{f\sin(\psi+\gamma) - x_2\cos(\psi+\gamma)}{(f^2 + x_1x_2)\sin\gamma + fp\cos\gamma}. \tag{4.14}$$

где p — продольный параллакс.

В соответствии с (4.13) найдем

$$X = Nx_1; \quad Y = Nf; \quad Z = Nz_1. \tag{4.15}$$

Параллельная съемка (см. рис. 42, *б*, *в*). Формулы для данного случая съемки легко получаются из (4.14) и (4.15), если учесть, что $\gamma = 0$

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{b}{p} x_1 \left(\sin\psi - \frac{x_2}{f}\cos\psi\right) = Y\frac{x_1}{f} \\ Y &= \frac{b}{p} f \left(\sin\psi - \frac{x_2}{f}\cos\psi\right) \\ Z &= \frac{b}{p} z_1 \left(\sin\psi - \frac{x_2}{f}\cos\psi\right) = Y\frac{z_1}{f} \end{aligned}\right\}. \qquad (4.16)$$

Нормальная съемка (см. рис. 42, *г*). Подставив в (4.16) $\psi = 90°$, найдем

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{b}{p} x_1 = Y\frac{x_1}{f} \\ Y &= \frac{b}{p} f \\ Z &= \frac{b}{p} z_1 = Y\frac{z_1}{f} \end{aligned}\right\}. \qquad (4.17)$$

§ 19. ФОРМУЛЫ СВЯЗИ МЕЖДУ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМИ КООРДИНАТАМИ

Переход от фотограмметрических координат точки объекта, полученных в общем случае съемки по формулам (4.13), к геодезическим координатам производится по простым формулам (4.1). При этом вводится поправка за кривизну Земли и рефракцию, если объект находится на значительном расстоянии от точки фотографирования.

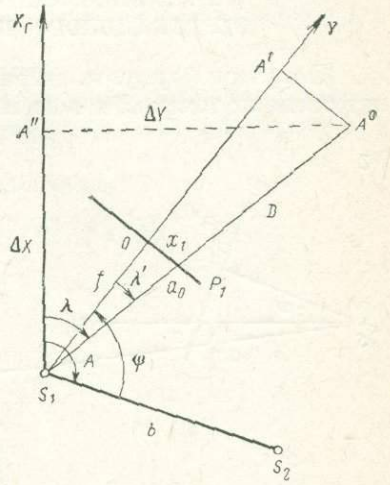


Рис. 45

Выведем формулы связи между геодезическими и фотограмметрическими координатами для остальных случаев съемки.

На рис. 45 представлены: b — проекция базиса фотографирования на горизонтальную плоскость, проходящую через левый конец базиса S_1; P_1 — левый снимок; A^0 — проекция определяемой точки объекта; $S_1X_г$ — прямая, параллельная оси $X_г$ геодезической системы координат; Y — ось фотограмметрической системы координат, совпадающая с проекцией оптической оси фотокамеры.

Координаты точки A в геодезической системе можно написать

$$\left.\begin{aligned} X_г &= X_{г S_1} + \Delta X \\ Y_г &= Y_{г S_1} + \Delta Y \\ Z_г &= Z_{г S_1} + \Delta Z \end{aligned}\right\}, \qquad (4.18)$$

где $X_{г S_1}$, $Y_{г S_1}$, $Z_{г S_1}$ — геодезические координаты точки S_1; ΔX, ΔY, ΔZ — приращения геодезических координат точки A относительно точки S_1.

Обозначив расстояние S_1A^0 через D и дирекционный угол направления S_1A через λ, получим

$$\left.\begin{aligned} \Delta X &= D\cos\lambda \\ \Delta Y &= D\sin\lambda \\ \Delta Z &= Z + (k+r) \end{aligned}\right\}, \qquad (4.19)$$

где Z — фотограмметрическая координата точки A, $k + r$ — поправка за кривизну Земли и рефракцию.

Из рисунка следует

$$\left.\begin{aligned} \lambda &= A - \psi + \lambda' \\ \operatorname{tg}\lambda' &= \frac{x_1}{f} \\ D &= \frac{Y}{\cos\lambda'} = \frac{X}{\sin\lambda'} \end{aligned}\right\}. \tag{4.20}$$

§ 20. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ТОЧЕК ВЕРТИКАЛЬНОГО И НАКЛОННОГО СНИМКОВ

Получим формулы, выражающие зависимость между координатами соответственных точек a^0 и a на вертикальном P^0 и наклонном P снимках (рис. 46). При этом будем считать, что снимки P^0 и P имеют общий центр проекции S. Такие формулы необходимы, например, для исправления измеренных координат точки снимка за *уклонения действительных значений* угловых элементов внешнего ориентирования от заданных.

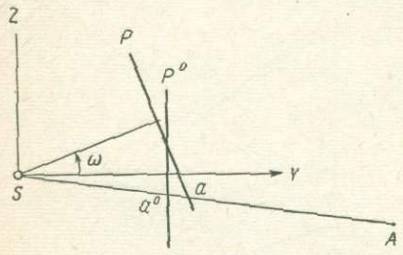


Рис. 46

Обозначим плоские координаты точки a^0 через x^0 и z^0, а точки a — через x и z.

Точки S, A и a лежат на одной прямой. Запишем их координаты в системе $SXYZ$

$$S(0,\ 0,\ 0);\quad A(X,\ Y,\ Z);\quad a(X',\ Y',\ Z')$$

и составим уравнение прямой, проходящей через эти точки

$$\frac{X'}{X} = \frac{Y'}{Y} = \frac{Z'}{Z}.$$

Отсюда

$$X = Y\frac{X'}{Y'};\quad Z = Y\frac{Z'}{Y'}. \tag{4.21}$$

Координаты X', Y', Z' *вычисляются по формулам* (4.4).

Для вертикального снимка ($\alpha = \omega = \varkappa = 0$) равенства (4.21) принимают такой вид:

$$X = Y\frac{x^0}{f};\quad Z = Y\frac{z^0}{f}. \tag{4.22}$$

Сравнивая (4.22) и (4.21), получаем зависимость между координатами соответственных точек вертикального и наклонного снимков

$$x^0 = f\frac{X'}{Y'};\quad z^0 = f\frac{Z'}{Y'}. \tag{4.23}$$

Эти формулы действительны при любых значениях элементов ориентирования снимков. Если углы α, ω и $\varkappa$ малы, то (4.23) можно представить так:

$$\left.\begin{aligned} x^0 &= x + \left(f + \frac{x^2}{f}\right)\alpha + \frac{xz}{f}\omega - z\varkappa \\ z^0 &= z + \frac{xz}{f}\alpha + \left(f + \frac{z^2}{f}\right)\omega + x\varkappa \end{aligned}\right\}. \tag{4.24}$$

§ 21. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ТОЧЕК СНИМКА И ОБЪЕКТА

Выше получены формулы, позволяющие найти координаты точки объекта по координатам точек стереопары. В некоторых случаях возникает необходимость решить обратную задачу, т. е. определить координаты точки одиночного снимка или координаты точек стереопары по данным координатам точки объекта и элементам ориентирования снимков.

Такая задача решается, например, при создании макетных снимков, предложенных Г. А. Ошурковым для испытания стереофотограмметрических приборов, а также при аналитическом моделировании снимков для исследования различных способов фототриангуляции.

Выведем формулы для решения подобных задач.

Пусть известны координаты X, Y, Z точки A в системе $SXYZ$ и элементы ориентирования снимка P (см. рис. 40). Найдем координаты x и z изображения a точки A на снимке.

Напишем координаты точек S, a и A в системе $Sx'y'z'$

$$S(0,\ 0,\ 0); \qquad a(x',\ y'=f,\ z); \qquad A(x'_A,\ y'_A,\ z'_A)$$

и составим уравнение прямой, проходящей через эти точки,

$$\frac{x'}{x'_A}=\frac{f}{y'_A}=\frac{z'}{z'_A}. \tag{a}$$

Согласно табл. 1

$$\left.\begin{aligned} x'_A &= a_1X+b_1Y+c_1Z \\ y'_A &= a_2X+b_2Y+c_2Z \\ z'_A &= a_3X+b_3Y+c_3Z \end{aligned}\right\}. \tag{4.25}$$

Подставляя значения x'_A, y'_A и z'_A в равенство (а) и учитывая (4.3), получим

$$\left.\begin{aligned} x-x_0 &= f\,\frac{a_1X+b_1Y+c_1Z}{a_2X+b_2Y+c_2Z} \\ z-z_0 &= f\,\frac{a_3X+b_3Y+c_3Z}{a_2X+b_2Y+c_2Z} \end{aligned}\right\}. \tag{4.26}$$

Если координаты X_S, Y_S, Z_S центра проекции S не равны нулю, то

$$\left.\begin{aligned} x-x_0 &= f\,\frac{a_1(X-X_S)+b_1(Y-Y_S)+c_1(Z-Z_S)}{a_2(X-X_S)+b_2(Y-Y_S)+c_2(Z-Z_S)} \\ z-z_0 &= f\,\frac{a_3(X-X_S)+b_3(Y-Y_S)+c_3(Z-Z_S)}{a_2(X-X_S)+b_2(Y-Y_S)+c_2(Z-Z_S)} \end{aligned}\right\}. \tag{4.27}$$

В конвергентном случае съемки по формулам (4.26) найдем

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= f\,\frac{X}{Y}; \quad z_1 = f\,\frac{Z}{Y} \\ x_2 &= f\,\frac{(X-b\sin\psi)\cos\gamma+(Y-b\cos\psi)\sin\gamma}{(Y-b\cos\psi)\cos\gamma-(X-b\sin\psi)\sin\gamma} \\ z_2 &= f\,\frac{Z-h}{(Y-b\cos\psi)\cos\gamma-(X-b\sin\psi)\sin\gamma} \end{aligned}\right\}. \tag{4.28}$$

Для параллельной съемки ($\gamma = 0$)

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= f\frac{X}{Y}; \quad z_1 = f\frac{Z}{Y} \\ x_2 &= f\frac{X - b\sin\psi}{Y - b\cos\psi}; \quad z_2 = f\frac{Z-h}{Y-b\cos\psi} \end{aligned}\right\}, \tag{4.29}$$

а в нормальном ($\psi = 90°$)

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= f\frac{X}{Y}; \quad z_1 = f\frac{Z}{Y} \\ x_2 &= f\frac{X-b}{Y}; \quad z_2 = f\frac{Z-h}{Y} \end{aligned}\right\}. \tag{4.30}$$

§ 22. ПРОДОЛЬНЫЙ И ПОПЕРЕЧНЫЙ ПАРАЛЛАКСЫ

Как известно, продольный и поперечный параллаксы представляют собой разности координат соответственных точек стереопары и находятся по формулам (4.2).

В общем случае съемки координаты соответственных точек стереопары можно найти по формулам (4.27), если известны координаты точки объекта и элементы ориентирования снимков.

Подставив значения x_1, x_2 и z_1, z_2 из (4.28) в (4.2), получим продольный и поперечный параллаксы для конвергентной съемки

$$\left.\begin{aligned} p &= f\left(\frac{X}{Y} + \frac{(X - b\sin\psi)\cos\gamma + (Y - b\cos\psi)\sin\gamma}{(X - b\sin\psi)\sin\gamma - (Y - b\cos\psi)\cos\gamma}\right) \\ q &= f\left(\frac{Z}{Y} + \frac{Z-h}{(X - b\sin\psi)\sin\gamma - (Y - b\cos\psi)\cos\gamma}\right) \end{aligned}\right\}. \tag{4.31}$$

Для параллельной съемки

$$\left.\begin{aligned} p &= f\left(\frac{X}{Y} - \frac{X - b\sin\psi}{Y - b\cos\psi}\right) \\ q &= f\left(\frac{Z}{Y} - \frac{Z-h}{Y-b\cos\psi}\right) \end{aligned}\right\}, \tag{4.32}$$

а для нормальной

$$\left.\begin{aligned} p &= \frac{b}{Y} f \\ q &= f\frac{h}{Y} \end{aligned}\right\}. \tag{4.33}$$

Если в нормальной съемке концы базиса находятся на одной высоте ($h = 0$) то поперечных параллаксов на стереопаре нет.

Получим другую формулу для поперечного параллакса. Из равенств (4.33) следует

$$q = \frac{p}{b} h$$

или, так как $h = b \operatorname{tg} \nu$,

$$q = p \operatorname{tg} \nu, \tag{4.34}$$

где ν — угол наклона базиса фотографирования.

Глава 5

КАМЕРАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

§ 23. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ КАМЕРАЛЬНЫХ РАБОТ

Камеральные работы выполняются с целью определения координат точек и составления плана или карты сфотографированного объекта, а также для решения других инженерных и научных задач по снимкам.

В наземной фотограмметрии применяются три метода обработки снимков: аналитический, графический и графомеханический.

При обработке снимков аналитическим методом сначала измеряют координаты и параллаксы соответственных точек стереопары, а затем, зная элементы ориентирования снимков, вычисляют координаты точек объекта по формулам, полученным в гл. 4.

До вычисления координат точек объекта необходимо убедиться в том, что действительные элементы внешнего ориентирования снимков равны заданным. Для этого пользуются контрольными направлениями, измеренными при фотографировании объекта (гл. 6). Если ошибки элементов внешнего ориентирования превышают допустимые пределы, то вводят поправки в измеренные координаты и параллаксы точек стереопары.

Аналитический метод является самым точным методом обработки стереопар, так как он позволяет решить уравнения связи между координатами точки объекта и координатами ее изображений с любой степенью точности. Благодаря этому можно полностью использовать ту точность, с которой получаются фотографические изображения объекта. Погрешность аналитического метода обусловлена главным образом ошибками полевых работ, искажениями снимков и ошибками измерения их.

Вследствие большого объема вычислительных работ аналитический метод применялся лишь в тех случаях, когда требовалось с высокой точностью определить координаты небольшого количества точек, например при определении координат ориентиров и целей. Внедрение в фотограмметрию электронных вычислительных машин значительно повысило производительность аналитического метода и расширило область его использования.

Графический метод основан на решении основных уравнений фотограмметрии путем графических построений и позволяет получить по снимкам плановое положение и высоты точек объекта.

До изобретения универсальных стереоприборов графический метод широко применялся для составления карт, а затем почти полностью вытеснен более совершенным методом — графомеханическим.

В графомеханическом методе одновременно выполняются измерение снимков и составление карты с помощью прибора, снабженного устройствами для наблюдения стереопары и решения основных уравнений фотограмметрии.

§ 24. СТЕРЕОКОМПАРАТОР

Стереокомпаратор служит для измерения плоских прямоугольных координат и параллаксов соответственных точек пары снимков.

Основные части прибора: станина C, общая каретка K, параллактические каретки K_p и K_q, левый и правый снимкодержатели D_1 и D_2, мостик M' и бинокулярный микроскоп M (рис. 47).

Общая каретка при помощи штурвала M_x перемещается по направляющим, прикрепленным к станине. Параллактические каретки находятся на общей каретке и смонтированы в правой части прибора. Каретка K_p параллактическим винтом M_p смещается параллельно направляющим общей каретки. Каретка K_q расположена на каретке K_p и параллактическим винтом M_q передвигается перпендикулярно направляющим общей каретки. Мостик M' прикреплен к станине. Бинокулярный микроскоп штурвалом M_z перемещается вдоль мостика перпендикулярно направляющим общей каретки. Снимкодержатель D_1 находится на общей каретке, а снимкодержатель D_2 — на параллактической

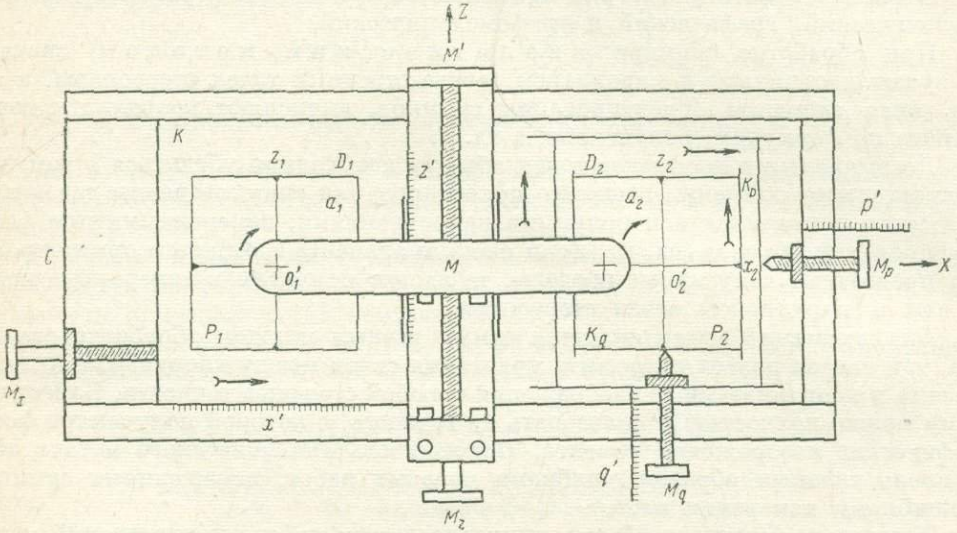


Рис. 47

каретке K_q. Каждый снимкодержатель можно поворачивать в его плоскости. Перемещения общей каретки и бинокулярного микроскопа учитываются по шкалам x' и z', а смещения параллактических кареток измеряются параллактическими винтами и отсчитываются по шкалам p' и q'.

Таким образом, снимки P_1 и P_2, установленные в снимкодержатели, передвигаются вдоль оси X прибора при помощи штурвала M_x. Бинокулярный микроскоп смещается вдоль оси Z прибора вращением штурвала M_z. Правый снимок перемещается относительно левого вдоль осей X и Z с помощью параллактических винтов. Эти четыре движения основных частей стереокомпаратора позволяют навести измерительные марки бинокулярного микроскопа на любую пару соответственных точек, например a_1 и a_2.

Снимки устанавливаются так, чтобы начала координат o_1' и o_2' приблизительно совместились с центрами снимкодержателей. Вращая снимкодержатели, добиваются параллельности координатных осей x снимков направляющим главной каретки. Затем наводят бинокулярный микроскоп на соответственные точки a_1 и a_2 и отсчитывают по шкалам. Координаты точки левого снимка и параллаксы получают как разности отсчетов и нуль-пунктов соответствующих шкал. Нуль-пункты шкал — отсчеты, сделанные после наведения бинокулярного микроскопа на начала координат o_1' и o_2'. Если начала координат на снимках не отмечены, то наблюдают координатные метки и нуль-пункты находят по отсчетам, полученным для этих меток.

В соответствии с представленной на рис. 47 схемой в различных странах изготовлен ряд моделей стереокомпараторов, отличающихся одна от другой только конструктивными особенностями.

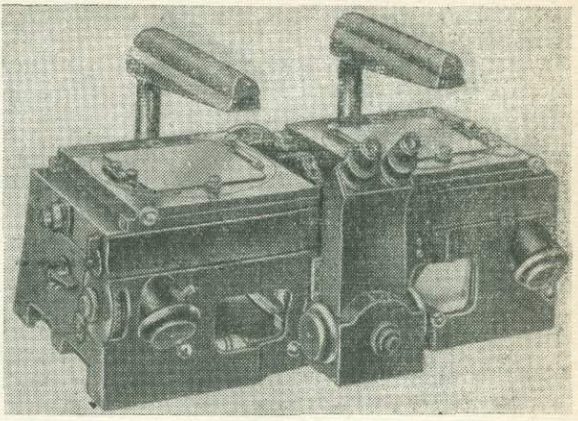


Рис. 48

В стереокомпараторе 1818 фирмы Цейсс (ГДР) бинокулярный микроскоп состоит из подвижной и неподвижной частей (рис. 48). Подвижная часть находится под общей кареткой, а неподвижная — выше этой каретки. Негативы и диапозитивы освещаются верхними, а контактные отпечатки — нижними лампами.

Общая каретка перемещается левым штурвалом, подвижная часть бинокулярного микроскопа — средним штурвалом перпендикулярно движению главной каретки. Эти перемещения служат для измерения координат точки левого снимка и учитываются по барабанам.

Левую каретку со снимкодержателем можно смещать относительно общей каретки влево и вправо от начального положения и закреплять в нужном положении.

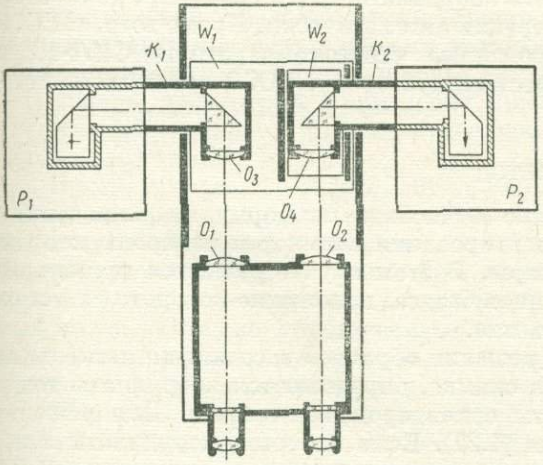


Рис. 49

Правая каретка со снимкодержателем перемещается правым штурвалом параллельно направляющим общей каретки. Это движение, соответствующее горизонтальному параллаксу, учитывается по барабану, расположенному между снимкодержателями.

Для измерения вертикальных параллаксов правая подвижная часть бинокулярного микроскопа перемещается при помощи шайбы относительно левой подвижной части вдоль оси Z прибора. Вертикальный параллакс отсчитывается по барабану.

Объективы O_1 и O_2 (рис. 49) с измерительными марками и окулярами, составляющие неподвижную часть наблюдательной системы, представляют собой отфокусированные на бесконечность трубы. Подвижную часть наблюдательной системы, включающую объективы O_3 и O_4, можно считать коллиматорами K_1 и K_2, в фокальных плоскостях которых находятся снимки P_1 и P_2. Между объективами O_1, O_2 и O_3, O_4 ход лучей всегда параллельный. Поэтому изображения снимков в плоскости измерительных марок получаются резкими,

независимо от перемещения кареток W_1 и W_2, с которыми соединены подвижные части наблюдательной системы.

Резкость изображения снимка достигается вращением кольца подвижного объектива, доступ к которому возможен через отверстие в передней части прибора.

В поле зрения окуляра видны две марки — верхняя и нижняя, а также четыре перекрестия. Верхняя марка предназначена для измерения наземных снимков, а нижняя — для аэроснимков. Перекрестия служат для юстировок микроскопа на заводе и для специальных измерений.

К правой части прибора можно прикрепить чертежный столик.

Основные характеристики стереокомпаратора 1818:

формат снимков	до 18×18 см
увеличение наблюдательной системы	$8^{\times}$
диаметр поля зрения	16 мм
высота верхней измерительной марки	0,35 мм
расстояние от острия верхней марки до перекрестий	5 мм
точность отсчетов по шкалам	
x' и z'	±4 мкм
p'	±1 мкм
q'	±2 мкм
$\varkappa$ (поворот снимкодержателя)	10^{c}
рабочий ток для освещения — переменный или постоянный с напряжением	200 В
масса прибора	132 кг

В ЦНИИГАиК под руководством М. Д. Коншина разработан новый стереокомпаратор, позволяющий измерять координаты точек снимков с точностью 1 мкм и фиксировать результаты измерений автоматически. Кроме того, в СССР созданы высокоточные автоматизированные стереокомпараторы СКА-18 и СКА-30. Из иностранных новых стереокомпараторов в СССР применяется стеком тр Цейсса.

§ 25. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД

Координаты точки объекта можно вычислить по формулам, выведенным в гл. 4, если известны элементы ориентирования снимков и измерены координаты соответственных точек стереопары. В этом случае решается прямая засечка: по снимкам, полученным с концов базиса, положение которого известно, определяются координаты точки объекта.

Часто возникает необходимость решения обратной засечки: по нескольким опорным точкам, изобразившимся на снимке, определяются координаты точки фотографирования и другие элементы ориентирования снимка. Для решения этой задачи используются уравнения (4.27). Если измерить координаты x и z изображения опорной точки на снимке, то можно составить два уравнения (4.27) с девятью неизвестными элементами ориентирования снимка. Следовательно, для определения неизвестных необходимо не менее пяти точек. Когда элементы внутреннего ориентирования известны, достаточно трех точек. Обычно элементы ориентирования находят по избыточным данным, решая уравнения (4.27) методом последовательных приближений.

Обозначим приближенные значения элементов ориентирования снимка через

$$X'_S,\ Y'_S,\ Z'_S,\ \alpha',\ \omega',\ \varkappa',\ f',\ x'_0,\ z'_0$$

(первое приближение) и найдем поправки

$$\delta X_S,\ \delta Y_S,\ \delta Z_S,\ \delta\alpha,\ \delta\omega,\ \delta\varkappa,\ \delta f,\ \delta x_0,\ \delta z_0.$$

Пусть x и z — измеренные координаты изображения опорной точки на снимке. Используя приближенные значения элементов ориентирования, вычислим по формулам (4.27) координаты $x_в$ и $z_в$ точки снимка. Очевидно, что вычисленные координаты точки снимка не будут равны измеренным вследствие ошибок элементов ориентирования и погрешностей измерения снимка. Поэтому можно написать

$$\left.\begin{aligned} x &= x_в + a\delta X_S + b\delta Y_S + c\delta Z_S + d\delta\alpha + e\delta\omega + f\delta\varkappa + g\delta f + h\delta x_0 + i\delta z_0 - v \\ z &= z_в + a'\delta X_S + b'\delta Y_S + c'\delta Z_S + d'\delta\alpha + e'\delta\omega + f'\delta\varkappa + g'\delta f + h'\delta x_0 + i'\delta z_0 - v' \end{aligned}\right\}, \quad (5.1)$$

где a, b, c, . . ., i и a', b', c', . . ., i' — частные производные функции (4.27) по соответствующим переменным, v и v' — поправки к измеренным координатам точки снимка.

Уравнения (5.1) решают по способу наименьших квадратов под условием

$$[pv^2 + p'v'^2] = \min,$$

где p и p' — веса измеренных величин. От уравнений поправок (5.1) переходят к нормальным уравнениям, в результате решения которых находят поправки к первому приближению неизвестных. Введя эти поправки, получают второе приближение элементов ориентирования. Затем вновь составляют уравнения поправок, используя уточненные значения неизвестных, переходят к нормальным уравнениям, решают их и находят поправки ко второму приближению неизвестных. Так продолжают до тех пор, пока поправки не будут малыми величинами, которыми можно пренебречь.

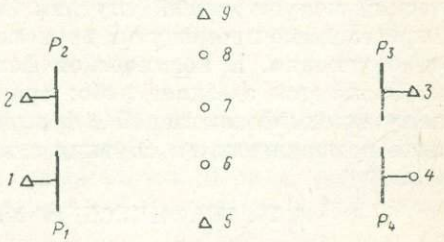


Рис. 50

Теперь рассмотрим применение аналитического метода в пространственной фототриангуляции.

Пусть с точек *1*—*4* (рис. 50) одной и той же камерой получены снимки P_1—P_4, на которых изображены опорные *5* и *9* и определяемые *6*, *7* и *8* точки. При этом точки *1*, *2* и *3* — опорные, а точка *4* — определяемая. Координаты опорных точек, а также приближенные значения координат определяемых точек и неизвестных элементов ориентирования снимков даны. Найдем поправки к приближенным значениям определяемых величин.

Измерим координаты изображений опорных и определяемых точек на снимках и вычислим по формулам (4.27) эти координаты. Затем для каждого изображения определяемой точки напишем два уравнения, аналогичные (5.1)

$$\left.\begin{aligned} &a\delta X_S + b\delta Y_S + c\delta Z_S + d\delta\alpha + e\delta\omega + f\delta\varkappa + g\delta f + h\delta x_0 + i\delta z_0 + j\delta X + k\delta Y + \\ &\qquad + l\delta Z + x_в - x = v \\ &a'\delta X_S + b'\delta Y_S + c'\delta Z_S + d'\delta\alpha + e'\delta\omega + f'\delta\varkappa + g'\delta f + h'\delta x_0 + i'\delta z_0 + j'\delta X + \\ &\qquad + k'\delta Y + l'\delta Z + z_в - z = v' \end{aligned}\right\}, \quad (5.2)$$

где a, b, . . ., l и a', b', . . ., l' — частные производные функций (4.27) по переменным X_S, Y_S, . . ., Z; δX_S, δY_S, . . ., δZ — поправки к приближенным

значениям элементов ориентирования снимка и координат определяемой точки.

Уравнения (5.2) решают по способу наименьших квадратов путем последовательных приближений.

Если точка фотографирования служит опорной точкой, то поправки δX_S, δY_S и δZ_S равны нулю. Поправки δX, δY и δZ также равны нулю, если уравнения (5.2) составляются для изображения опорной точки.

Очевидно, что неизвестные, входящие в уравнения (5.2), можно найти, если количество этих уравнений равно или больше числа неизвестных.

Пусть элементы внутреннего ориентирования фотокамеры известны. Тогда для сети, изображенной на рис. 50, неизвестными будут девять угловых элементов внешнего ориентирования снимков P_1, P_2 и P_3, шесть элементов внешнего ориентирования снимка P_4 и девять координат точек *6*, *7* и *8*, всего 24. Каждая из точек *5—9* на снимках изобразилась четыре раза. Всего имеем 20 изображений, что позволяет составить 40 уравнений, из которых 16 являются избыточными.

Изложенный выше способ аналитической фототриангуляции можно применять для построения и уравнивания как малых, так и больших сетей. Значительное количество неизвестных и уравнений не является существенным препятствием при использовании достаточно мощных электронных вычислительных машин.

Схема сети, представленная на рис. 50, применяется и в динамической или космической фототриангуляции. В этом случае вместо наземных точек *5—9* фотографируют воздушные подвижные цели, например ракеты или геодезический искусственный спутник Земли, образующий световые вспышки через определенные промежутки времени. Фотографирование с точек *1—4* производят одновременно. В космической фототриангуляции на снимках кроме спутника изображается звездное небо; время съемки фиксируется. По таким снимкам, полученным фотокамерой с фокусным расстоянием 50—100 см, можно определять направления на спутник с точностью 2—1″.

§ 26. ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД

Графическим методом можно получить по снимкам плановое положение и высоты точек местности.

Для решения этой задачи применяются известные из геодезии прямая и обратная засечки, но горизонтальные и вертикальные углы не измеряются на местности, а определяются по снимкам.

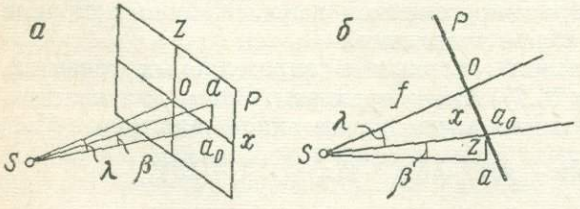


Рис. 51

Определение горизонтальных и вертикальных углов. Пусть при горизонтальном положении оси камеры получен снимок P (рис. 51, *а*). Угол поворота $\varkappa$ снимка и координаты главной точки равны нулю. Измерим координаты x и z точки a и найдем по ним горизонтальный угол λ и вертикальный угол β направления Sa.

На листе бумаги выберем произвольную точку S и, принимая ее за центр проекции, прочертим направление оси камеры So (рис. 51, *б*). Отложим от точки S на направлении оси камеры отрезок So, равный фокусному расстоянию

фотокамеры. Через точку o проведем перпендикуляр к прямой So и отложим на нем отрезок, равный координате x. Точку a_0, полученную в результате этого построения, соединим прямой линией с центром проекции. Нетрудно доказать, что построенный угол oSa_0 равен λ.

Чтобы найти угол β, отложим от точки a_0 по перпендикуляру к прямой Sa_0 отрезок $a_0a = z$. Затем точку a соединим прямой с точкой S. Очевидно, что угол a_0Sa представляет собой угол β.

Прямая засечка. Пусть имеем два снимка, полученные с концов базиса. Элементы ориентирования ω, $\varkappa$, x_0 и z_0 каждого снимка равны нулю.

Нанесем по элементам внешнего ориентирования базис S_1S_2 и направления оси камеры S_1o_1 и S_2o_2 на планшет (рис. 52, *а*). Затем измерим координаты изображений определяемой точки на левом и правом снимках и построим по

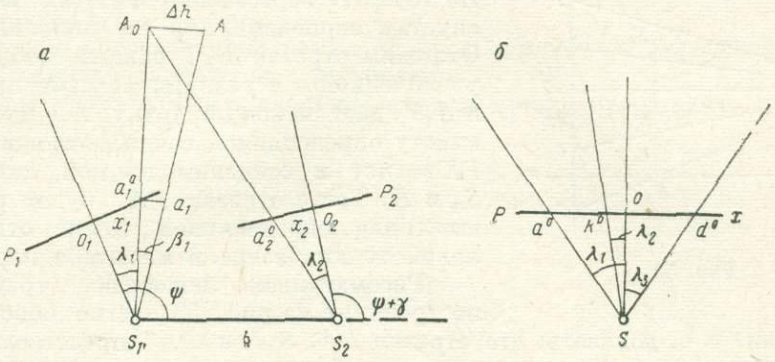


Рис. 52

ним горизонтальные углы λ_1, λ_2 и вертикальный угол β_1. В пересечении направлении $S_1a_1^0$ и $S_2a_2^0$ получим плановое положение A_0 определяемой точки. Чтобы найти превышение ее относительно левой точки базиса, достаточно в точке A_0 восстановить перпендикуляр к прямой S_1A_0. Отрезок A_0A равен превышению в масштабе построения.

Обратная засечка. Пусть дан снимок, полученный с определяемой точки. Элементы ориентирования ω, $\varkappa$, x_0 и z_0 равны нулю. На снимке изобразилось не менее трех пунктов, положение которых известно. Найдем положение точки фотографирования.

Для этого измерим на снимке координаты изображений известных пунктов. По измеренным координатам построим на восковке горизонтальные углы λ_1, λ_2 и λ_3 (рис. 52, *б*). Затем, пользуясь восковкой, можно получить на планшете положение искомой точки по способу Болотова. Превышение ее над любой из данных точек определим изложенным выше приемом.

Устройства для решения прямой засечки. Рассмотренный выше способ графического решения прямой засечки обеспечивает достаточную точность в случае, когда направления с концов базиса на определяемую точку пересекаются под углом не меньше 30°.

Стереофотограмметрическая съемка производится с небольших базисов, вследствие чего соответственные направления пересекаются под малыми углами порядка 3—15°. В этом случае графическую обработку результатов стереосъемки выполняют другим способом. Рассмотрим этот способ сначала применительно к нормальному случаю съемки.

Пусть точка S_1, произвольно выбранная на планшете, представляет собой левую точку базиса (рис. 53). Прочертим прямую S_1F и будем считать ее направлением оси камеры. Отложим на этом направлении фокусное расстояние, увеличенное в n раз: $S_1F = nf$. Параллельно направлению S_1F прочертим прямую DE на расстоянии

$$S_1D = \frac{k}{M} b,$$

где b — горизонтальное проложение базиса фотографирования, k — произвольный коэффициент, M — знаменатель масштаба плана.

На прямой FC, перпендикулярной направлению оптической оси фотокамеры, отложим продольный параллакс, увеличенный в nk раз: $FC = nkp$. Точку C соединим прямой линией с точкой S_1. Из точки N пересечения прямых DE и S_1C опустим перпендикуляр на направление S_1F. Отложим отрезок FT, равный координате x_1, увеличенной в n раз. Пересечение прямых NP и S_1T дает искомую точку A. Чтобы найти высоту определяемой точки, отложим отрезок $FK = nz_1$ и соединим прямой линией точки S_1 и K. Тогда отрезок PA' будет равен превышению определяемой точки относительно левой точки базиса в масштабе плана.

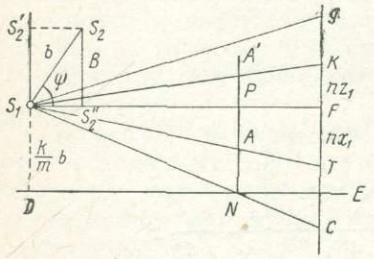


Рис. 53

Рассматривая подобные треугольники, построенные на рис. 53, легко обосновать эти построения, т. е. доказать, что отрезки PA, S_1P и PA' представляют собой фотограмметрические координаты искомой точки, определяемые формулами (4.17).

Коэффициенты n и k нужно выбирать с таким расчетом, чтобы полностью использовать точность измерений на стереокомпараторе. Пусть

$$\rho = nkp.$$

Продифференцируем это выражение по переменной p

$$d\rho = nk\,dp.$$

Пусть $d\rho$ равно ошибке графических построений — 0,2 мм. Тогда при dp = = 0,01 мм получим

$$k = \frac{20}{n}. \tag{5.3}$$

Если размеры планшета позволяют выбрать $n = 2$, то $k = 10$.

Для обработки снимков параллельной съемки введем обозначение

$$b' = b\left(\sin\psi - \frac{x_2}{f}\cos\psi\right) \tag{5.4}$$

и представим уравнения (4.16) в таком виде

$$\left.\begin{aligned} X &= b'\frac{x_1}{p} = Y\frac{x_1}{f} \\ Y &= b'\frac{f}{p} \\ Z &= b'\frac{z_1}{p} = Y\frac{z_1}{f} \end{aligned}\right\}. \tag{5.5}$$

Следовательно, равномерно отклоненные снимки можно обрабатывать как нормальные, если для каждой определяемой точки находить величину b', которую можно назвать переменным базисом. Для определения b' построим при точке S_1 угол ψ и отложим отрезок $S_1S_2 = b$ в масштабе. Кроме того, отложим отрезок $Fg = nx_2$. Проекция отрезка S_1S_2 на направление S_1S_2' равна $b \sin \psi$, т. е. первой составляющей величины b'. Легко показать, что отрезок $S_2''B$ равен второй составляющей, знак которой зависит от знаков x_2 и $\cos \psi$.

Чтобы ускорить изложенные построения, Пульфрих предложил чертежный прибор, состоящий из доски 50×70 см, вращающейся линейки, направляющей линейки и треугольника. На доску наклеена бумага, на которую нанесены шкалы базисов, параллаксов, координат и превышений. На этом приборе можно составить и план местности, если определить достаточное количество пикетных точек.

Аналогично устроена номограмма М. Н. Ютанова для определения фотограмметрических координат точек местности.

Формулы (4.16) для параллельной съемки можно представить и в таком виде

$$\left.\begin{aligned} X &= Y\frac{x_1}{f} \\ Y &= b\frac{f'}{p} \\ Z &= Y\frac{z_1}{f} \end{aligned}\right\}, \tag{5.6}$$

где

$$f' = f\sin\psi - x_2\cos\psi. \tag{5.7}$$

До изобретения стереоавтографа графический метод широко применялся для составления карт. В настоящее время этот метод почти вытеснен более совершенным графомеханическим методом, в котором измерение снимков и составление карты производятся одновременно и сливаются в один процесс.

§ 27. ГРАФОМЕХАНИЧЕСКИЙ МЕТОД

Обработка снимков графомеханическим методом производится на стереоавтографе.

Стереоавтограф — универсальный стереоприбор, позволяющий составить по снимкам план или карту объекта. Основными частями этого прибора являются стереокомпаратор и плоскостные механизмы, решающие уравнения связи между координатами точки объекта и координатами ее изображений на стереопаре.

Теория стереоавтографа. На рис. 54, *а* представлен нормальный случай съемки: S_1S_2 — базис фотографирования, P_1 и P_2 — снимки, $a_1(x_1, z_1)$ и $a_2(x_2, z_2)$ — изображения определяемой точки A на снимках.

Нанесем на планшет точки S_1 и S_2 и поместим на него две линейки L и R. Пусть эти линейки поворачиваются в плоскости планшета: левая вокруг точки S_1, а правая вокруг S_2. Повороты линеек осуществляются роликами, перемещаемыми по направляющей, параллельной базису S_1S_2 и отстоящей от него на расстоянии, равном фокусному расстоянию фотокамеры f.

Для определения на планшете точки A установим линейки в начальное положение, т. е. перпендикулярно базису; затем повернем их так, чтобы

отрезки o_1a_1 и o_2a_2 были равны x_1 и x_2 соответственно. Тогда пересечение линеек укажет положение точки A на планшете.

Однако такая схема прибора имеет существенный недостаток: отрезок S_1S_2 на планшете мал и разместить линейки на таком расстоянии невозможно. Например, если базис $b = 500$ м, то соответствующий отрезок на плане масштаба 1 : 50 000 равен только 1 см.

Чтобы исключить этот недостаток, в стереоавтограф введен параллелограмм (рис. 54, *б*). Центр вращения правой линейки выбран на продолжении прямой S_1S_2 и на произвольном расстоянии $S_1S_2' = k$ от точки S_1, которое *определяется по конструктивным соображениям. Точку A в приборе осуществляет* центр ролика, расположенного на каретке K_x мостика отстояний M_l.

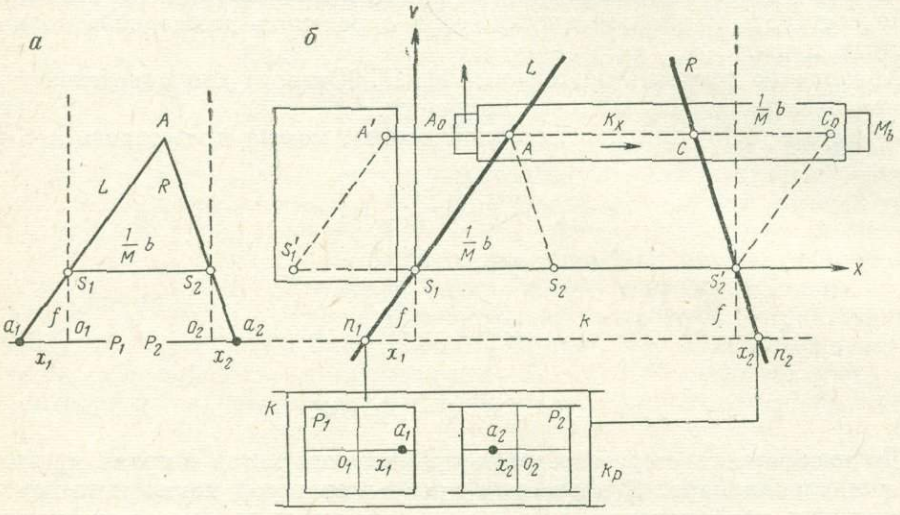


Рис. 54

Мостик отстояний перемещается вдоль оси Y прибора, а каретка — вдоль оси X. Каретка имеет еще второй ролик C, к которому прилегает правая линейка. При этом AC параллелен S_1S_2'. Фигура, составленная точками S_2, S_2' и центрами ведущих роликов A и C линеек направлений L и R, и есть параллелограмм.

Из рисунка следует, что расстояние между роликами A и C

$$AC = k - \frac{1}{M} b. \tag{5.8}$$

где 1 : M — масштаб составляемой карты.

Перемещения мостика и каретки отстояний вызывают повороты линеек и смещения роликов n_1 и n_2 по направлению, параллельному оси X прибора и отстоящему от точки S_1 на расстоянии, равном фокусному расстоянию f фотокамеры. Так как ролики n_1 и n_2 неизменно связаны с главной и параллактической каретками K и K_p стереокомпаратора, то при поворотах линеек перемещаются и эти каретки параллельно оси X прибора.

Для определения на стереоавтографе планового положения точки A объекта необходимо выполнить следующие операции.

1. Установить линейки направлений в начальное положение, т. е. параллельно оси Y прибора.

2. Отделить стереокомпаратор от системы линеек и навести левый микроскоп на координатную метку оси z левого снимка, а правый — на координатную метку оси z правого снимка. Затем вновь соединить линейки со стереокомпаратором.

3. Установить базис фотографирования, сместив ведущий ролик линейки R влево параллельно оси X на величину $(1/M)\,b$.

4. Движениями мостика и каретки отстояний, а также движениями бинокулярного микроскопа и правого снимка относительно левого параллельно оси Y прибора навести левый микроскоп на точку a_1 левого снимка, а правый — на точку a_2 правого снимка.

После выполнения этих операций центр ведущего ролика A укажет плановое положение определяемой точки, так как отрезки A_0A и S_1A_0 равны координатам X и Y в масштабе плана, получаемым по формулам (4.17).

Чтобы найти плановое положение любой другой точки объекта, изобразившейся на стереопаре, достаточно выполнить только четвертую операцию из перечисленных выше.

Если к ведущему ролику линейки L прикрепить карандаш, а под линейки установить планшет, то на планшете можно получить план или карту объекта. Для этого достаточно, действуя названными выше движениями основных частей прибора, обвести маркой контуры стереомодели, наблюдаемой в стереокомпараторе. Для удобства работ карандаш A' не находится на ролике, а вынесен в сторону и прикреплен к концу штанги, неизменно связанной с кареткой отстояний. Поэтому и планшет должен быть установлен так, чтобы точка его, соответствующая левой точке базиса, оказалась совмещенной с точкой S_1', отстоящей от центра вращения линейки S_1 на расстоянии S_1S_1', равном AA'. При этом AA' и S_1S_1' взаимно параллельны. Кроме того, прочерченное на планшете направление оптической оси фотокамеры должно быть перпендикулярно оси X прибора.

Так определяется на стереоавтографе плановое положение точек объекта по снимкам, полученным в нормальном случае съемки.

Теперь рассмотрим определение планового положения точек по равномерно отклоненным снимкам.

В этом случае базис S_1S_2 составляет угол ψ с осью Y прибора и после наведения микроскопов стереокомпаратора на соответственные точки снимков линейка R должна быть параллельна направлению S_2A (рис. 55). Для этого необходимо установить базис так, чтобы ведущий ролик C сместился относительно начального положения C_0 по прямой C_0C на величину $(1/M)b$. В приборе это можно выполнить путем смещения ролика на величины, равные составляющим базиса $b_X = C_0C'$ и $b_Y = C'C$

$$\left.\begin{aligned} b_X &= \frac{1}{M}\, b \sin\psi \\ b_Y &= \frac{1}{M}\, b \cos\psi \end{aligned}\right\}. \tag{5.9}$$

Если $\psi > 90°$, то ролик следует перемещать от точки C' по направлению от стереокомпаратора, если же $\psi < 90°$, то это смещение должно быть направлено к стереокомпаратору.

Другие операции, необходимые для определения планового положения точек и перечисленные выше, в данном случае остаются без изменений.

Можно легко доказать, что отрезки A_0A и S_1A_0 представляют собой координаты X и Y, определяемые по формулам (4.16) и выраженные в масштабе карты.

Обработка конвергентных снимков на стереоавтографе имеет следующую особенность. При конвергентном виде съемки левый снимок P_1 составляет

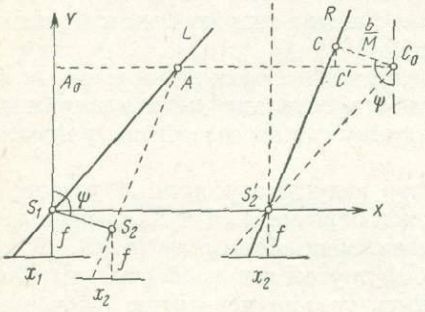


Рис. 55

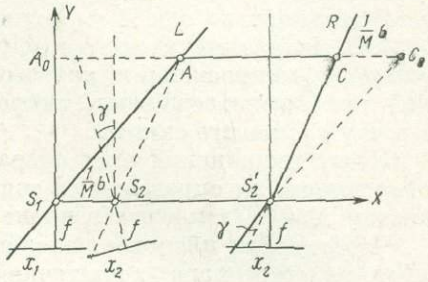


Рис. 56

угол γ с правым снимком P_2 (рис. 56). Так как на стереокомпараторе снимки устанавливаются всегда в одной плоскости, то в данном случае необходимо повернуть короткое плечо линейки R относительно длинного на угол γ. Этот поворот должен быть сделан после наведения микроскопов на координатные метки, отмечающие оси z на снимках.

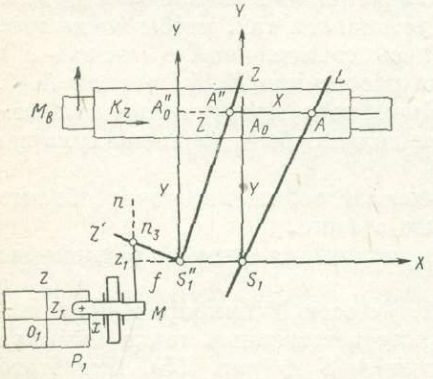


Рис. 57

Базис фотографирования при обработке конвергентных снимков устанавливается так же, как для нормальных снимков, если $\psi = 90°$, или как для параллельных снимков, если $\psi \neq 90°$.

На рис. 56 показано положение линеек после наведения микроскопов стереокомпаратора на соответственные точки снимков. Отрезки A_0A и S_1A_0 равны координатам X и Y определяемой точки, выраженным в масштабе карты, т. е. соответствуют величинам, вычисляемым по формулам (4.15).

Механизм для определения на стереоавтографе третьей координаты (рис. 57) состоит из линейки высот ZZ', изогнутой под углом 90° и вращающейся вокруг точки S_1'', соответствующей левому концу базиса, ведущего ролика A'', каретки высот K_Z и ролика n_3, связанного с левым микроскопом M. Каретка высот находится на мостике отстояний $M_в$ и перемещается на нем параллельно оси X прибора. Это перемещение вызывает поворот линейки высот и смещение левого микроскопа параллельно оси Y прибора, так как ролик n_3 всегда касается короткого плеча линейки высот. Расстояние от центра вращения линейки высот до прямой n_3n, по которой перемещается центр ролика n_3, равно фокусному расстоянию фотокамеры. Расстояния от прямой S_1S_1'' до ведущих роликов A и A'' линейки высот и линейки направлений L одинаковы.

Пусть три первые операции по определению планового положения точки (стр. 63) выполнены. Установим линейку высот в начальное положение $S_1''A_0''$,

а левый микроскоп наведем на координатную метку оси x левого снимка. Ролик скрепим с левым микроскопом.

Теперь наведем бинокулярный микроскоп на точку стереомодели, соответствующую определяемой точке объекта, т. е. выполним четвертую операцию из перечисленных на стр. 63.

Нетрудно доказать, что отрезок $A_0''A''$ равен координате Z, определяемой по формулам (4.15), (4.16) и (4.17) и выраженной в масштабе карты.

Для отсчета координат X, Y и Z стереоавтограф снабжен счетчиками.

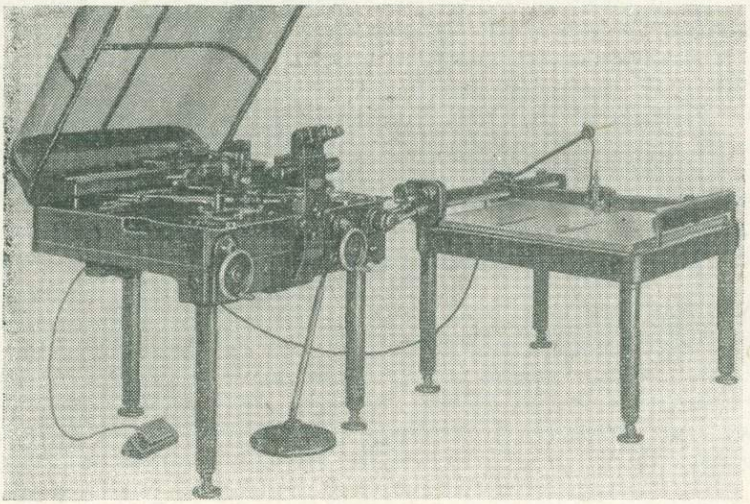


Рис. 58

Если на счетчике высот установить какой-либо отсчет и обвести измерительной маркой поверхность стереомодели, не изменяя этого отсчета, то карандаш вычертит на планшете горизонталь.

В соответствии с изложенной выше теорией разработаны стереоавтографы Цейсса и стереоавтограф проф. Ф. В. Дробышева [11].

Стереоавтограф 1318 Цейсса (рис. 58) служит для составления карт по наземным снимкам, полученным при съемке с горизонтальными приблизительно параллельными оптическими осями. Прибор решает задачу преобразования двух центральных проекций объекта в ортогональную путем проектирования каждой пары соответственных лучей на горизонтальную (рис. 59) и вертикальную (рис. 60) плоскости с использованием параллелограмма. При этом плоскости проекции расположены горизонтально и друг над другом, что позволило сократить размеры прибора по сравнению с предшествовавшими стереоавтографами Цейсса. В приборе имеются две линейки высот. Это обеспечивает автоматическое исключение вертикальных параллаксов при наблюдении снимков. Прибор снабжен координатографом для составления карт при различных соотношениях между масштабами карты и установленного в приборе базиса фотографирования.

Стереоавтограф состоит из станины, мостика микроскопов и линеек и мостика отстояний.

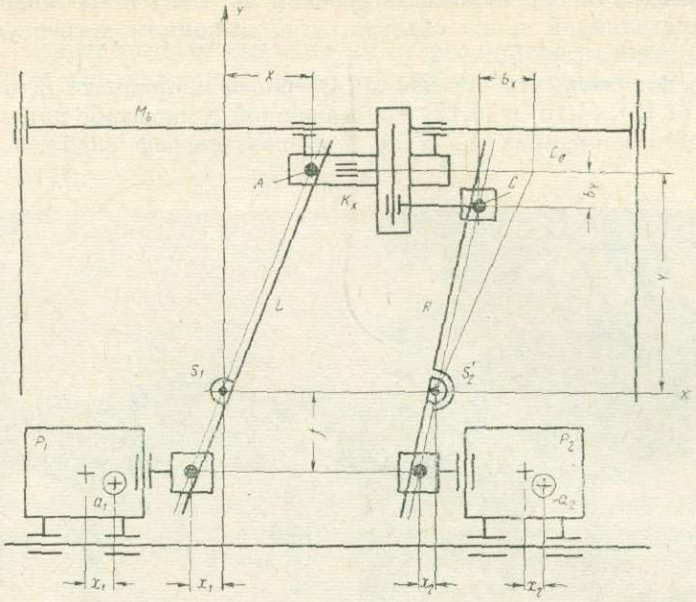

Y
X
b_x
M_b
C_θ
A
K_x
L
R
S_1
S_2'
Y
X
P_1
P_2
a_1
$-a_2$
x_1
x_1
x_2
x_2

Рис. 59

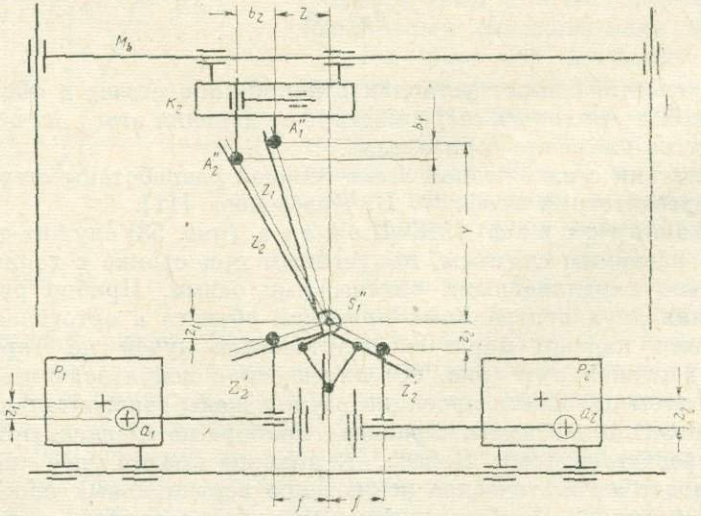

b_Z
Z
M_b
K_z
A_1''
A_2''
Z_1
Z_2
Y
S_1''
z_1'
z_2'
P_1
P_2
a_1
a_2
Z_2'
Z_2'
z_1'
z_2'
f
f

Рис. 60

К станине, опирающейся на три ножки, прикреплены главные направляющие мостика отстояний и цилиндрическая направляющая, по которой перемещаются каретки, несущие снимкодержатели. В передней части станины имеются кожух с измерительными марками и устройством для их подсветки, а также штурвалы X и Y и счетчики X, Y и Z. С правой стороны станины находятся валики, которыми приводится в действие координатограф.

Ножной диск для установки координаты Z присоединен к прибору снизу при помощи валика.

На мостике микроскопов и линеек находятся два микроскопа, бинокуляр и четыре линейки: направлений, параллаксов и две линейки высот. Этот мостик покоится на том же основании, на котором расположены оси вращения линеек направления и параллаксов. На двух стойках, привинченных к основанию мостика, укреплено промежуточное плато с осью вращения обеих линеек высот. Линейка параллаксов в точке, совпадающей с ее осью вращения, имеет излом, величину которого можно изменять и отсчитывать по барабану. Линейка высот в точке, совпадающей с ее осью вращения, имеет постоянный угол излома, равный 90°. Плечи линейки высот Z_2 соединены при помощи параллелограмма, имеющего передаточное отношение 1 : 1 и служащего для изменения направления вращения. Таким образом, плечи этой линейки поворачиваются на равные углы, но в противоположные стороны.

В начальном положении линейки высот находятся одна над другой. Длинные плечи линеек соединены роликовыми шарнирами с кареткой высот K_Z, расположенной на мостике высот $M_в$, и поворачиваются при перемещении этой каретки. Одновременно с этим короткие плечи линеек высот перемещают салазки с левым и правым микроскопами. Ролики коротких плеч линеек высот смещены вдоль оси абсцисс в разные стороны от общего центра вращения линеек на величину, равную фокусному расстоянию фотокамеры.

Правая линейка высот служит только для введения поправки за поперечный параллакс, который возникает вследствие разности высот правого и левого концов базиса фотографирования [см. формулы (4.32) и 4.33)]. Центр ведущего ролика этой линейки на каретке высот смещается относительно начального положения на величины b_Y и b_Z, представляющие собой проекции базиса фотографирования на координатные оси Y и Z.

Микроскопы можно смещать при помощи рычажной защелки в соответствии со смещениями объектива фототеодолитной камеры.

Мостик отстояний штурвалом Y перемещается по направляющим, прикрепленным к станине. На этом мостике имеются нижние и верхние направляющие. По нижним направляющим перемещается каретка отстояний штурвалом X, а по верхним — каретка высот с помощью ножного диска.

Каретка отстояний представляет собой крестообразные салазки. Ведущий ролик линейки направлений связан с ходовым винтом X. Ролик линейки параллаксов можно перемещать в направлении движения каретки отстояний и перпендикулярно этому направлению. Величины этих смещений относительно начального положения равны составляющим b_X и b_Y базиса фотографирования.

Каретки, на которых находятся снимкодержатели, перемещаются по цилиндрической направляющей. На снимкодержатели можно помещать снимки или контрольные сетки. На внутренней стороне кареток находится приспособление для установки коротких плеч линеек направлений и параллаксов в соответствии с фокусным расстоянием фотокамеры.

Фокусные расстояния и составляющие базиса устанавливаются с помощью стрелочных индикаторов. Стрелочные индикаторы для установки составляющих

базиса имеют двойную оцифровку. Для правого отклонения оптической оси фотокамеры и при превышении правого конца базиса относительно левого отсчет производится по черным цифрам, а для левого отклонения и при превышении левого конца базиса над правым — по красным.

На рис. 61 показана схема наблюдательной системы стереоавтографа. Источник света *1* освещает снимок P_2 при помощи зеркала *2*. Лучи от точки a_2 снимка попадают на призму *3* микроскопа и направляются в объектив *4*, который дает изображение в бесконечности. Призмы *5* и *7* служат для изменения направления лучей. Таким образом, смещение подвижных оптических деталей относительно неподвижных происходит в параллельных лучах. Объектив *6*

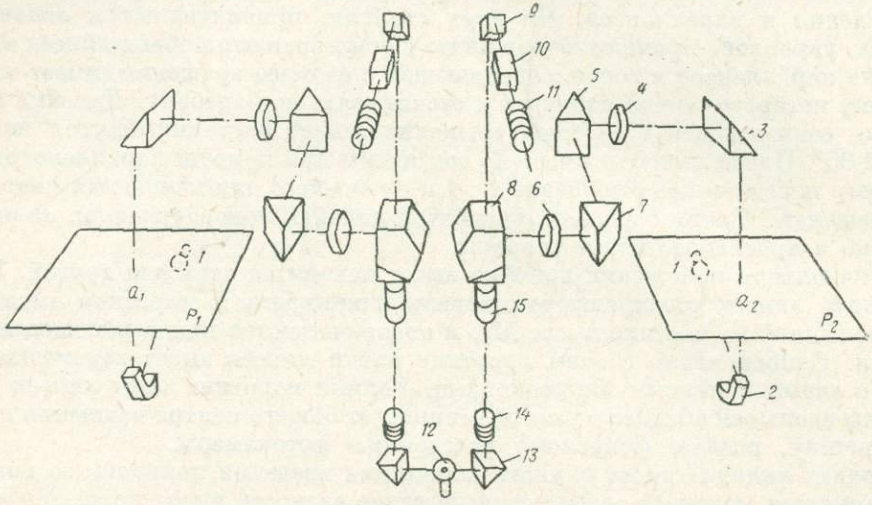


Рис. 61

образует изображение точки a_2, которое призмами *8*, *9* и *10* передается в фокальную плоскость окуляра *11*. При помощи осветителя *12* и призмы *13* объективы *14* и *15* образуют изображение марки в фокальной плоскости окуляра. Аналогично устроена левая ветвь наблюдательной системы.

Для установки снимков в снимкодержателях имеется специальное оптическое устройство. Оно состоит из системы призм, которые дают в одном поле зрения изображение четырех координатных меток снимка. Это облегчает точную установку снимка по юстировочным штрихам, нанесенным на укрепленной в снимкодержателе стеклянной пластинке.

Стереоавтограф 1318 связан с координатографом при помощи муфт и стержней. Такая система связи обеспечивает высокую точность передачи координат X и Y на чертежный стол, но не позволяет подключать к прибору устройства для автоматической регистрации этих величин.

Фирма Цейсса изготовила стереоавтограф 1318 EL с электрическими элементами передачи. В этом приборе для передачи движений используются сельсины-датчики. Выход сельсина-датчика можно отключить в случае работы без передачи координат и когда требуется измерять координаты на координатографе или регистрировать измеренные координаты с помощью координатора.

Кроме того, переключением штекеров сельсинных датчиков обеспечивается возможность построения на координатографе не только плана, но и профилей

в плоскостях YZ и XZ. Это расширяет возможности прибора, например, позволяет вести обработку снимков архитектурных объектов.
Основные характеристики стереоавтографа 1318 EL:

формат снимков	13×18 см
фокусные расстояния	от 157 до 198 мм
угол конвергенции	от +5 до −2g
увеличение наблюдательной системы	8×
диаметр измерительной марки (в плоскости снимка)	0,06 мм
пределы движений:	
X от −220 до +220 мм	от 0 до 60 мм
Y от 50 до 400 мм	от −30 до +30 мм
Z от −235 до +235 мм	от −10 до +10 мм
коэффициент передачи движений X и Y на координатограф (увеличение)	от 0,1 до 5,0×
размеры и масса стереоавтографа	105×120×125 см 400 кг
» » координатографа	110×120×95 см 120 кг

Обработка снимков на стереоавтографе. Для выполнения этого процесса должны быть вычислены координаты левых точек базисов фотографирования, дирекционные углы базисов и координаты контрольных точек. Кроме того, необходимо подготовить планшет: наклеить бумагу на твердую подложку, нанести координатную сетку, рамки трапеции, тригонометрические пункты, левые точки базисов фотографирования, контрольные точки и прочертить направления оптической оси фотокамеры. Наконец, следует убедиться в исправности прибора — выполнить рабочие поверки стереоавтографа.

Снимки в приборе устанавливают так, чтобы их координатные оси были параллельны цилиндрической направляющей, по которой перемещаются каретки со снимкодержателями. Кроме того, при начальном положении линеек направлений, параллаксов и высот визирная ось левого микроскопа должна проходить через главную точку левого снимка, а визирная ось правого микроскопа — через главную точку правого снимка. Затем на счетчике высот устанавливают высоту левой точки фотографирования, а на базисных шкалах — составляющие базиса, выбрав предварительно масштаб для установки базиса и коэффициент передачи движений X и Y на координатограф. Планшет устанавливают на координатографе так, чтобы острие карандаша не сходило с направления оптической оси, когда линейка направлений находится в начальном положении и вращается штурвал Y. Кроме того, при наведении измерительной марки на контрольные точки острие карандаша координатографа должно быть над соответствующими точками на планшете. Если это условие не выполняется, то вводят поправки в установленные в приборе элементы ориентирования стереопары. Эти поправки находят по формулам, выведенным в гл. 6, или способом последовательных приближений.

Съемку подробностей начинают с рисовки рельефа. Для проведения горизонтали на счетчике высот устанавливают соответствующую высоту и, вращая штурвалы, ведут измерительную марку так, чтобы она касалась модели объекта, наблюдаемой в бинокулярный микроскоп. Тогда карандаш координатографа вычерчивает горизонталь на планшете. Чтобы получить на планшете контуры объекта, обводят измерительной маркой соответствующие контуры модели, вращая штурвалы и ножной диск.

При съемке рельефа местности необходимо учитывать влияние кривизны Земли и атмосферной рефракции, т. е. вводить поправку

$$\delta Z = (1 - k)\frac{D^2}{2R}, \tag{5.10}$$

где k — коэффициент рефракции, D — расстояние от точки фотографирования до определяемой точки, R — радиус Земли. Для проведения горизонтали на счетчике высот устанавливают отсчет, равный высоте горизонтали, уменьшенной на величину поправки. При определении высоты точки к отсчету, полученному по счетчику высот, прибавляют поправку δZ.

Глава 6

ТОЧНОСТЬ НАЗЕМНОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

§ 28. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

На точность определения положения точек объекта методом наземной стереофотограмметрической съемки влияют главным образом ошибки установки заданных элементов внешнего ориентирования снимков, ошибки измерения снимков, погрешности обработки результатов этих измерений.

Ошибки измерения снимков в настоящее время сведены к возможному минимуму. Например, на стереокомпараторе координаты и параллаксы точек стереопары измеряются с точностью, соответствующей разрешающей способности фотопластинок. Поэтому следует стремиться к тому, чтобы ошибки определения элементов ориентирования снимков и погрешности обработки результатов измерений были заключены в такие пределы, при которых их влияние на точность определения координат точек объекта не превышает влияния ошибок измерения снимков.

Установление этих пределов является основной задачей данной главы. Кроме того, в ней будут выведены формулы, позволяющие подсчитать ожидаемые погрешности определения координат точек объекта, обусловленные случайными ошибками. Наконец, в этой главе будут рассмотрены систематические ошибки и способы исключения их влияния на окончательный результат обработки снимков.

Эти теоретические исследования дадут возможность обосновать оптимальные требования к конструированию приборов для фотографирования объектов и обработки снимков, к юстировке этих приборов, а также к точности выполнения полевых и камеральных работ.

§ 29. ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ СНИМКОВ И БАЗИСА

Найдем погрешности определения фотограмметрических координат точки объекта, обусловленные ошибками измерения базиса фотографирования, координат точки левого снимка и продольного параллакса.

Решим эту задачу для параллельного случая съемки, применив формулы (4.16).

Если $\varphi = 65^g$, то $\sin\psi = 0{,}85$, а член $\frac{x_2}{f}\cos\psi$ при $x_2 = 40$ мм и $f = 200$ мм равен 0,10, т. е. в восемь раз меньше $\sin\psi$. Поэтому при подсчете

ошибок этот член можно не учитывать и формулы (4.16) представить в виде

$$X = b\frac{x_1}{p}\sin\psi;$$

$$Y = b\frac{f}{p}\sin\psi;$$

$$Z = b\frac{z_1}{p}\sin\psi,$$

отсюда

$$m_X^2 = \left(\frac{\partial X}{\partial b}m_b\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial p}m_p\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_1}m_x\right)^2;$$

$$m_Y^2 = \left(\frac{\partial Y}{\partial b}m_b\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial p}m_p\right)^2;$$

$$m_Z^2 = \left(\frac{\partial Z}{\partial b}m_b\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial p}m_p\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial z_1}m_z\right)^2,$$

где m_X, m_Y, m_Z — средние квадратические ошибки определения координат X, Y, Z; m_b — средняя квадратическая ошибка измерения базиса фотографирования; m_x, m_z, m_p — средние квадратические ошибки измерения координат x_1, z_1 точки левого снимка и продольного параллакса p.

После вычисления частных производных и подстановки их значений получим

$$\left.\begin{aligned} m_X^2 &= \left(\frac{m_b x_1}{bf}\right)^2 Y^2 + \left(\frac{x_1 m_p}{bf^2}\right)^2 \frac{Y^4}{\sin^2\psi} + \left(\frac{m_x}{f}\right)^2 Y^2 \\ m_Y^2 &= \left(\frac{m_b}{b}\right)^2 Y^2 + \left(\frac{m_p}{bf}\right)^2 \frac{Y^4}{\sin^2\psi} \\ m_Z^2 &= \left(\frac{m_b z_1}{bf}\right)^2 Y^2 + \left(\frac{m_p z_1}{bf^2}\right) \frac{Y^4}{\sin\psi} + \left(\frac{m_z}{f}\right)^2 Y^2 \end{aligned}\right\}. \qquad (6.1)$$

Из этих формул следует, что ошибки измерения базиса и координат точки снимка действуют пропорционально отстоянию Y, а ошибка измерения продольного параллакса — пропорционально квадрату отстояния.

Пусть $b = 375$ м, $f = 200$ мм, $x_1 = 50$ мм, $z_1 = 40$ мм, $m_b : b = 1 : 2000$, $m_p = \pm 5$ мкм, $m_x = m_z = \pm 10$ мкм. Тогда ошибку m_Y можно представить в таком виде:

$$m_Y = Y\sqrt{0{,}25 + \left(\frac{Y}{15\sin\psi}\right)^2},$$

где m_Y — в метрах, а Y — в километрах. Ошибки m_X и m_Z получим приближенно, умножив m_Y на x_1/f и z_1/f. По этим данным составлена табл. 2, в которой

Таблица 2

Y, км	$\psi = 100^g$			$\psi = 65^g$		
	m_X	m_Y	m_Z	m_X	m_Y	m_Z
1,5	±0,2	±0,8	±0,1	±0,2	±0,8	±0,1
4,5	0,6	2,6	0,5	0,7	2,8	0,6
7,5	1,3	5,3	1,1	1,6	6,0	1,3

представлены ошибки (в м) определения фотограмметрических координат при нормальном и параллельном случаях съемки, вызванные погрешностями измерения снимков и базиса.

§ 30. ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ЭЛЕМЕНТОВ ВНУТРЕННЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Если данные значения элементов внутреннего ориентирования не соответствуют тем значениям, которые были во время съемки, то результаты обработки снимков будут иметь систематические ошибки.

Рассмотрим влияние ошибок элементов внутреннего ориентирования на координаты точки снимка и продольный параллакс.

Влияние ошибки фокусного расстояния. Координаты точки снимка связаны с фокусным расстоянием фотокамеры формулами (4.10), которые можно представить в таком виде:

$$\left.\begin{aligned} x &= f \operatorname{tg} \lambda \\ z &= f \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos \lambda} \end{aligned}\right\}, \qquad (6.2)$$

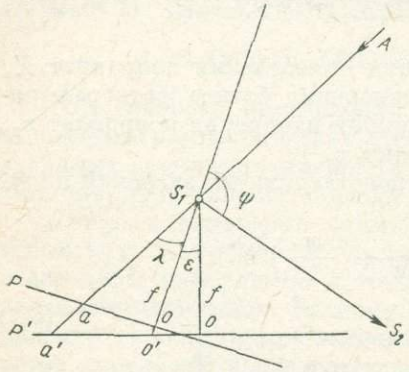


Рис. 62

где λ и β — горизонтальный и вертикальный углы, определяющие направление с точки фотографирования на точку объекта.

Пусть фокусное расстояние фотокамеры изменилось на величину Δf. Тогда координаты точки снимка изменяются на величины

$$\left.\begin{aligned} \Delta x &= \Delta f \operatorname{tg} \lambda = \frac{x}{f} \Delta f \\ \Delta z &= \Delta f \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos \lambda} = \frac{z}{f} \Delta f \end{aligned}\right\}. \qquad (а)$$

Как известно, продольный параллакс равен $x_1 - x_2$. Поэтому

$$\Delta p = \Delta x_1 - \Delta x_2, \qquad (6.3)$$

или

$$\Delta p = \frac{x_1}{f} \Delta f - \frac{x_2}{f} \Delta f = \frac{p}{f} \Delta f. \qquad (б)$$

Влияние координат главной точки. Формулы связи между координатами точки объекта и соответственных точек стереопары, применяемые обычно на практике, выведены для случая, когда начало координат на снимке совпадает с главной точкой, т. е. когда элементы внутреннего ориентирования x_0 и z_0 равны нулю. В действительности даже при весьма тщательной установке координатных меток в фотокамере эти элементы отличаются от нуля.

Рассматривая влияние элемента x_0, необходимо учитывать, что заданный угол устанавливается между базисом фотографирования и направлением, проходящим через центр проекции и начало координат o' (рис. 62). Если $x_0 = 0$, то снимок занимает положение P, если же $x_0 \neq 0$, то снимок оказывается в положении P'.

Изображение точки A объекта в первом случае получаем в точке a, а во втором — в точке a'. Обозначив теоретическую абсциссу изображения точки A через x, а действительную через x', напишем

$$x = f \operatorname{tg} \lambda;$$

$$x' = f \operatorname{tg} (\lambda + \varepsilon) - f \operatorname{tg} \varepsilon,$$

где ε — угол с вершиной в центре проекции между направлениями на начало координат и главную точку снимка.

Угол ε мал. Поэтому можно разложить его функции в ряды, сохраняя малые величины первого порядка

$$x' = f \operatorname{tg} \lambda + f\varepsilon \sec^2 \lambda - f\varepsilon = f \operatorname{tg} \lambda + f\varepsilon \operatorname{tg}^2 \lambda.$$

Следовательно,

$$\Delta x = f\varepsilon \operatorname{tg}^2 \lambda = -\frac{x^2}{f^2} x_0. \qquad (в)$$

Влияние x_0 на продольный параллакс подсчитаем по (6.3)

$$\Delta p = -\frac{x_1^2 - x_2^2}{f^2} x_0. \qquad (г)$$

Чтобы найти влияние x_0 на координату z, воспользуемся формулой (6.2) и рис. 62 и напишем следующие выражения для теоретической координаты z и действительной z'

$$z = f \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos \lambda}, \quad z' = f \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos (\lambda + \varepsilon)}.$$

Так как угол ε мал, то

$$z' = f \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos \lambda - \varepsilon \sin \lambda} = f \frac{\operatorname{tg} \beta}{(1 - \varepsilon \operatorname{tg} \lambda) \cos \lambda} = f \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos \lambda} (1 + \varepsilon \operatorname{tg} \lambda) = z - \frac{xz}{f^2} x_0.$$

Следовательно,

$$\Delta z = -\frac{xz}{f^2} x_0. \qquad (д)$$

Теперь пусть $x_0 = 0$, а $z_0 \neq 0$. Тогда фактические значения координат точки снимка и продольного параллакса будут отличаться от теоретических на величины

$$\Delta x = 0, \ \Delta z = z_0, \ \Delta p = 0. \qquad (е)$$

Ошибки элементов внутреннего ориентирования снимков малы. Поэтому, используя выражения (а)—(е), можно написать следующие формулы для определения суммарного влияния этих ошибок

$$\left.\begin{aligned} \Delta x &= \frac{x}{f} \Delta f - \frac{x^2}{f^2} x_0 \\ \Delta z &= \frac{z}{f} \Delta f + z_0 - \frac{xz}{f^2} x_0 \\ \Delta p &= \frac{p}{f} \Delta f - \frac{x_1^2 - x_2^2}{f^2} x_0 \end{aligned}\right\}. \qquad (6.4)$$

§ 31. ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Рассмотрим влияние на величины x, z и p ошибок угловых элементов внешнего ориентирования: ошибки отклонения оси камеры $\Delta\psi$, ошибки наклона оси камеры $\Delta\omega$ и ошибки поворота снимка $\Delta\varkappa$.

Для этого используем приближенные формулы (4.24), выражающие зависимость между координатами x^0, z^0 точки вертикального снимка и координатами x, z соответствующей точки наклонного снимка. Заменим элементы α, ω и $\varkappa$ их ошибками $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$ и $\Delta\varkappa$. Обозначая разности $x - x^0$ и $z - z^0$ через Δx и Δz и учитывая, что согласно рис. 41 $\Delta\alpha = -\Delta\psi$, получим

$$\left.\begin{aligned} \Delta x &= \left(f + \frac{x^2}{f}\right)\Delta\psi - \frac{xz}{f}\Delta\omega + z\,\Delta\varkappa \\ \Delta z &= \frac{xz}{f}\Delta\psi - \left(f + \frac{z^2}{f}\right)\Delta\omega - x\,\Delta\varkappa \end{aligned}\right\}. \tag{6.5}$$

Затем по формуле (6.3) найдем

$$\Delta p = f(\Delta\psi_1 - \Delta\psi_2) + \frac{x_1^2\,\Delta\psi_1 - x_2^2\,\Delta\psi_2}{f} - \frac{z}{f}(x_1\,\Delta\omega_1 - x_2\,\Delta\omega_2) + z(\Delta\varkappa_1 - \Delta\varkappa_2). \tag{6.6}$$

При этом принимается, что $z_1 = z_2 = z$, так как продольный параллакс обычно мал.

§ 32. ДОПУСКИ ДЛЯ ЮСТИРОВКИ ПРИБОРОВ И ПОЛЕВЫХ РАБОТ. ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧКИ ОБЪЕКТА

Ошибки координат точки снимка и продольного параллакса разделим на две группы: 1) случайные ошибки и 2) систематические ошибки, вызванные в основном погрешностями элементов ориентирования снимков.

Случайные ошибки величин x, z и p зависят от разрешающей силы объектива фотокамеры, разрешающей способности и деформации фотоматериалов, точности измерительного прибора и других факторов.

Фотокамеры, предназначенные для наземной стереосъемки, снабжаются, как правило, нормальноугольными объективами с высокой разрешающей силой и практически свободными от дисторсии. Изображения объекта получаются на фотопластинках, разрешающая способность которых соответствует разрешающей силе объектива фотокамеры, а деформация их не имеет практического значения. Современные стереокомпараторы позволяют измерять снимки с точностью порядка несколько микрон.

Случайные ошибки величин x, z и p в наземной стереосъемке, как показал опыт, характеризуются следующими величинами:

$$m_x = \pm 10 \text{ мкм}, \quad m_z = \pm 10 \text{ мкм}, \quad m_p = \pm 5 \text{ мкм}.$$

Систематические ошибки координат и продольных параллаксов точек стереопары можно подсчитать по выведенным выше формулам, если известны погрешности элементов ориентирования снимков.

Потребуем, чтобы систематические ошибки координат точки снимка и продольного параллакса не превысили случайных ошибок. Учитывая это требование, найдем предельные значения ошибок элементов ориентирования снимков.

Для примера исследуем влияние ошибки наклона снимка и подсчитаем наибольшую допустимую величину этой ошибки. Согласно (6.5) и (6.6)

$$\Delta x = -\frac{xz}{f}\Delta\omega;$$

$$\Delta z = -\left(f + \frac{z^2}{f}\right)\Delta\omega;$$

$$\Delta p = -\frac{z}{f}(x_1\Delta\omega_1 - x_2\Delta\omega_2).$$

Так как $x < f$ и $z < f$, то ошибка $\Delta\omega$ будет в большей мере влиять на координату z. Пусть $f = 200$ мм и $z = 40$ мм. Тогда, полагая $\Delta z = 10$ мкм, получим

$$\Delta\omega = \frac{f\Delta z}{f^2 + z^2}\rho'' = \frac{200 \cdot 0{,}01}{200^2 + 40^2}\,206\,000 = 10''.$$

Следовательно, цена деления уровня, контролирующего наклон оси камеры, должна быть около $10''$.

Пусть максимальные значения координат x и z равны 80 и 50 мм соответственно и ось фотокамеры установлена в горизонтальное положение с ошибкой $\Delta\omega = \pm 10''$. В этом случае ошибка продольного параллакса согласно (6.6) равна ± 1 мкм, что не выходит за пределы допуска ± 5 мкм.

Можно аналогично исследовать влияние других элементов ориентирования, используя формулы (6.4), (6.5) и (6.6). Результаты этих исследований представлены в табл. 3.

Таблица 3

Ошибка	Величина, на которую больше всего влияет ошибка	Влияние ошибки на величины, мкм		
		x	z	p
Измерения		± 10	± 10	± 5
$\Delta f = \pm 25$ мкм	x	10	7	1
$x_0 = \pm 60$ мкм	x	10	7	2
$z_0 = \pm 10$ мкм	z	0	10	0
$\Delta\varphi = \pm 2'$	z *	—	10	6
$\Delta\gamma = \pm 5''$	p	0	0	5
$\Delta\omega = \pm 10''$	z	1	10	2
$\Delta\varkappa = \pm 10''$	p	3	4	5

* Снимки обрабатываются графическим или графомеханическим способами.

Из этой таблицы вытекают весьма важные выводы. Например, цена деления уровня, контролирующего поворот снимка, должна быть равна $10''$. Ориентирующее приспособление фотокамеры должно обеспечивать возможность установки заданного значения параллактического угла с точностью $5''$. Фокусное расстояние фотокамеры должно быть известно с точностью 25 мкм. Следует отметить различные требования к определению элементов внутреннего ориентирования x_0 и z_0. Если элемент z_0 необходимо получить с точностью ± 10 мкм, то ошибки определения элемента x_0 может доходить до ± 60 мкм. Следовательно, координатные метки, отмечающие в фотокамере ось x, должны быть установлены с точностью ± 10 мкм, а метки, отмечающие ось z, — с точностью ± 60 мкм.

В момент фотографирования плоскость эмульсионного слоя фотопластинки должна совпадать с плоскостью прикладной рамки фотокамеры с точностью 20 мкм ($f = 200$ мм, формат снимка 13×18 см). В этом случае искажения координат точки снимка, вызванные неприжимом фотопластинки, не выйдут за пределы ошибок измерений — 10 мкм. Если неприжим фотопластинки больше допустимого, то необходимо учитывать его влияние при обработке снимков.

При выполнении полевых работ необходимо стремиться к тому, чтобы ошибки элементов ориентирования снимков не превышали значений, указанных в табл. 3.

Эта таблица составлена для фотокамер, фокусное расстояние которых равно 20 см, а размеры прикладной рамки 13×18 см. Аналогичные таблицы можно составить и для других фототеодолитов.

Пусть ошибки элементов ориентирования снимков не выходят за пределы, указанные в табл. 3, и положение точек объекта получено по различным стереопарам. Полагая, что в этом случае ошибки величин x, z и p, вызванные погрешностями ориентирования снимков, являются случайными, подсчитаем средние квадратические ошибки определения этих величин по формулам

$$m'_x = \sqrt{m_x^2 + \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \ldots};$$

$$m'_z = \sqrt{m_z^2 + \Delta z_1^2 + \Delta z_2^2 + \ldots};$$

$$m'_p = \sqrt{m_p^2 + \Delta p_1^2 + \Delta p_2^2 + \ldots},$$

где m_x, m_z, m_p — ошибки измерения, а остальные ошибки в правых частях этих формул вызваны погрешностями элементов ориентирования снимков.

Подставив в эти формулы значения соответствующих ошибок, приведенные в табл. 3, получим

$$m'_x = \pm 20 \text{ мкм}, \quad m'_z = \pm 20 \text{ мкм}, \quad m'_p = \pm 10 \text{ мкм}.$$

Чтобы подсчитать точность определения положения точек объекта, например местности, методом наземной стереосъемки, подставим в (6.1) вместо m_x, m_z, m_p найденные значения m'_x, m'_z, m'_p. Тогда для приведенного выше случая: $b = 375$ м, $x_1 = 50$ мм, $z_1 = 40$ мм, $m_b/b = 1/2000$ и $Y = 7{,}5$ км получим средние квадратические ошибки координат определяемых точек, указанные в табл. 4.

Таблица 4

Ошибки, м	ψ	
	100^g	$65^g(135^g)$
m_X	±2.1	±2,6
m_Y	8,3	10,1
m_Z	1,9	2,6

Такую точность можно получить при обработке снимков аналитическим способом. Графический и графомеханический способы обработки сопровождаются дополнительными погрешностями, зависящими от точности графических построений и точности используемых приборов.

Итак, мы нашли значения ошибок элементов ориентирования снимков, которые можно считать допустимыми с точки зрения теории. На практике ошибки элементов внутреннего ориентирования, как правило, малы и не выходят за указанные выше пределы, так как эти элементы определяются с высокой точностью и достаточно устойчивы в процессе полевых работ. Ошибки элементов внешнего ориентирования снимков часто превышают теоретические допуски. Поэтому возникает необходимость определения этих ошибок с целью исключения их влияния на результаты обработки снимков. Такая задача решается по контрольным направлениям или по контрольным точкам.

§ 33. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОШИБОК ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПО КОНТРОЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ

Даже при весьма тщательной установке фотокамеры действительные элементы внешнего ориентирования снимка отличаются от заданных. Это объясняется не только погрешностями приспособлений, при помощи которых ориентируется фотокамера, но и условиями полевых работ. Например, резкий порыв ветра в момент фотографирования местности может изменить установку камеры.

Найдем ошибки элементов внешнего ориентирования $\Delta\psi$, $\Delta\omega$ и $\Delta\varkappa$, полагая, что погрешности элементов внутреннего ориентирования отсутствуют.

Для решения этой задачи используем формулы (6.5), в которых Δx и Δz —разности измеренных координат x, z точки снимка и теоретических координат x^0, z^0 той же точки.

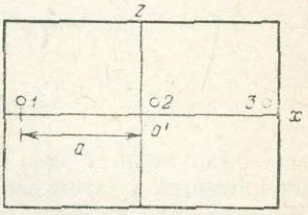


Рис. 63

Координаты x^0 и z^0 соответствуют заданным элементам ориентирования и могут быть определены, если измерено контрольное направление в точке фотографирования. Выберем какую-либо удаленную точку местности, которую можно легко опознать на снимке, и измерим в точке фотографирования вертикальный угол β направления на эту точку и горизонтальный угол ψ' между этим направлением и базисом. Тогда по формулам (6.2) найдем

$$x^0 = f \operatorname{tg} \lambda;\ z^0 = \frac{f}{\cos \lambda} \operatorname{tg} \beta,$$

где $\lambda = \psi - \psi'$. Затем измерим координаты x и z изображения выбранной точки, вычислим разности Δx и Δz и составим уравнение (6.2).

Одно контрольное направление дает два уравнения (6.2) с тремя неизвестными. Следовательно, для определения неизвестных $\Delta\psi$, $\Delta\omega$ и $\Delta\varkappa$ необходимо измерить не менее двух контрольных направлений.

Пусть измерено три контрольных направления. При этом точки снимка, соответствующие этим направлениям, находятся, как показано на рис. 63, близко к оси x, точки *1* и *3* — на краях снимка, а точка *2* — в центральной части. Выпишем приближенные значения координат этих точек: *1* $(-a, 0)$, *2* $(0, 0)$ и *3* $(a, 0)$ и составим уравнения (6.5) для определения величин $\Delta\psi$, $\Delta\omega$ и $\Delta\varkappa$

$$1.\ f\Delta\psi + \frac{a^2}{f}\Delta\psi - \Delta x_1 = 0,$$

$$2.\ f\Delta\psi \qquad\qquad - \Delta x_2 = 0,$$

$$3.\ f\Delta\psi + \frac{a^2}{f}\Delta\psi - \Delta x_3 = 0,$$

$$4.\ -f\Delta\omega + a\Delta\varkappa - \Delta z_1 = 0,$$

$$5.\ -f\Delta\omega \qquad\qquad - \Delta z_2 = 0,$$

$$6.\ -f\Delta\omega - a\Delta\varkappa - \Delta z_3 = 0.$$

Решив эти уравнения, найдем

$$\left.\begin{aligned} \Delta\psi &= \frac{\Delta x_2}{f} = \frac{f}{2f^2+a^2}(\Delta x_1 + \Delta x_2) \\ \Delta\omega &= \frac{-\Delta z_2}{f} = \frac{\Delta z_1 + \Delta z_3}{2f} \\ \Delta\varkappa &= \frac{\Delta z_1 - \Delta z_3}{2a} \end{aligned}\right\}. \tag{6.7}$$

Ошибки угловых элементов внешнего ориентирования снимка можно определить по способу наименьших квадратов с оценкой точности результатов. В этом случае уравнения (6.5) принимают вид

$$\left.\begin{aligned} \left(f+\frac{x^2}{f}\right)\Delta\psi - \frac{xz}{f}\Delta\omega + z\,\Delta\varkappa - \Delta x = v' \\ \frac{xz}{f}\Delta\psi - \left(f+\frac{z^2}{f}\right)\Delta\omega - x\,\Delta\varkappa - \Delta z = v'' \end{aligned}\right\}. \tag{6.8}$$

Зная ошибки $\Delta\psi$, $\Delta\omega$ и $\Delta\varkappa$, можно по формулам (6.5) и (6.6) подсчитать их влияние, а затем исключить это влияние из результатов измерений снимков. Из этих трех ошибок наиболее существенное влияние на результаты обработки снимков оказывают первые две. Поэтому на практике часто, пренебрегая ошибкой $\Delta\varkappa$, измеряют только одно контрольное направление, проходящее через центральную часть снимка (точка 2 на рис. 63).

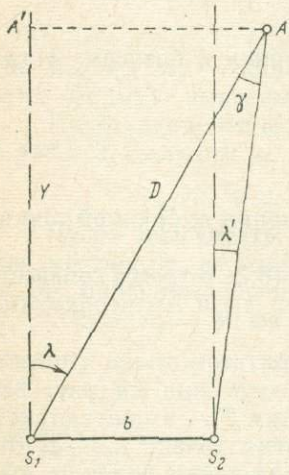


Рис. 64

§ 34. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОШИБОК ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПО КОНТРОЛЬНЫМ ТОЧКАМ

При обработке снимков на стереоавтографе влияние ошибок элементов внешнего ориентирования исключается обычно по контрольным точкам.

Из формул (6.1) и табл. 4 следует, что ошибки элементов внешнего ориентирования действуют главным образом на фотограмметрическую координату Y определяемой точки.

Исследуем влияние ошибки базиса Δb, ошибки конвергенции $\Delta\gamma$ и ошибки отклонения оси камеры $\Delta\psi$ на координату Y.

Пусть с точек S_1 и S_2 произведена съемка местности (рис. 64). При этом элементы внешнего ориентирования ω и $\varkappa$ равны нулю. A — определяемая точка, λ — угол отклонения направления S_1A от нормали к базису. Из рисунка следует

$$Y = D\cos\lambda,$$

где $D = S_1A$ и определяется из треугольника S_1S_2A

$$D = b\,\frac{\cos\lambda'}{\sin\gamma}.$$

Здесь γ — параллактический угол, а λ' — отклонение направления S_2A от нормали к базису.

Полагая, что угол γ мал, напишем

$$D = b\frac{\cos\lambda}{\gamma}.$$

Следовательно,

$$Y = b\frac{\cos^2\lambda}{\gamma}.$$

Продифференцируем это выражение по всем переменным

$$dY = \frac{db}{\gamma}\cos^2\lambda - \frac{b}{\gamma^2}\cos^2\lambda\, d\gamma - 2\frac{b}{\gamma}\cos\lambda\sin\lambda\, d\lambda.$$

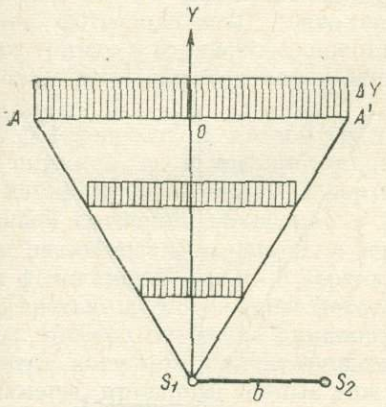


Рис. 65

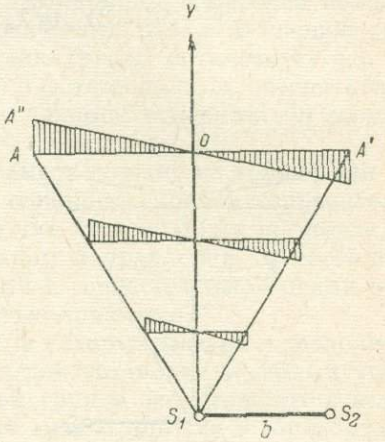


Рис. 66

Введем сюда Y, заменим $d\lambda$ на $d\psi$ и перейдем к конечным приращениям. Получим

$$\Delta Y = Y\frac{\Delta b}{b} - Y^2\frac{\Delta\gamma}{b\cos^2\lambda} + 2Y\operatorname{tg}\lambda\,\Delta\psi. \qquad (6.9)$$

Отсюда следует, что ошибка ΔY, обусловленная ошибкой базиса, пропорциональна отстоянию и обратно пропорциональна базису. На рис. 65 показано влияние ошибки базиса на ближнем, среднем и дальнем плане.

Ошибка отклонения оси камеры действует пропорционально отстоянию и тангенсу угла λ между перпендикуляром к базису и направлением на определяемую точку (рис. 66). Для точек, расположенных на прямой, параллельной базису, величина ΔY, обусловленная ошибкой $\Delta\psi$, пропорциональна $\operatorname{tg}\lambda$.

Влияние ошибки конвергенции $\Delta\gamma$ пропорционально квадрату отстояния Y и обратно пропорционально базису и квадрату косинуса угла λ (рис. 67). Кривая, выражающая это влияние для точек, лежащих, например, на прямой AA', параллельной базису, представляет собой параболу, координаты вершины которой

$$x_0 = 0,\ y_0 = -\frac{Y^2}{b}\Delta\gamma,$$

а координаты фокуса

$$x_F = 0,\ y_F = y_0 - \frac{b}{4\,\Delta\gamma},$$

при этом ось x совпадает с прямой AA', а ось y — с осью Y.

Пусть имеем три контрольные точки, расположенные, как показано на рис. 68. Вычислим их координаты Y и погрешности ΔY, а затем составим три уравнения (6.9)

$$\begin{aligned}
&\frac{Y_1}{b}\Delta b - \frac{Y_1^2}{b}\Delta\gamma - \Delta Y_1 = 0;\\
&\frac{Y_2}{b}\Delta b - \frac{Y_2^2}{b}\Delta\gamma - \Delta Y_2 = 0;\\
&\frac{Y_3}{b}\Delta b + 2Y_3\,\mathrm{tg}\,\lambda_3\,\Delta\psi - \frac{Y_3^2}{b\cos^2\lambda_3}\Delta\gamma - \Delta Y_3 = 0.
\end{aligned}$$

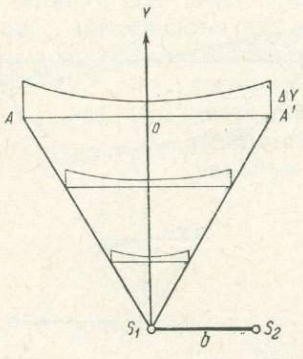


Рис. 67

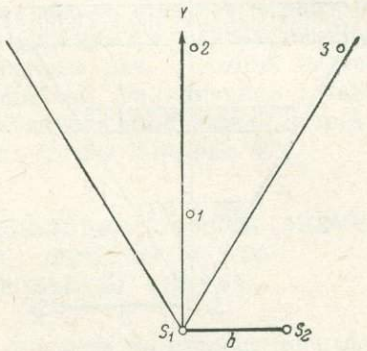


Рис. 68

В результате решения этих уравнений получим

$$\left.\begin{aligned}
\Delta\gamma &= \frac{b}{Y_2 - Y_1}\left(\frac{\Delta Y_1}{Y_1} - \frac{\Delta Y_2}{Y_2}\right)\\
\Delta b &= \frac{b}{Y_2 - Y_1}\left(\frac{Y_2}{Y_1}\Delta Y_1 - \frac{Y_1}{Y_2}\Delta Y_2\right)\\
\Delta\psi &= \frac{1}{2(Y_2 - Y_1)\,\mathrm{tg}\,\lambda_3}\left(\frac{Y_1}{Y_2}\Delta Y_2 - \frac{Y_2}{Y_1}\Delta Y_1\right) +\\
&+ \frac{Y_3}{(Y_2 - Y_1)\sin 2\lambda}\left(\frac{\Delta Y_1}{Y_1} - \frac{\Delta Y_2}{Y_2}\right) + \frac{\Delta Y_3}{2Y_3\,\mathrm{tg}\,\lambda_3}
\end{aligned}\right\}. \qquad (6.10)$$

Если дано четыре или больше опорных точек, то задачу можно решить по способу наименьших квадратов.

Обычно величины Δb, $\Delta\psi$ и $\Delta\gamma$ определяются и вводятся в прибор методом последовательных приближений.

Глава 7

ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ В ТОПОГРАФИИ

§ 35. ФОТОТЕОДОЛИТЫ

Фототеодолит состоит из фотокамеры и теодолита и служит для фотографирования местности при заданных значениях угловых элементов внешнего ориентирования, а также для измерения горизонтальных и вертикальных углов с целью определения координат левой или правой точки базиса и контрольных точек, дирекционного угла и длины базиса и контрольных направлений.

Фототеодолиты разделяются на три группы. К первой группе относятся фототеодолиты, в которых фотокамера и теодолит соединены между собой. Теодолит в этих приборах служит и для установки фотокамеры в рабочее положение на концах базиса и для выполнения геодезических работ. В первой группе имеются фототеодолиты, позволяющие устанавливать оптическую ось фотокамеры только в горизонтальное положение, и фототеодолиты, обеспечивающие установку этой оси под заданными углами наклона относительно плоскости горизонта.

В фототеодолитах второй группы фотокамера служит не только для получения снимков, но и как зрительная труба теодолита, причем горизонтальные углы измеряются по кругу, а вертикальные или по кругу или по шкале, учитывающей смещение объектива в вертикальном направлении. В соответствии с этим различают фотокамеры с вертикальной и горизонтальной осями вращения и фотокамеры только с вертикальной осью вращения.

В третью группу входят фототеодолиты, в которых камера и теодолит разделены. Камера снабжена приспособлениями для установки заданных угловых элементов внешнего ориентирования. В этой группе фототеодолитов имеются фотокамеры, приспособленные для установки оптической оси в горизонтальное или вертикальное положение, и камеры, позволяющие устанавливать эту ось в наклонное положение. В отдельных фотокамерах, имеющих только вертикальную ось вращения, объектив можно перемещать параллельно этой оси при фотографировании горных вершин и долин. Такое смещение объектива, как и наклон камеры вокруг горизонтальной оси, расширяет возможности фотографирования горных и особенно высокогорных районов.

С экономической точки зрения более эффективными являются фототеодолиты третьей группы, позволяющие одновременно производить и фотографирование местности и геодезические работы.

Расстояние от базиса фотографирования до определяемых точек местности обычно велико по сравнению с фокусным расстоянием камеры. Поэтому в фототеодолитах прикладную рамку камеры совмещают с главной фокальной плоскостью объектива, в которой получается резкое изображение удаленных объектов. Объективы фототеодолитных камер имеют небольшую светосилу, так как при фотографировании местности эта камера неподвижна в отличие от аэрофотоаппарата. Обладая высокой разрешающей силой, объективы фототеодолитов практически свободны от дисторсии. Чтобы исключить деформацию фотоизображения, в наземной фотограмметрии применяют фотопластинки. В связи с изготовлением слабо деформирующейся фотопленки появились фототеодолиты, позволяющие снимать как на фотопластинки, так и на фотопленку. Светочувствительность фотоматериалов обычно мала, но разрешающая способность их высокая и соответствует разрешающей силе объектива.

Высокие требования предъявляются к плоскостности фотопластинок и к выравниванию фотопленки в плоскости прикладной рамки фотокамеры. Ошибки координат точки снимка, вызванные уклонениями светочувствительного слоя от плоскости прикладной рамки, не должны превышать погрешностей измерения этих величин на стереокомпараторе.

Фототеодолит завода «Геодезия». Советский фототеодолит, изготовленный на заводе «Геодезия», относится к фототеодолитам третьей группы.

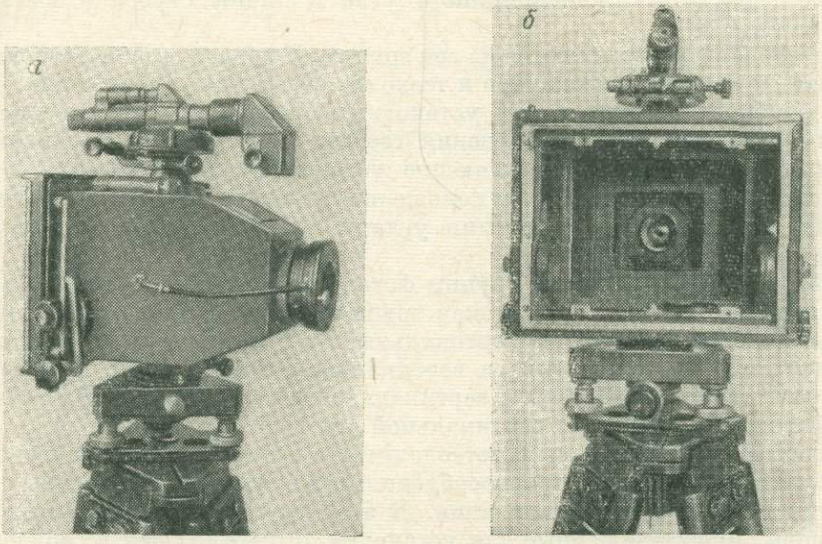


Рис. 69

Фотокамера (рис. 69) сделана из легкого металла. Для прочности она имеет внутри ребра жесткости. В передней части камеры находится объектив «Ортоанастигмат», снабженный тремя светофильтрами — желтым, оранжевым и красным — и затвором, состоящим из двух ламелей, которые приводятся в движение при помощи спускового тросика.

В плоскости прикладной рамки фотокамеры установлены четыре координатные метки и метки, указывающие средние линии перекрытий на смежных снимках, полученных с одной и той же точки стояния при направлениях оптической оси камеры, пересекающихся под углом 35^g. По этим линиям снимки разрезают при составлении фотопанорамы. В правой части прикладной рамки имеется счетчик, который фиксирует на пластинке номер станции (от 0 до 99). Он состоит из двух барабанов с прорезными цифрами и двух головок для перевода цифр от руки. С левой стороны прикладной рамки расположен фиксатор для маркировки положения оптической оси камеры относительно базиса фотографирования. Он состоит из барабана с прорезными буквами и головки для установки букв. Буквами A и B отмечаются левый и правый снимки нормального случая съемки. Буквами AL и BL обозначают параллельный случай съемки с отклонением оптической оси влево от перпендикуляра к базису ($\psi > 100^g$), а буквами AR и BR — параллельный случай съемки, когда $\psi < 100^g$.

В нижней части прикладной рамки имеется счетчик для нумерации серий станций. Он состоит из вращающегося барабана с прорезными цифрами от I до XII. К прикладной рамке прикреплена металлическая пластинка с прорезными цифрами для фиксации на снимке фокусного расстояния фотокамеры.

К корпусу фотокамеры прикреплена кассетная рамка, в которую вставляется кассета с фотопластинкой. Фотопластинка плотно прижимается эмульсионным слоем к прикладной рамке при помощи головок, расположенных на общем валике с эксцентриком.

Камера поворачивается вокруг вертикальной оси. Для приведения оси вращения камеры в вертикальное положение служат два цилиндрических уровня и подъемные винты, а для закрепления камеры и медленного вращения ее — закрепительный и микрометренный винты.

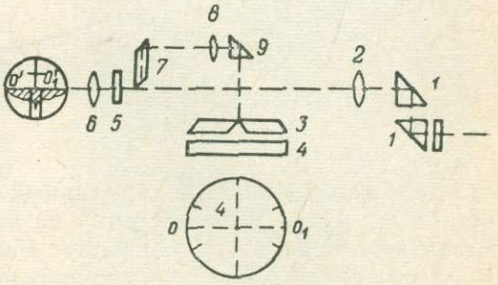


Рис. 70

Ориентирующее приспособление фотокамеры (рис. 70) состоит из лимба, визирной трубы и микроскопа. Лимб расположен на втулке, прикрепленной к корпусу камеры. На посеребренном кольце лимба нанесены четыре пары диаметрально противоположных штрихов. Нулевой диаметр лимба параллелен оси камеры; другие диаметры, проходящие через, штрихи лимба, составляют с осью камеры углы, равные 35 и 100^g. Внутри втулки, к которой прикреплен лимб, вращается стальная ось с визирной трубой и микроскопом. Так как визирная труба не наклоняется, то для визирования на различно расположенные по высоте точки перед объективом трубы установлены две призмы, одна из которых вращается при помощи головки. Труба имеет зажимной и микрометренный винты.

На рис. 70 показана оптическая схема визирной трубы и микроскопа. *2* — объектив трубы, *1* — призмы, *5* — сетка. Микроскоп состоит из объектива *8* и системы призм *3*, *7* и *9*, позволяющих получать изображение штрихов лимба на сетке визирной трубы. Визирная труба и микроскоп имеют общий окуляр *6*. В верхней половине поля зрения окуляра наблюдают изображение штрихов лимба *4*, а в нижней — изображение местности, построенное объективом трубы. Если штрихи o' и o_1', представляющие собой изображения противоположных штрихов o и o_1 лимба, совпадают, как показано на рисунке, то визирная ось трубы параллельна соответствующему диаметру лимба oo_1. При совмещении изображения штрихов лимба, расположенных на диаметре 100^g, визирная ось трубы устанавливается перпендикулярно оптической оси фотокамеры.

Теодолит, входящий в комплект фототеодолита завода «Геодезия», имеет микрометренный винт особого устройства, который называется тангенциальным винтом и служит не только для точного наведения трубы, но и для измерения параллактических углов.

Тангенциальный винт *2* (рис. 71) вращается в гайке *3*, прикрепленной к неподвижному во время измерений лимбу *6*. К концу тангенциального винта прижимается пружиной водильце *4*, прикрепленное к алидаде *5*. Таким образом, при вращении тангенциального винта вместе с трубой поворачивается и алидада. Поступательное движение тангенциального винта может быть измерено с высокой точностью при помощи шкалы *7* и барабана *1*, окружность

которого разделена на 100 частей. Цена одного деления шкалы равна шагу винта — 0,50 мм. Наименьшее расстояние от упора тангенциального винта до вертикальной оси вращения трубы обозначим через k. Это расстояние соответствует отсчету по шкале, равному 20. Величина k равна 100 мм, что составляет 200 делений шкалы или 20 000 делений барабана.

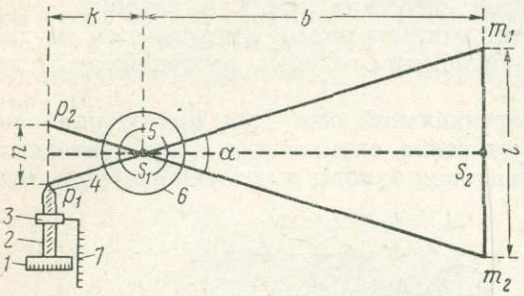


Рис. 71

Пусть в левой точке базиса фотографирования S_1 установлен теодолит, а в правой S_2 — горизонтальная рейка перпендикулярно к направлению базиса. Длину рейки обозначим через l. Горизонтальный лимб теодолита установлен так, чтобы ось тангенциального винта была параллельна рейке. Для этого достаточно установить отсчет по шкале, равный 20, и, вращая лимб, навести трубу на середину рейки. Затем, вращая только тангенциальный винт, последовательно наведем трубу на марки m_1 и m_2, установленные на концах рейки. После каждого наведения отсчитаем по шкале и барабану. Разность отсчетов равна отрезку $n = p_1p_2$ и представляет собой значение параллактического угла α, выраженное в делениях барабана. Как следует из рисунка, горизонтальное проложение базиса

$$b = \frac{kl}{n}. \qquad (7.1)$$

Величина kl называется постоянной фототеодолита, ее можно найти, если измерить величину n для базиса, длина которого известна.

Основные характеристики фототеодолита завода «Геодезия»:

формат снимков	13×18 см
относительное отверстие объектива фотокамеры	1:25
фокусное расстояние	190 мм
состав комплекта — фотокамера, теодолит, две рейки, два штатива, 48 кассет, три подставки, визирная марка, юстировочное приспособление, рекогносцировочная призма	
масса комплекта	75 кг

Фототеодолит Photheo 19/1318 разработан фирмой Цейсса и относится к фототеодолитам третьей группы, т. е. состоит из двух самостоятельных частей — фотокамеры и теодолита.

Фотокамера (рис. 72) представляет собой жесткую конструкцию. Она снабжена объективом, который можно перемещать параллельно вертикальной оси вращения фотокамеры. Вместе с объективом перемещается оптическая трубка, проектирующая на плоскость прикладной рамки штрих, отмечающий главную горизонталь. В плоскости прикладной рамки имеются две координатные метки, фиксирующие главную вертикаль, и две координатные метки, отмечающие главную горизонталь при начальной установке объектива. Эти метки определяют положение координатной системы на снимке. Около плоскости прикладной

ной рамки находятся: пластинка с пробитыми цифрами, показывающими фокусное расстояние фотокамеры; счетчик станций — от 0 до 99, состоящий из двух вращающихся барабанов с пробитыми цифрами, и вращающийся барабан с пробитыми буквами для маркировки основных случаев съемки. Кроме того, в плоскости прикладной рамки имеются четыре метки, отмечающие линии, по которым разрезаются снимки при монтаже фотопанорамы. Ось вращения фотокамеры приводится в вертикальное положение при помощи подъемных винтов и цилиндрических уровней.

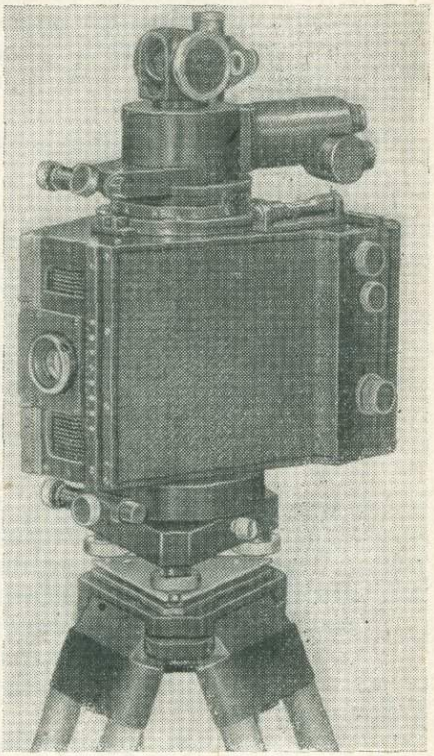


Рис. 72

На фотокамере расположено ориентировочное приспособление, которое служит для установки оптической оси фотокамеры под заданным углом относительно базиса фотографирования. Оно состоит из визирной трубы, лимба и микроскопа. Визирная труба и микроскоп вращаются вокруг вертикальной оси, совпадающей с осью вращения фотокамеры и проходящей через центр лимба. Наклон визирного луча производится при помощи призмы, установленной перед объективом трубы. На кожухе ориентировочного приспособления нанесены штрих и буквы, соответствующие нормальному случаю съемки — *A* и *B* и двум параллельным с отклонением оптической оси фотокамеры влево — *AL* и *BL* и вправо — *AR* и *BR*. Ориентировочное приспособление можно использовать и для измерения горизонтальных и вертикальных углов.

Теодолит — тахеометр Theo 030 служит для выполнения геодезических работ, связанных с определением положения точек фотографирования, контрольных точек и контрольных направлений, а также для измерения параллактических углов при определении длины базиса по горизонтальной рейке.

Основные характеристики фототеодолита 19/1318:

формат снимков	13×18 см
относительное отверстие объектива фотокамеры	1 : 25
перемещение объектива относительно начального положения: вниз на 40 мм, вверх на 30 мм	
фокусное расстояние фотокамеры	190 мм
точность отсчетов по горизонтальному и вертикальному лимбам теодолита	± 1^{c}
увеличение визирной трубы теодолита	21 *
состав комплекта — фотокамера, теодолит, рейка, три штатива, 24 кассеты, три подставки с визирными марками, юстировочное приспособление.	

§ 36. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНУТРЕННЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

В гл. 5 изложен способ определения элементов внешнего и внутреннего ориентирования снимка по опорным точкам.

Элементы внутреннего ориентирования фотокамеры определяются обычно не по опорным точкам, а по горизонтальным и вертикальным углам, измеренным в точке фотографирования.

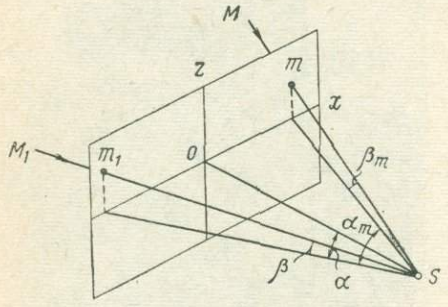


Рис. 73

Пусть при заданном горизонтальном положении оптической оси фотокамеры и координатной оси x плоскости прикладной рамки ($\omega = \varkappa = 0$) получен снимок P, на котором изобразились хорошо видимые местные предметы, например тригонометрические знаки (рис. 73). Измерим в точке фотографирования горизонтальные и вертикальные углы, делая наведения на те же предметы. С целью упрощения обработки результатов измерений углы измерим по возможности точнее, чтобы их можно было считать безошибочными.

На рисунке представлены: M_1 — начальный пункт на местности, SM_1 — начальное направление из серии измеренных направлений, α_m и β_m — измеренные горизонтальный и вертикальный углы. Угол α определяет направление оптической оси фотокамеры в серии измеренных направлений.

Координаты точки m снимка

$$\left.\begin{aligned} x &= f \operatorname{tg}(\alpha_m - \alpha) \\ z &= f \sec(\alpha_m - \alpha) \operatorname{tg}\beta \end{aligned}\right\}. \tag{7.2}$$

Пусть известно приближенное значение фокусного расстояния f_0 фотокамеры. Вычислим по (7.2) координаты точки m

$$\left.\begin{aligned} x_B &= f_0 \operatorname{tg}(\alpha_m - \alpha) \\ z_B &= f_0 \sec(\alpha_m - \alpha) \operatorname{tg}\beta \end{aligned}\right\}. \tag{7.3}$$

Необходимый для этого угол α можно найти по формуле

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{x_1}{f},$$

где x_1 — координата точки m_1.

Теперь измерим координаты точки m и обозначим их через x_u и z_u. Очевидно, что вычисленные координаты не будут равны измеренным

$$\left.\begin{aligned} x_u - x_B &= \Delta x \\ z_u - z_B &= \Delta z \end{aligned}\right\}. \tag{а}$$

При этом, пренебрегая ошибками измерений, можно считать, что разности Δx и Δz обусловлены элементами внутреннего ориентирования x_0 и z_0, ошибками элементов внешнего ориентирования α, ω, $\varkappa$, а также несоответствием двух значений фокусного расстояния, принятого при вычислениях и действительного.

Дифференцируя (7.2) по f, найдем, что изменения координат x и z, вызванные Δf, будут

$$\operatorname{tg}(\alpha_m - \alpha)\,\Delta f \text{ и } \sec(\alpha_m - \alpha)\operatorname{tg}\beta_m\,\Delta f,$$

или

$$\frac{x}{f}\Delta f \text{ и } \frac{z}{f}\Delta f.$$

Таким образом, влияние элементов внутреннего ориентирования на координаты x и z можно представить так:

$$\left.\begin{aligned} \Delta x &= x_0 + \frac{x}{f}\Delta f \\ \Delta z &= z_0 + \frac{z}{f}\Delta f \end{aligned}\right\}. \qquad (б)$$

Совместное влияние ошибок элементов внутреннего и внешнего ориентирования получим, если сложим правые части равенств (б) и (6.5), учитывая при этом, что $\Delta\psi = -\Delta\alpha$,

$$\left.\begin{aligned} \Delta x &= x_0 + \frac{x}{f}\Delta f - \left(f + \frac{x^2}{f}\right)\Delta\alpha - \frac{xz}{f}\Delta\omega + z\,\Delta\varkappa \\ \Delta z &= z_0 + \frac{z}{f}\Delta f - \left(f + \frac{z^2}{f}\right)\Delta\omega - \frac{xz}{f}\Delta\alpha - x\,\Delta\varkappa \end{aligned}\right\}. \qquad (7.4)$$

Подставим Δx и Δz в (а) и, полагая, что имеются избыточные измерения, напишем эти уравнения в виде

$$\left.\begin{aligned} x_0 + \frac{x}{f}\Delta f - \left(f + \frac{x^2}{f}\right)\Delta\alpha - \frac{xz}{f}\Delta\omega + z\,\Delta\varkappa + x_в - x_и &= v' \\ z_0 + \frac{z}{f}\Delta f - \frac{xz}{f}\Delta\alpha - \left(f + \frac{z^2}{f}\right)\Delta\omega - x\,\Delta\varkappa + z_в - z_и &= v'' \end{aligned}\right\}. \qquad (7.5)$$

Итак, две точки снимка позволяют составить два уравнения с шестью неизвестными. Каждая следующая точка дает два новых уравнения. Поэтому для определения элементов внутреннего ориентирования данным способом необходимо иметь не менее четырех точек. Если число точек больше четырех, то задача может быть решена по способу наименьших квадратов с оценкой точности результата.

На снимке равнинной местности наблюденные точки находятся близко к оси x, вследствие чего координата z является малой величиной и члены уравнений (7.5), имеющие коэффициент z, принимают значения членов второго порядка, а влияние их становится незначительным. В этом случае уравнения (7.5) принимают вид

$$\left.\begin{aligned} x_0 + \frac{x}{f}\Delta f - \left(f + \frac{x^2}{f}\right)\Delta\alpha + x_в - x_и &= v' \\ z_0 - f\,\Delta\omega - x\,\Delta\varkappa + (z_в - z_и) &= v'' \end{aligned}\right\}. \qquad (7.6)$$

Эти уравнения содержат разные неизвестные, а поэтому возможно раздельное решение задачи: уравнения, составленные по типу первого уравнения, позволяют найти x_0, Δf, $\Delta\alpha$, а из уравнений, составленных по типу второго уравнения, можно найти z_0, $\Delta\omega$, $\Delta\varkappa$. Разделить неизвестные z_0 и $f\,\Delta\omega$ в данном случае невозможно, так как коэффициенты при них пропорциональные.

Следовательно, при расположении точек вблизи оси x величину z_0 можно определить только тогда, когда $\Delta\omega$ известно.

Для вычислений полезно все размеры выразить в десятых долях миллиметра и ввести следующие обозначения:

$$\left.\begin{aligned} &-x_0+f\Delta\alpha=\xi; \quad -\frac{x}{1000}=b \\ &\frac{\Delta\alpha}{10}=\zeta; \quad x_в-x_и=l' \\ &1000\,\Delta\varkappa=\eta; \quad z_b-z_и=l'' \\ &\frac{10x^2}{f\rho'}=c; \quad \frac{x}{f}=a \end{aligned}\right\}. \tag{7.7}$$

Тогда уравнения (7.6) можно написать так:

$$\left.\begin{aligned} &-\xi+a\,\Delta f-c\zeta+l'=v' \\ &z_0+b\eta+l''=v'' \end{aligned}\right\}. \tag{7.8}$$

Рассмотренный выше способ определения элементов внутреннего ориентирования предложен Н. А. Урмаевым и относится к полевым способам. Параметры фотокамеры можно найти и другими полевыми способами, например по перекрывающимся снимкам, полученным с одной и той же станции (А. Н. Лобанов, М. Н. Ютанов) или по снимку звездного неба (Я. Л. Зиман и др.).

Кроме полевых способов для определения параметров фотокамеры имеются и камеральные, основанные на применении оптической скамьи или системы коллиматоров. Эти способы изложены в курсе аэрофотосъемки. Одновременно с определением элементов ориентирования можно найти и дисторсию объектива фотокамеры (М. Д. Коншин, В. Г. Афремов).

§ 37. ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ

К полевым работам, выполняемым при фототеодолитной съемке, относятся: подготовительные работы, рекогносцировка, фотографирование местности, геодезические и фотолабораторные работы.

В подготовительные работы входят: сбор и анализ картографических и геодезических материалов на район съемки, составление технического проекта на производство полевых и камеральных работ и поверки фототеодолитов. Технический проект оформляется на карте, на которой показываются геодезические пункты, новые пункты опорной сети, фототеодолитные станции и контрольные точки.

Задача рекогносцировки — установить на местности наличие пунктов триангуляции и уточнить расположение новых пунктов опорной сети, фототеодолитных станций и контрольных точек. Кроме того, в результате рекогносцировки выбираются наиболее эффективные для данных условий способы определения новых пунктов, станций и контрольных точек. Густота опорной геодезической сети должна обеспечивать возможность определения левых или правых точек базисов фотографирования и контрольных точек. Пункты опорной сети обозначают знаками, изготовленными из материала, имеющегося на участке работ. Эти пункты и концы базисов фотографирования, на которых установлены знаки, могут служить контрольными точками. Чтобы знаки были отчетливо видны на снимках, их окрашивают в белый или черный цвет в зависимости

от фона, на который они проектируются. В качестве контрольных точек можно использовать и отдельные выдающиеся вершины гор, отдельно стоящие деревья, местные предметы.

Выбирая фототеодолитные станции, стремятся к тому, чтобы количество их было минимальным и обеспечивалась возможность фотографирования всей территории, подлежащей съемке. С целью уменьшения количества станций выгодно фотографировать на большие расстояния. Предельное расстояние, на которое можно фотографировать, зависит от масштаба съемки, рельефа местности, качества фотоматериалов и условий видимости. Невозможно дать точные правила для определения этого расстояния в каждом частном случае. Опыт показывает, что при наличии фотоматериалов хорошего качества можно допускать дальности съемки 1, 2 и 5 км для масштабов карты 1 : 2000, 1 : 5000 и 1 : 10 000 соответственно. Если дальность съемки выходит за эти пределы, то на снимках не изобразятся подробности, которые должны быть отражены на карте.

Чтобы заснять возможно большую область, на каждой станции получают обычно три стереопары: одну при нормальном положении оптической оси фотокамеры относительно базиса и две при равномерном отклонении этой оси вправо и влево. Направление базиса фотографирования следует выбирать так, чтобы на стереопаре, соответствующей нормальному случаю съемки, изобразилась середина области, подлежащей фотографированию.

Концы базиса фотографирования должны располагаться приблизительно на одной и той же высоте. Согласно (4.32) и (4.33) разность высот концов базиса вызывает на снимках поперечный параллакс, который служит причиной зрительного параллакса, возникающего при наблюдении стереопары. Хотя в стереоавтографе 1318 Цейсса этот параллакс исключается с помощью второй линейки высот, все же целесообразно не допускать углы наклона базиса больше 10°. В противном случае будут затруднены стереоскопические наблюдения снимков.

Для определения необходимой длины базиса фотографирования используем формулу (4.17)

$$Y = b\frac{f}{p},$$

отсюда

$$b = Y\frac{p}{f}. \qquad \text{(а)}$$

Здесь Y — максимальное отстояние. Потребуем, чтобы значение продольного параллакса p соответствовало заданной точности карты. Известно, что точность определения точек дальнего плана зависит в основном от ошибки продольного параллакса. Поэтому можно написать

$$m_Y = b\frac{f}{p^2}m_p = Y\frac{m_p}{p},$$

отсюда

$$p = \frac{Y}{m_Y}m_p.$$

Подставив это значение p в равенство (а), найдем

$$b = Y^2\frac{m_p}{m_Y f}. \qquad (7.9)$$

По этой формуле подсчитывают необходимую длину базиса, полагая, что m_Y — ошибка на местности, соответствующая допустимой ошибке на карте.

Пусть масштаб карты 1 : 10 000, $m_p = \pm 0{,}01$ мм, $m_Y = \pm 4$ м, $f = 200$ мм. Тогда, выражая Y в километрах, а b в метрах, найдем

$$b = 12Y^2. \tag{7.10}$$

Если максимальное отстояние $Y = 5$ км, то необходимая длина базиса в этом случае равна 300 м.

Контрольные точки необходимы, как известно из гл. 6, для исключения влияния ошибок элементов внешнего ориентирования. Чтобы найти ошибки наклона и отклонения оси камеры и ошибку базиса, требуется не менее трех контрольных точек (см. рис. 68). Если измерение базиса фотографирования проконтролировано, можно ограничиться двумя контрольными точками, расположенными на дальнем плане.

Фотографирование местности производят по направлению освещения: утром — на запад, вечером — на восток, в полдень — в любую сторону. Не рекомендуется производить съемку при переменной облачности, так как переменное освещение местности затрудняет расчет выдержки и снижает качество негатива. В этом случае можно фотографировать только в ту сторону, где нет теней от облаков. Если небо равномерно затянуто облаками, то фотографировать можно в любое время дня и в любом направлении.

Перед фотографированием в фотокамере устанавливают номер станции и условное обозначение направления оптической оси. Затем фотокамеру устанавливают по заданным элементам внешнего ориентирования. Этот процесс должен быть выполнен с возможно высокой точностью. После съемки необходимо убедиться в том, что установленные элементы ориентирования остались без изменения. При этом стремятся к тому, чтобы уклонения действительных элементов внешнего ориентирования от заданных не превышали пределов, установленных в гл. 6.

Геодезические работы на станции включают: определение положении левой точки базиса, азимута его и угла наклона; измерение длины базиса и направлений на контрольные точки.

Фотолабораторные работы заключаются в проявлении, фиксировании и сушке снимков, а также в изготовлении контактных отпечатков, на которых *отмечаются контрольные точки и наносятся результаты дешифрирования.*

§ 38. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ РАЗРЕЖЕННОМ ОБОСНОВАНИИ СЪЕМКИ

Трудоемкость полного съемочного обоснования составляет 50—70% всех затрат труда на создание топографической карты по наземным снимкам. Объем полевых работ значительно сокращается, если в поле строится разреженная геодезическая сеть, а затем в камеральных условиях она сгущается по фототеодолитным снимкам.

Для сгущения съемочного обоснования применяют различные способы: прямую и обратную засечки, фототриангуляцию и фотополигонометрию.

Прямая и обратная засечки в зависимости от требуемой точности сгущения опорной сети могут осуществляться графически, графомеханически или аналитически. При этом затраты труда на геодезические работы сокращаются почти в два раза (А. А. Смирнов, А. Г. Ванин). Более значительный эффект обеспе-

чивают фототриангуляция и фотополигонометрия. В гл. 5 изложен один из способов фототриангулирования, основанный на использовании одиночных связок.

Ю. П. Киенко [14] разработал новый способ фототриангуляции, в котором использован метод геодезических засечек, предложенный А. И. Дурневым (рис. 74). Фототеодолитные станции выбирают изложенным выше способом.

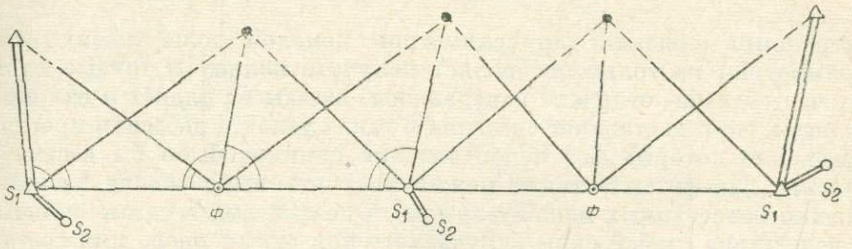


Рис. 74

С каждой станции помимо обычного фотографирования производится панорамная съемка, чтобы получить снимки всей обозреваемой местности. Для фототриангуляции необходимо иметь тройное перекрытие секторов фотографирования. В связи с этим используются одиночные фототеодолитные станции $Ф$, которые выбирают и маркируют так, чтобы обеспечить видимость на смежные станции для определения углов. Длины сторон сети и их дирекционные углы, а также точность сети определяют по формулам, известным из геодезии. Углы между сторонами сети находят по снимкам. Этот способ позволил снизить удельный вес полевых геодезических измерений по затратам труда в полном комплексе фототеодолитных работ до 25—30% при общем уменьшении трудоемкости наземной стереофотограмметрической съемки на 20—25%.

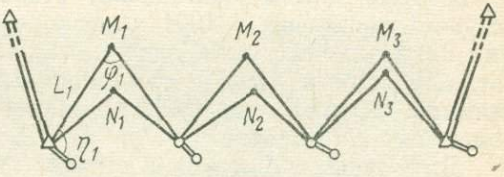


Рис. 75

Способ фототеодолитной полигонометрии, разработанный также Ю. П. Киенко, основан на использовании общих точек M_i и N_i смежных стереопар (рис. 75). Стороны L_i хода вычисляются по фотограмметрическим координатам общих точек. Углы η_i и φ_i находятся по результатам измерения снимков на стереокомпараторе. Зная линейные и угловые элементы полигонометрического хода, вычисляют координаты фототеодолитных станций и общих точек по формулам, применяемым в геодезии. Окончательные координаты фототеодолитных станций можно получить из совместного уравнивания двух и более ходов фотополигонометрии.

Высоты точек хода получают по превышениям связующих точек относительно фототеодолитных станций. При этом превышения уравниваются, как в ходе геодезического нивелирования между двумя твердыми точками.

Глава 8.

ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕТОПОГРАФИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

§ 39. НАЗЕМНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ В АСТРОНОМИИ

Астрономия обязана фотограмметрии немалой долей своих открытий. Фотограмметрия не только позволяет получать полные и точные карты различных частей неба, отличать неподвижные звезды от планет и открывать новые планеты, но и доставляет сведения о таких телах в небесном пространстве, существование которых без использования снимков было бы весьма трудно обнаружить. На фотопластинке можно получить изображение небесных тел, совершенно недоступных нашему зрению и незаметных в самые сильные телескопы вследствие слабой силы излучаемого или отраженного ими света.

В 1887 г. Международный астрофизический конгресс в Париже постановил составить карту неба фотограмметрическим методом. Вся съемка карты небесного свода была разделена между 18 обсерваториями, расположенными в различных точках Северного и Южного полушарий, и для каждой из них определена зона работы.

Изучение падающих звезд производится также по снимкам. Фотограмметрический метод позволяет точно определить радиационную точку, т. е. то место неба, от которого исходит метеорит, направление и скорость его движения.

Первые опыты применения стереофотограмметрии в астрономии были успешно проведены в 1901 г., вскоре после изобретения стереокомпаратора. Они показали, что такие задачи, как отыскание и идентификация малых планет, переменных звезд и туманностей, а также определение дефектов самих снимков, решаются на стереокомпараторе значительно легче, чем на любом монокулярном приборе.

Для стереоскопической съемки звездного мира существенное значение имеет радиус стереоскопического восприятия. Чтобы увеличить этот радиус, фотографируют длиннофокусным аппаратом, а снимки наблюдают при помощи приборов с большим увеличением. Однако лучший эффект дает увеличение базиса фотографирования, что достигается путем съемки звездного пространства в различное время. В этом случае вследствие движения Земли два последовательных снимка получаются с различных точек, находящихся на значительном расстоянии одна от другой. Например, если промежуток времени составляет полгода, то базис фотографирования равен диаметру земной орбиты. Если снимать с такого базиса камерой с фокусным расстоянием 3,4 м, а обработку снимков производить на стереокомпараторе, то радиус стереоскопического восприятия равен 23 световым годам, что составляет 1,5 млн. солнечных расстояний.

Опыты изучения по снимкам поверхности Солнца показали, что стереофотограмметрический метод исследования солнечных пятен имеет значение бóльше для изучения их величины и изменяемости, чем для определения их глубин.

По стереопарам Луны, полученным с Земли, измерены высоты стен и глубины отдельных кратеров и составлены карты лунной поверхности.

В 1966 г. советская автоматическая станция «Луна-9» совершила мягкую посадку на Луну в районе Океана Бурь и по команде с Земли выполнила обзор лунного ландшафта и передала его изображение на Землю. По полученным таким образом панорамным снимкам составлен план места посадки станции

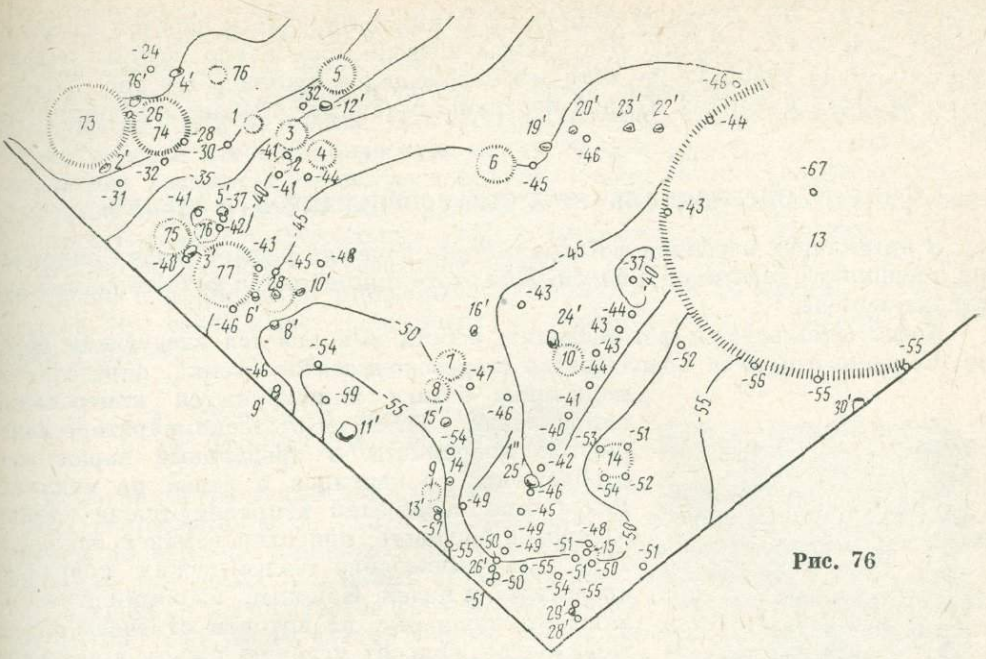


Рис. 76

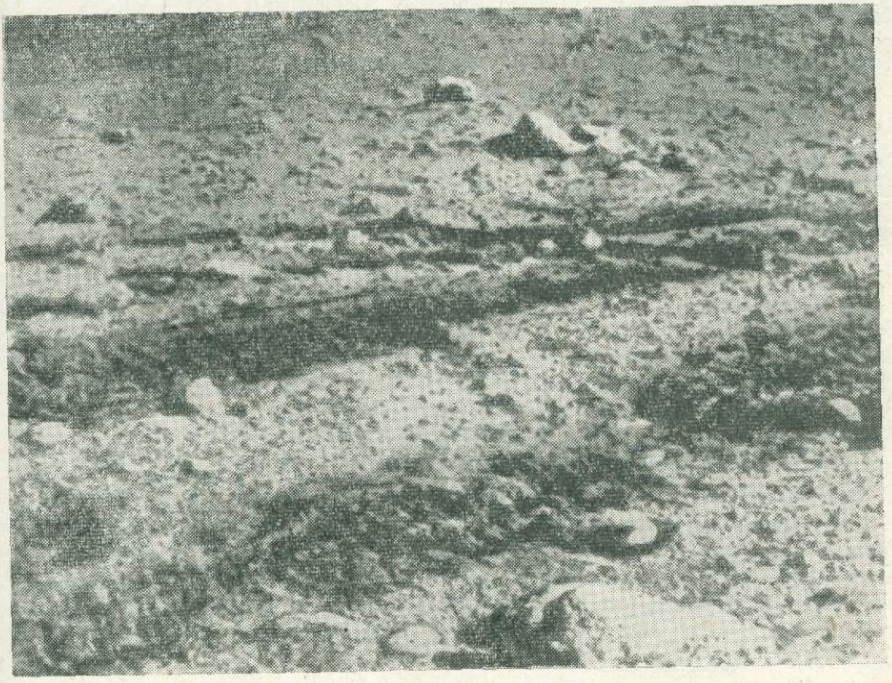


Рис. 77

«Луна-9» (рис. 76). Большое количество снимков получил и передал на Землю первый советский луноход. Эти снимки позволили детально изучить поверхность Луны на участках, по которым перемещался луноход. На рис. 77 представлена часть панорамы лунной поверхности (снимок сделан советским луноходом).

§ 40. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОРИЕНТИРОВ И ЦЕЛЕЙ

В артиллерии наземная фотограмметрия успешно решает задачу определения координат ориентиров и целей. Для этого применяются фототеодолиты или фотодальномеры.

Когда используется фототеодолит, работа выполняется следующим образом. С данного пункта производится стереоскопическая съемка, определяется положение базиса и измеряются контрольные направления. Затем на стереокомпараторе измеряются координаты и продольные параллаксы изображений ориентиров и целей на снимках. Результаты измерений исправляются за ошибки элементов внешнего ориентирования и используются для вычисления геодезических координат ориентиров и целей. Наконец, из снимков составляют фотопанораму, на которой отмечают ориентиры и цели, наносят угловую шкалу в делениях угломера и приводят список координат ориентиров и целей с указанием расстояний до них от данного пункта и отсчетов по угловой шкале. По фотопанораме можно определить приближенно положение и других объектов, расположенных около выбранных ориентиров и целей.

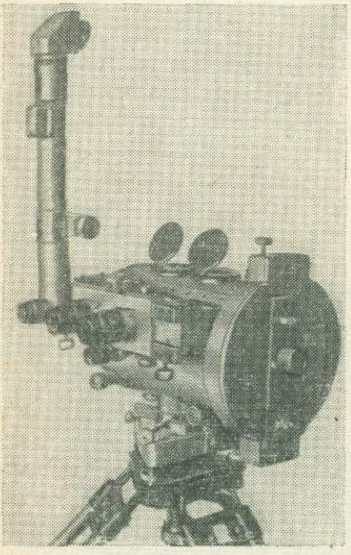


Рис. 78

В 1935—1940 гг. для определения координат точек в полевых условиях созданы фотодальномер и автоматический стереофотодальномер (П. А. Мельников, А. Н. Лобанов, В. М. Казаков, А. М. Калев и др.).

Комплект фотодальномера состоит из фотокамеры, фотодальномера и счетного прибора. Фотокамера служит для фотографирования местности на фотопленку. Она снабжена ориентирующим приспособлением для установки заданных угловых элементов внешнего ориентирования. Для выравнивания фотопленки применена плоскопараллельная стеклянная пластинка, на которой награвирована угловая шкала, рассчитанная в соответствии с фокусным расстоянием фотокамеры, равным 30 см. Шкала изображается на каждом снимке и позволяет определять горизонтальные углы с точностью 10″. Фотодальномер представляет собой полевой стереокомпаратор. Он состоит из снимкодержателей, бинокулярного микроскопа и перископа. После установки стереопары в приборе и наведения марки на какую-либо точку модели по снимкам отсчитывают горизонтальные углы, составленные базисом фотографирования с направлениями из его концов на определяемую точку. Затем на счетном приборе находят координаты точки местности. Перископ используют для определения координат объектов, не изобразившихся на снимках. Если фотодальномер находится слева от базиса фотографирования, то и перископ устанавливается

слева относительно бинокулярного микроскопа. В этом случае стереоскопически рассматривают оптическое изображение местности, полученное в перископе, и левый снимок. Марку перископа наводят на точку местности, на которой находится определяемый объект. Стереоскопически отождествляют соответствующую точку на снимке. Для этого достаточно движениями только левого снимка навести стереоскопическую марку на поверхность видимой модели. Аналогично находят идентичную точку на правом снимке, наблюдая стереоскопически левый и правый снимки и перемещая только правый. Затем по снимкам отсчитывают горизонтальные углы и решают прямую засечку.

В автоматическом стереофотодальномере (рис. 78) счетное устройство сопряжено с прибором и приводится в действие при изменении положения снимков. Это освобождает наблюдателя от отсчитывания по шкалам и вычислений [25].

§ 41. НАЗЕМНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ В АРХИТЕКТУРЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Фотограмметрический метод позволяет быстро произвести обмер архитектурных сооружений и получить их проекции на горизонтальную или вертикальную плоскости. Применение этого метода особенно эффективно для изучения труднодоступных и сложных архитектурных сооружений.

Большой вклад в развитие фотограмметрии в архитектуре сделал А. С. Валуев. В 1935 г. он решил задачу точного обмера деталей четырех башен Московского Кремля стереофотограмметрическим методом. С 1946 г. этот метод систематически применяется для изучения архитектурных и исторических памятников. Большое значение для внедрения его в практику имеют работы, выполненные Академией архитектуры СССР совместно с Московским институтом инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (Д. П. Сухов, Б. Д. Комаров, А. К. Клементьев, Б. Н. Рахманинов и др.).

На рис. 79 представлен чертеж фасада памятника Минину и Пожарскому, составленный по фототеодолитным снимкам.

В строительстве фотограмметрия применяется для определения деформаций инженерных сооружений, контроля точности монтажа крупнопанельных зданий, исследования моделей инженерных сооружений, подсчета объема земляных работ и выбора оптимальной трассы дороги, а также для решения других задач.

Деформация инженерных сооружений происходит под действием внешней силы — нагрузки. Если нагрузка не превышает предела, установленного для данного материала, то после прекращения действия нагрузки сооружение возвращается к первоначальной форме благодаря взаимодействию частиц материала. При больших нагрузках появляются остаточные деформации. Может случиться, что нагрузка очень велика. Тогда частицы материала, перемещаясь, утратят взаимную связь и сооружение разрушится. В связи с этим очень важно уметь определять величины деформации сооружений. Это позволяет рассчитать и построить сооружения так, чтобы они имели только заданные деформации и не разрушались.

Для изучения деформации инженерных сооружений применяются фотограмметрический и стереофотограмметрический методы.

Фотограмметрический метод позволяет определить деформации, возникающие в плоскости, и служит для исследования плоских объектов. Сущность метода состоит в том, что с одной и той же неподвижной точки получают

несколько снимков исследуемого объекта, например первый до нагрузки, второй во время нагрузки и третий после нагрузки. При этом фотокамеру устанавливают так, чтобы плоскость прикладной рамки была параллельна плоскости объекта и элементы ориентирования снимков сохранялись.

Пусть с неподвижной точки S (рис. 80) получены снимки P и P' изучаемого объекта, например стены здания. M — положение точки объекта до его смещения, а M' — положение той же точки после смещения, m и m' —

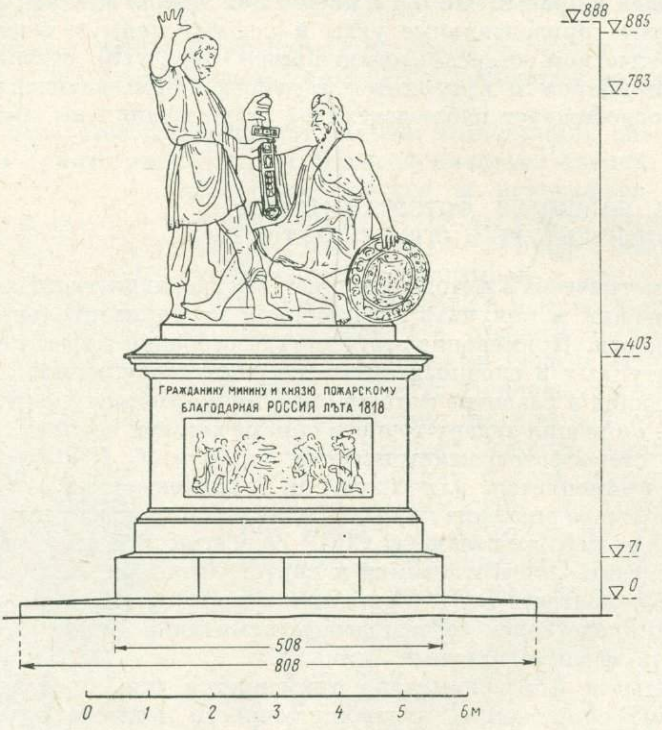


Рис. 79

изображения точек M и M' на снимках. Как следует из рисунка, смещение MM' или деформацию вдоль оси Z, можно найти по формуле

$$\Delta Z = Y \frac{\Delta z}{f}, \tag{8.1}$$

где Y — расстояние от точки фотографирования до объекта, f — фокусное расстояние фотокамеры, Δz — разность координат z точек m' и m. Аналогично получим деформацию вдоль оси X

$$\Delta X = Y \frac{\Delta x}{f}, \tag{8.2}$$

где Δx — разность координат x точек m' и m. Величина Y измеряется при выполнении полевых работ, а разности Δx и Δz — на стереокомпараторе при стереоскопическом наблюдении снимков P и P'.

Стереофотограмметрический метод позволяет определить деформацию, возникающую в пространстве, и применяется для исследования простран-

ственных объектов. С одного и того же базиса получают несколько стереопар изучаемого объекта, например первую до нагрузки, вторую во время нагрузки и третью после снятия нагрузки. Обычно применяют нормальный случай съемки. Пусть X, Y, Z — координаты точки объекта до нагрузки, а X', Y', Z' — координаты той же точки в момент нагрузки. Согласно формулам (4.17)

$$X = b\frac{x_1}{p}; \quad X' = b\frac{x_1'}{p'};$$

$$Y = b\frac{f}{p}; \quad Y' = b\frac{f}{p'};$$

$$Z = b\frac{z_1}{p}; \quad Z' = b\frac{z_1'}{p'}.$$

Отсюда получаем деформации

$$\left.\begin{aligned} \Delta X &= b\left(\frac{x_1'}{p'} - \frac{x_1}{p}\right) \\ \Delta Y &= bf\left(\frac{1}{p'} - \frac{1}{p}\right) \\ \Delta Z &= b\left(\frac{z_1'}{p'} - \frac{z_1}{p}\right) \end{aligned}\right\}. \tag{8.3}$$

Если элементы внешнего ориентирования снимков не сохраняются, то результаты измерений исправляют, используя контрольные точки или контрольные направления.

Для повышения точности определения деформации используют специальные марки, которые прикрепляют к исследуемому объекту. Удобна марка в виде двух взаимно перпендикулярных черных полос на белом фоне. При этом ширина полосы

$$T = Y\frac{t}{f}, \tag{8.4}$$

где t — ширина полосы на негативе, которая должна быть в 2—3 раза больше ширины измерительной марки стереокомпаратора.

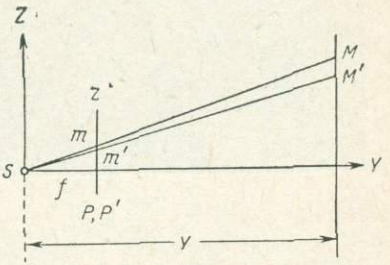


Рис. 80

Ожидаемую точность определения деформации можно подсчитать по формулам, выведенным в гл. 6.

Контроль точности монтажа крупнопанельных зданий можно считать частным случаем определения деформации сооружения. При этом наиболее трудоемкими работами являются определения уклонений углов панелей от вертикальной плоскости. Эта задача сводится к нахождению отстояния Y для каждого угла панели. Чтобы получить полную характеристику монтажных работ и поведения сооружения в процессе эксплуатации, определяют по снимкам точность монтажа во время и после строительства, а затем находят деформации через определенные промежутки времени.

Весьма существенной особенностью изучения моделей инженерных сооружений методами фотограмметрии является фотографирование с коротких базисов и на небольшие расстояния. Кроме того, если объект исследования подвижный, например модель гидротехнического сооружения, то съемка с концов базиса выполняется синхронно. Для таких исследований наиболее подходят

стереофотограмметрические камеры И. Г. Индиченко (рис. 81), позволяющие плавно изменять базис фотографирования и фокусные расстояния камер, а также универсальная фотокамера УМК-10/1318 Цейсса.

На рис. 82 представлены результаты испытаний модели пневматической опалубки, выполненных в Воронежском инженерно-строительном институте (А. И. Метелкиным), с целью разработки опалубки для строительных работ. Модель представляет собой конверт размером 90×90 см, изготовленный из прорезиненной ткани и укрепленный на металлической сварной раме. Масштаб модели около 1 : 10. Задачей испытаний было определение зависимости между внутренним давлением и формой опалубки. Получено несколько стереопар с изображением

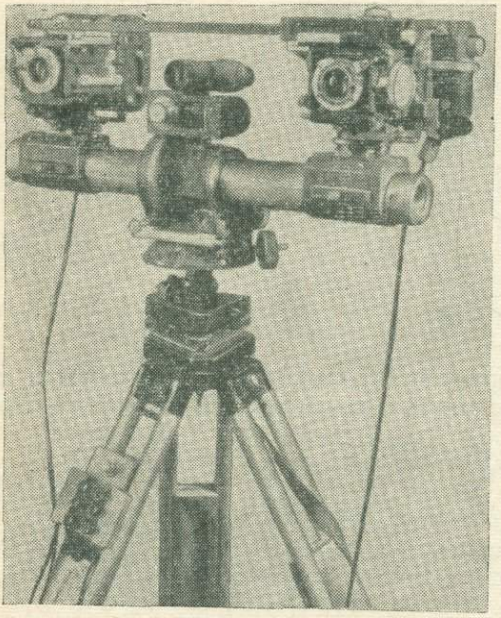


Рис. 81

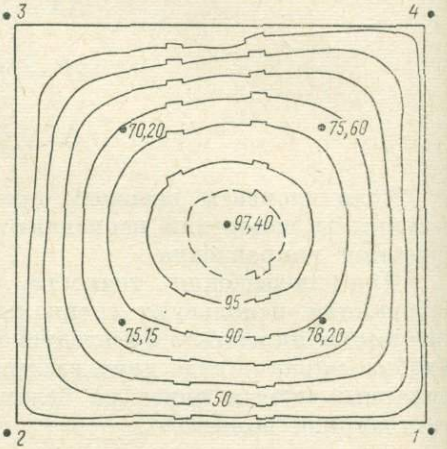


Рис. 82

модели опалубки при различных значениях внутреннего давления. Рисунок иллюстрирует результаты обработки одной стереопары. Горизонтали проведены через 10 мм.

Другой пример применения фотограмметрии для испытания моделей инженерных сооружений показан на рис. 83, на котором изображен план поверхности водного потока модели гидротехнического сооружения (М. Н. Ютанов). Рисовка рельефа водной поверхности производилась способом интерполирования высот пикетных точек. По каждой стереопаре определены высоты 100—120 точек. Горизонтали проведены через 1 мм. Скорости и траектории движения отдельных струй потока получены по снимкам поплавков. При этом съемка выполнялась способом многократного фотографирования на одну пластинку при непрерывном освещении водной поверхности. Глубины потока определены по разностям высот, полученным в результате стереоскопического наведения измерительной марки на поплавок и донную марку. В измеренные глубины введены поправки за преломление света в водной среде.

Для подсчета объема земляных работ и выбора оптимальной трассы дороги фотографируют местность с концов одного или нескольких базисов и по стерео-

парам создают цифровые модели. Цифровая модель представляет собой совокупность координат точек объекта, например местности. Количество точек цифровой модели зависит от сложности рельефа объекта и заданной точности решения инженерной задачи. Цифровая модель вводится в электронную вычислительную машину, которая по соответствующей программе подсчитывает объем земляных работ и выбирает оптимальную трассу дороги. Однако трассирование дорог более эффективно выполняется не по наземным снимкам, а по аэроснимкам (В. И. Федоров).

Применению фотограмметрии в строительстве посвящены работы А. И. Бухгольца, Н. А. Блохина, А. С. Валуева, М. И. Бурова, В. М. Сердюкова и др. [26, 40].

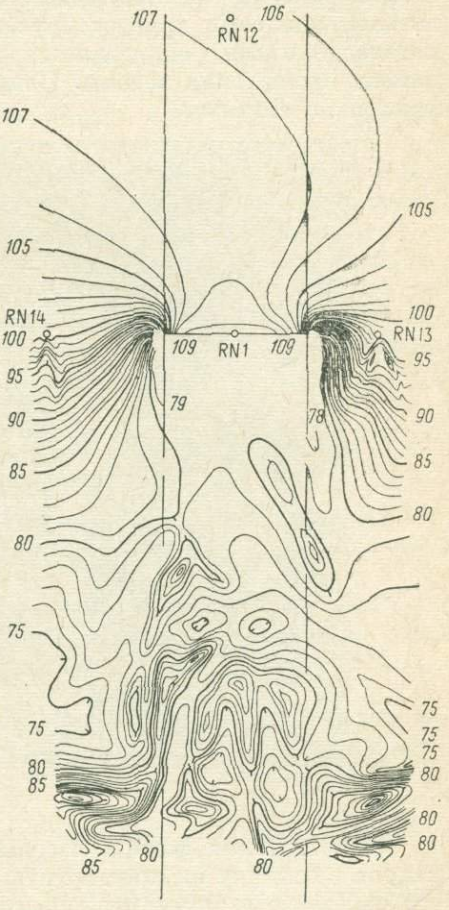


Рис. 83

§ 42. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Кроме движения водного потока и деформации инженерных сооружений фотограмметрия позволяет исследовать и другие динамические процессы, протекающие быстро или медленно.

В баллистике фотограмметрия нашла признание как точный метод определения траектории и скорости снаряда. Для этого применяются спаренные фототеодолиты и кинотеодолиты.

Комплект спаренного фототеодолита состоит из двух фототеодолитов и командного прибора для синхронного фотографирования с концов базиса. Командный прибор управляет работой затворов фотокамер и позволяет получить в одну секунду от 6 до 24 изображений объекта на каждой пластинке. Съемка выполняется обычно ночью, причем летящий снаряд освещается прикрепленным к нему трассером. Поэтому траектория снаряда изображается на снимках в виде пунктирной линии. По снимкам определяют координаты отдельных точек траектории и расстояния между ними. Учитывая интервал времени между экспозициями, вычисляют скорость снаряда на различных участках траектории.

Кинотеодолит состоит из измерительной кинокамеры и высокоточного теодолита. Кинотеодолит снабжен быстродействующими устройствами для фотографирования объектов и автоматической фиксации времени съемки и отсчетов по горизонтальному и вертикальному кругам. Благодаря этому за одну секунду можно получить несколько десятков кадров с изображениями движущегося объекта и с результатами фиксации времени и угловых величин для каждого кадра. Наводить зрительную трубу и кинокамеру на объект можно

как автоматически при помощи следящей системы, так и вручную посредством штурвалов. Следящая система кинотеодолита, изготовленного в Швейцарии, обеспечивает точность наведения порядка 4″. Кроме того, имеются устройства для автоматического кодирования угловых величин и отсчетов времени, а также для беспроволочной передачи этих данных на пункт обработки и управления работой нескольких кинотеодолитов, которые можно устанавливать на значительном удалении друг от друга. По данным, полученным двумя или более кинотеодолитами, определяется положение движущегося объекта в любой момент наблюдения за ним. Поправки в углы за неточное наведение определяются по снимкам.

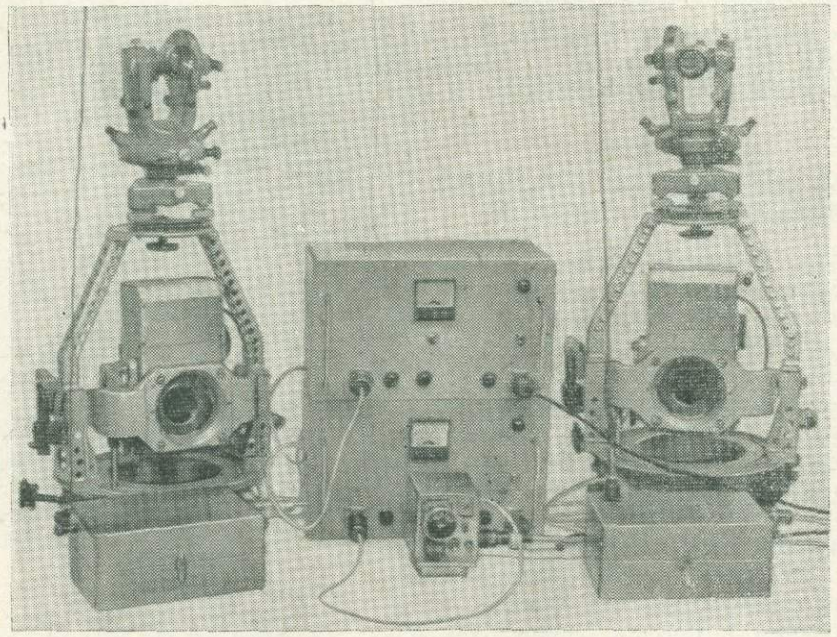


Рис. 84

Кинотеодолит фирмы Ascania Werke (ФРГ) позволяет получать по 20 кадров в секунду на стандартную 35-миллиметровую кинопленку. Кинокамера его снабжена взаимозаменяемыми зеркальными линзами и объективами с фокусными расстояниями 30, 60, 100 и 300 см и двумя также взаимозаменяемыми зрительными трубами с переменным увеличением от 5 до 20×

Кинотеодолиты используются на специальных полигонах для обеспечения запусков и испытаний ракет, искусственных спутников Земли и других космических объектов.

В отдельных случаях траекторию и скорость объекта можно определить только одним фототеодолитом, например, когда исследуемый объект перемещается в плоскости или когда определяется только одна проекция траектории на заданную плоскость. При этом фототеодолит должен быть снабжен затвором, позволяющим производить выдержки через равные малые промежутки времени. Такие исследования были выполнены с целью определения траектории снаряда и испытания рабочего оборудования экскаватора (А. Н. Лобанов, М. П. Бордюков, А. Д. Дубяга).

Кафедрой фотограмметрии Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии разработана аппаратура для синхронной базисной съемки через заданные интервалы времени и методика съемочных и камеральных работ (М. И. Буров, В. В. Кислов, Б. А. Новаковский). Первый вариант этой аппаратуры (рис. 84) создан на базе аэрофотоаппаратов АФА-41/20 и имеет следующие параметры: формат снимка 18×18 см, фокусное расстояние 200 мм, диапазон выдержек 1 : 60—1 : 500 с, минимальный интервал времени между экспозициями 2,25 с, фотопленка выравнивается на стекло с впечатыванием по всему полю снимка контрольной сетки. Автоматическое управление фотокамерами обеспечивается двумя командными приборами, соединенными с блоками синхронизации. Сигналы управления передаются по кабелю или по радио. Обработка материалов съемки ведется аналитическим методом с применением электронной цифровой вычислительной машины. С целью повышения мобильности второй вариант аппаратуры создан на базе малоформатного аэрофотоаппарата АФА-М-31 и управляется по радио. Основные характеристики этого варианта: формат снимков 7,5×7,5 см, фокусное расстояние 31 мм, диапазон выдержек 1 : 60—1 : 100 с, минимальный интервал времени между экспозициями 5 с. Эта аппаратура успешно применяется для изучения дымовых факелов труб мощных промышленных предприятий, следов от пиротехнических средств и других объектов и явлений.

§ 43. РЕШЕНИЕ ДРУГИХ НЕТОПОГРАФИЧЕСКИХ ЗАДАЧ МЕТОДАМИ НАЗЕМНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

В географии фотограмметрия служит для изучения статических и динамических элементов различных ландшафтов, а также для выявления и оценки природных взаимосвязей и закономерностей.

Наземную стереосъемку успешно применяют для картографирования ледников и определения скорости их движения, а также для изучения морских полярных льдов (Ф. Н. Чернышев, А. С. Валуев, Р. Финстервальдер, В. И. Авгевич, Ю. Ф. Книжников и др.).

Геоморфологи по снимкам изучают селеновые потоки, камнепады, осыпи и другие природные явления, обусловленные рельефом и его взаимосвязями с почвами и подстилающими коренными породами (М. И. Иверонова, Н. А. Хренников и др.).

Наземная фотограмметрия завоевала признание в горных работах как эффективный метод съемки угольных карьеров [47]. Выполняемые периодически съемки позволяют определить объем извлеченных вскрыши и угля для расчета с личным составом и оперативного планирования работ (Л. Н. Келль, И. Я. Рейзенкинд, А. П. Трунин, И. И. Финаревский и др.).

Большое развитие наземная стереосъемка получила в гидрологических и океанографических исследованиях. Еще в 1907 г. академик А. Н. Крылов применил фотограмметрию для изучения волнения водной поверхности. Теперь этот метод используют для определения параметров волн многие ученые и инженеры (Л. Ф. Титов, Ф. А. Коршак, Д. М. Кудрицкий, С. Ф. Городецкий, А. А. Пугин и др.). Современные гидрологические фототеодолиты позволяют получать серию последовательных снимков волнения и находить по ним не только высоту, длину и крутизну волны, но также скорость и период ее. Кроме того, можно изучать процесс изменения формы волны по мере приближения ее к берегу.

Методы фотограмметрии успешно применяются и для исследований под водой, для чего создана специальная съемочная аппаратура.

По инициативе П. М. Орлова наземная стереосъемка применяется для определения скорости течения рек и направлений поверхностных струй, что имеет большое значение для проектирования гидротехнических сооружений.

Институт прикладной геофизики АН СССР и кафедра фотограмметрии Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии использовали наземную фотограмметрию для изучения серебристых облаков. Съемка этих объектов выполнена с базисов длиной порядка 20 км фототеодолитами с фокусным расстоянием 180 мм и аэрофотокамерами с фокусным расстоянием 500 мм. Высота серебристых облаков, полученная в результате решения прямой фотограмметрической засечки на сфере, оказалась равной 83 км. По снимкам определена и скорость движения облаков (М. И. Буров).

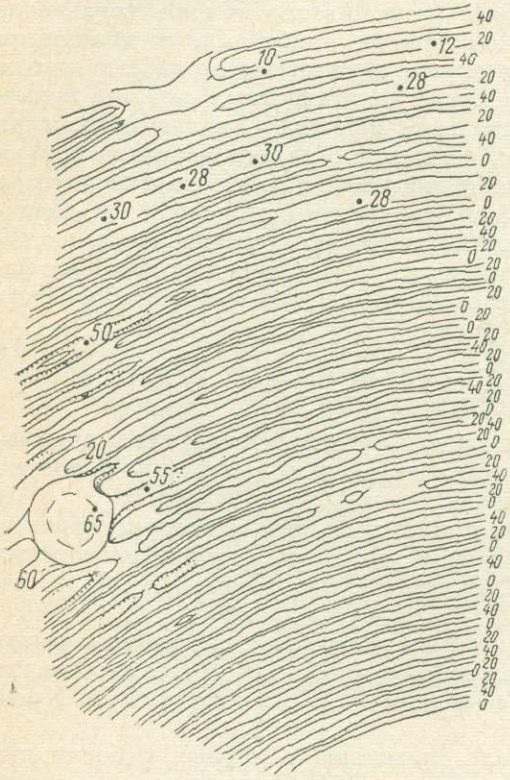


Рис. 85

Фотограмметрическим методом изучается состояние железнодорожного пути. При этом фотографирование пути производится специальным фотоаппаратом, установленным на консоли, прикрепленной к вагону поезда или к дрезине (Г. Ш. Еникеев).

В медицине создана стереофотограмметрическая аппаратура для точного определения количественных характеристик глаза (Л. С. Урмахер), а также для изучения внутренних органов человеческого тела. Современная антропометрия широко использует снимки, как объективные и точные документы.

В судебной медицине, криминалистике и автоинспекции фотограмметрия нашла признание как достоверный метод фиксации и анализа обстановки, в которой совершенны преступление или катастрофа.

Для изучения микрогеометрии деталей машин и приборов разработан стерефотограмметрический метод, основанный на применении микроскопов и электронных микроскопов (В. И. Саркин, И. С. Горелик). На рис. 85 изображен план точеной поверхности детали. Масштаб снимков 20 : 1. План вычерчен на стереокомпараторе. Горизонтали проведены через 20 мкм.

В ядерных исследованиях стереофотограмметрическая съемка служит для изучения следов элементарных частиц в камерах Вильсона, пузырьковых или водородных камерах. Под действием магнитного поля эти следы теряют свою прямолинейность. Зная величину напряженности магнитного поля, величину заряда частицы и измерив радиус кривизны трека, определяют импульс частицы, представляющий собой произведение массы частицы на ее скорость. Для фотографирования треков и измерения по снимкам радиуса их кривизны созданы специальные приборы (М. М. Русинов).

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

АЭРОФОТОГРАММЕТРИЯ

Глава 9

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОДИНОЧНОГО АЭРОСНИМКА

§ 44. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В АЭРОФОТОГРАММЕТРИИ. ЭЛЕМЕНТЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ АЭРОСНИМКА

Положение точки местности по аэроснимкам определяют, как и по наземным снимкам, в геодезической или фотограмметрической системах координат (см. рис. 37).

Для решения фотограмметрических задач на большие расстояния, а также в случае космических исследований применяют прямоугольную геоцентрическую систему координат $O'_\Gamma X'_\Gamma Y'_\Gamma Z'_\Gamma$ (рис. 86). При этом за начало координат принимают центр эллипсоида, ось Z'_Γ совмещают с полярной осью $O'_\Gamma P$, а ось X'_Γ устанавливают в плоскости начального меридиана. Положение точки M, находящейся на поверхности Земли или за ее пределами, определяется координатами

$$X'_\Gamma = O_\Gamma M'', \quad Y'_\Gamma = M''M',$$

$$Z_{\text{в}} = M'M.$$

Для определения положения точки на аэроснимке используют, как и в наземной фотограмметрии, плоскую прямоугольную систему координат, но ее обозначают через $o'xy$ (рис. 87). Начало координат o' находится в пересечении прямых, соединяющих координатные метки *1*, *2* и *3*, *4*. Ось x совмещают с прямой *1—2* (см. рис. 87) или устанавливают параллельно прямой *3—2* (рис. 88).

Часто начало координат на аэроснимке совмещают с точкой, координаты которой равны средним значениям координат меток *1—4*.

Положение точки аэроснимка m определяется координатами

$$x = o'm', \quad y = m'm.$$

Элементами внутреннего ориентирования аэроснимка, т. е. величинами, позволяющими определить положение центра проекции относительно аэроснимка и восстановить связку лучей, существовавшую в момент фотографирования, являются координаты главной точки аэроснимка x_0 и y_0 и фокусное расстояние аэрофотокамеры f.

Для определения положения связки в момент фотографирования в аэрофотограмметрии служат две системы элементов внешнего ориентирования.

К первой системе (рис. 89) относятся:

X_S, Y_S, Z_S — координаты точки фотографирования, в которой находился центр проекции S; α_0 — угол наклона снимка или угол отклонения главного луча (оптической оси аэрофотокамеры) от отвесной линии; t — дирекционный

угол главного луча, т. е. угол между осью X и проекцией главного луча на плоскость XY; $\varkappa$ — угол поворота снимка, т. е. угол на снимке между главной вертикалью и осью y.

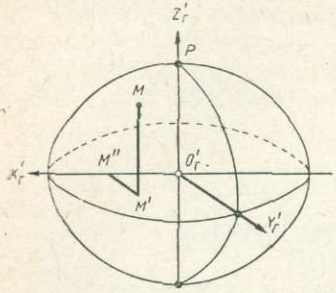


Рис. 86

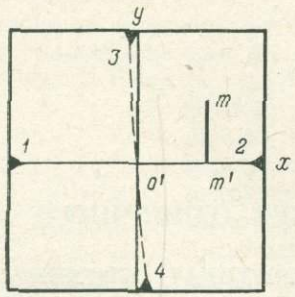


Рис. 87

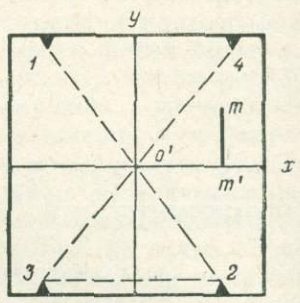


Рис. 88

Вторая система элементов внешнего ориентирования аэроснимка включает (рис. 90):
X_S, Y_S, Z_S — координаты точки фотографирования; α — продольный угол наклона снимка, заключенный между осью Z и проекцией главного луча на

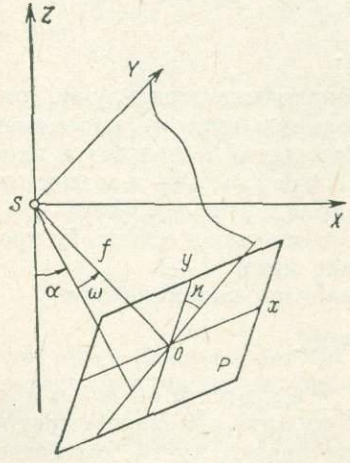


Рис. 89

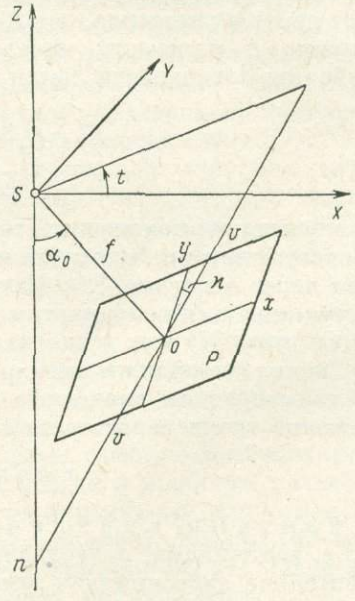


Рис. 90

плоскость XZ; ω — поперечный угол наклона снимка, составленный главным лучом с плоскостью XZ; $\varkappa$ — угол поворота снимка, т. е. угол на снимке между осью y и следом плоскости, проходящей через главный луч и ось Y.

Итак, аэроснимок, как и наземный снимок, имеет девять элементов ориентирования: три элемента внутреннего ориентирования и шесть элементов внешнего ориентирования. Из шести элементов внешего ориентирования три линейные —

X_S, Y_S, Z_S, они определяют положение центра проекции, а остальные угловые — α_0, t, $\varkappa$ или α, ω, $\varkappa$. Из них первые два — α_0 и t или α и ω определяют направление главного луча, а третий — $\varkappa$ — поворот аэроснимка вокруг главного луча.

Первая система элементов внешнего ориентирования применяется при геометрическом анализе одиночного аэроснимка, вторая — при анализе пары аэроснимков.

Аэроснимки делят на горизонтальные, плановые и перспективные.

Г о р и з о н т а л ь н ы м и называются аэроснимки, имеющие угол $\alpha_0 = 0°$. Таких аэроснимков в настоящее время при аэрофотосъемке получить нельзя.

П л а н о в ы м и условно называют аэроснимки, полученные при небольших углах наклона. При этом угол α_0 — погрешность приведения оптической оси аэрокамеры в отвесное положение.

Если горизонтирование аэрокамеры производится вручную, то угол α_0 редко превышает 3°. В случае применения гиростабилизирующей аэрофотоустановки угол α_0 в среднем равен 10′, а предельное значение — примерно 40′.

Для п е р с п е к т и в н ы х аэроснимков характерны большие углы наклона, достигающие иногда 70—80° с тем, чтобы получить на аэроснимке изображение видимого горизонта.

Для создания топографических карт в настоящее время применяются плановые аэроснимки.

§ 45. ЭЛЕМЕНТЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ

При геометрическом анализе изображение на аэроснимке принимают за центральную проекцию местности, пренебрегая влиянием физических факторов на изображение.

Рассмотрим основные плоскости, линии и точки, играющие важную роль в теории перспективы.

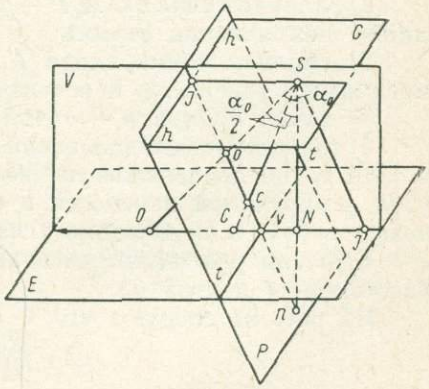


Рис. 91

На рис. 91
E — предметная плоскость (горизонтальная); P — картинная плоскость, занимающая в общем случае наклонное положение; tt — линия основания картины, являющаяся пересечением картинной плоскости с предметной; S — центр проекции или центр перспективы; G — плоскость горизонта (проходит через точку S); hh — линия горизонта, т. е. линия пересечения плоскости горизонта с картинной плоскостью; V — главная вертикальная плоскость (проходит через точку S перпендикулярно к картинной и предметной плоскостям); So — главное расстояние (перпендикуляр, опущенный из точки на плоскость P); SN — высота центра проекции (перпендикуляр, опущенный из точки S на плоскость E).

Оба перпендикуляра находятся в плоскости V; угол между перпендикулярами равен углу наклона картинной плоскости α_0.

Главная вертикальная плоскость пересекает картинную плоскость по прямой, проходящей через главную точку o, перпендикулярно к линиям hh

и tt, предметную плоскость — по прямой, проходящей через точку N, перпендикулярно к линии tt, и плоскость горизонта — по прямой, проходящей через точку S, перпендикулярно к линии hh.

След главной вертикальной плоскости на плоскости P называется главной вертикалью.

Точка I, *находящаяся на пересечении линии горизонта с главной вертикалью*, называется главной точкой схода картинной плоскости, а точка I' — главной точкой схода предметной плоскости. При этом фигура $SIVI'$ будет параллелограммом.

Точка n, находящаяся на пересечении отвесной прямой, проходящей через точку S, с главной вертикалью, называется точкой надира.

Точка c, лежащая на пересечении биссектрисы угла α_0 с главной вертикалью, *называется точкой нулевых искажений*.

Применительно к аэрофотосъемке примем центр проекции S за входной зрачок или переднюю узловую точку объектива, E — за плоскую горизонтальную местность, P — за плоскость аэроснимка. В этой плоскости получается прямое изображение. Оно будет конгруэнтно изображению в плоскости прикладной рамки аэрокамеры *, если $So = f$.

Поэтому So следует принять за главное расстояние f аэрокамеры, SO — за главный луч или, иначе, оптическую ось аэрокамеры, $SN = Z_S$ — за высоту фотографирования H. След главной вертикальной плоскости на плоскости E *является линией направления съемки* (*обозначена прямой со* стрелкой).

Отметим свойства некоторых элементов перспективы:

1) линия горизонта hh — геометрическое место точек схода перспектив параллельных горизонтальных линий;

2) главная точка схода I — точка схода перспектив прямых, параллельных линий направления съемки;

3) главная точка схода I' — точка схода прямых, расположенных на предметной плоскости, перспективы которых параллельны главной вертикали;

4) *точка надира* n — *точка схода перспектив вертикальных линий*;

5) точка нулевых искажений c обладает тем свойством, что углы с вершиной в этой точке не искажаются вследствие наклона картинной плоскости, т. е. угол в картинной плоскости и его проекция в предметной плоскости равны между собой, если вершина угла находится в точке c.

Выразим расстояния от главной точки o до точки I, n и c через главное расстояние f и угол α_0.

Из рис. 91 следует, что

$$\left.\begin{aligned} oI &= f\operatorname{ctg}\alpha_0;\ on = f\operatorname{tg}\alpha_0 \\ oc &= f\operatorname{tg}\frac{\alpha_0}{2} \end{aligned}\right\}. \tag{9.1}$$

Обратим также внимание на то, что

$$\left.\begin{aligned} IS = Ic &= \frac{f}{\sin\alpha_0};\ \ Sn = \frac{f}{\cos\alpha_0} \\ ON = H\operatorname{tg}\alpha_0;\ \ Iv &= \frac{H}{\sin\alpha_0} \end{aligned}\right\}. \tag{9.2}$$

Эти зависимости используются в последующем анализе аэроснимка.

---

* Оптическое изображение рассматривается как центральная проекция.

§ 46. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ СООТВЕТСТВЕННЫХ ТОЧЕК ПРЕДМЕТНОЙ И КАРТИННОЙ ПЛОСКОСТЕЙ

Примем на картинной плоскости (плоскости аэроснимка) за начало координат главную точку схода I, за ось абсцисс — линию горизонта hh, за ось ординат — главную вертикаль (рис. 92).

На предметной плоскости (плоскости местности) за начало координат примем главную точку схода I', за ось абсцисс — прямую, параллельную линии горизонта hh, и за ось ординат — линию направления съемки.

Положительные направления координатных осей указаны на рисунке стрелками.

Рассмотрим на предметной плоскости произвольную точку A и ее изображение a в картинной плоскости.

Опустим соответственно из этих точек перпендикуляры на линию направления съемки и на главную вертикаль.

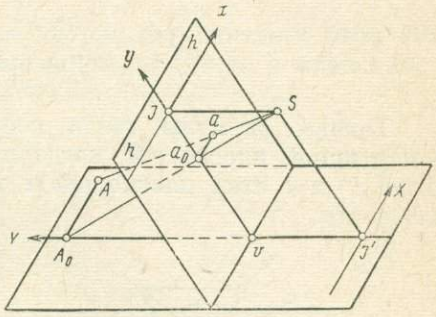


Рис. 92

Полученные точки A_0 и a_0 лежат на одном проектирующем луче, выходящем из S, так как точка a_0 является изображением точки A_0.

Обозначим координаты точки A через $X_{I'}$, $Y_{I'}$ и координаты точки a через x_I, y_I, тогда

$$X_{I'} = A_0A;\ Y_{I'} = I'A_0,$$

$$x_I = a_0a,\ y_I = -Ia_0.$$

Из подобных треугольников SAA_0 и Saa_0, SA_0I' и a_0A_0v находим

$$\frac{X_{I'}}{x_I} = \frac{SA_0}{Sa_0};\quad \frac{Y_{I'}}{I'v} = \frac{SA_0}{Sa_0}.$$

Но $\frac{SA_0}{Sa_0} = \frac{Iv}{Ia_0}$, что следует из подобных треугольников SIa_0 и A_0va_0. При этом $Ia_0 = -y_I$.

Кроме того, нам известно (см. § 45), что

$$I'v = SI = \frac{f}{\sin\alpha_0};$$

$$Iv = \frac{H}{\sin\alpha_0}.$$

Поэтому

$$\left.\begin{aligned} X_{I'} &= -\frac{H}{y_I \sin\alpha_0}\, x_I \\ Y_{I'} &= -\frac{H}{y_I \sin^2\alpha_0}\, f \end{aligned}\right\}, \tag{9.3}$$

или, применяя сокращенную запись,

$$\left.\begin{aligned} X_{I'} &= -\frac{H'}{y_I}x_I \\ Y_{I'} &= -\frac{H'}{y_I}f' \end{aligned}\right\}, \tag{9.4}$$

где

$$f' = \frac{f}{\sin\alpha_0};\quad H' = \frac{H}{\sin\alpha_0}.$$

Таковы формулы связи координат соответственных точек предметной и картинной плоскостей, когда началом координат являются главные точки схода I' и I этих плоскостей и оси ординат лежат в главной вертикальной плоскости.

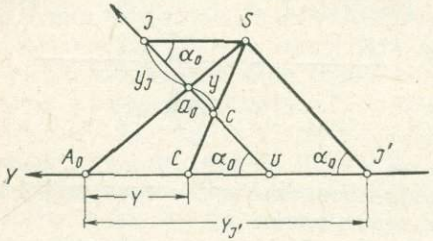


Рис. 93

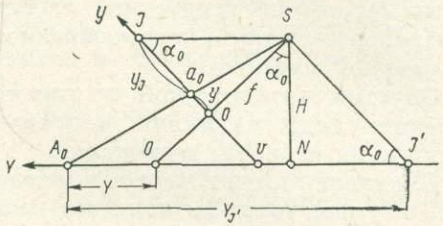


Рис. 94

Преобразуем формулы координат, изменив положение начала координат и сохранив неизменными направления координатных осей.

1. Начала координат в точке нулевых искажений c и ее проекции C.

В этом случае (рис. 93) в формулах (9.4) следует положить $y_I = y - Ic$, но $Ic = \frac{f}{\sin\alpha_0}$, поэтому

$$y_I = y - \frac{f}{\sin\alpha_0},$$

$$Y_{I'} = Y + I'C,\ \text{но}\quad I'C = SI' = \frac{H}{\sin\alpha_0},$$

так как треугольник $I'SC$ подобен равнобедренному треугольнику ISc.

Следовательно,

$$Y_{I'} = Y + \frac{H}{\sin\alpha_0}.$$

Абсциссы точек не изменятся, так как оси ординат занимают прежнее положение, т. е.

$$x_I = x,\ X_{I'} = X.$$

Формулы (9.4) после простых преобразований принимают вид

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{H}{f - y\sin\alpha_0}x \\ Y &= \frac{H}{f - y\sin\alpha_0}y \end{aligned}\right\}. \tag{9.5}$$

Разделив почленно второе равенство на первое, получим

$$\frac{Y}{X}=\frac{y}{x}.$$

Обозначим

$$\frac{y}{x}=\operatorname{tg}\varphi;\quad \frac{Y}{X}=\operatorname{tg}\varphi'.$$

Отсюда приходим к выводу, известному из теории перспективы: угол φ с вершиной в точке нулевых искажений c в картинной плоскости и проекция угла на предметную плоскость φ' равны между собой.

Так как

$$R=\sqrt{X^2+Y^2}\quad \text{и}\quad r=\sqrt{x^2+y^2},$$

то из равенств (9.5) следует

$$R=\frac{H}{f-y\sin\alpha_0}r,$$

или

$$R=\frac{H}{f-r\sin\varphi\sin\alpha_0}r. \tag{9.6}$$

Такова зависимость между радиус-векторами соответственных точек предметной и картинной плоскостей, если полюсом служит точка нулевых искажений.

2. Начала координат в главной точке o и ее проекции O (рис. 94).

В этом случае $y_I = y - Io$, но $Io = f\operatorname{ctg}\alpha_0$, поэтому

$$y_I=y-f\operatorname{ctg}\alpha_0, \tag{а}$$

$$Y_{I'}=Y+I'O,\ I'O=H(\operatorname{tg}\alpha_0+\operatorname{ctg}\alpha_0)=\frac{H}{\sin\alpha_0\cos\alpha_0}.$$

Следовательно,

$$Y_{I'}=Y+\frac{H}{\sin\alpha_0\cos\alpha_0}.$$

Абсциссы точек не меняются

$$x_I=x,\ X_{I'}=X.$$

Формулы (9.4) после простых преобразований принимают вид

$$\left.\begin{aligned}X&=\frac{H}{f\cos\alpha_0-y\sin\alpha_0}x\\ Y&=\frac{H}{(f\cos\alpha_0-y\sin\alpha_0)\cos\alpha_0}y\end{aligned}\right\}. \tag{9.7}$$

3. Начала координат на картинной плоскости — в главной точке o, на предметной плоскости — в точке надира N.

В этом случае в (9.4) вместо y_I следует подставить выражение (*а*) и $Y_{I'} = Y + H\operatorname{ctg}\alpha_0$. Кроме того, $X_{I'}$ и x_I нужно заменить соответственно на X и x.

После простых преобразований формулы принимают вид

$$\left.\begin{aligned}X&=H\frac{x}{f\cos\alpha_0-y\sin\alpha_0}\\ Y&=H\frac{y\cos\alpha_0+f\sin\alpha_0}{f\cos\alpha_0-y\sin\alpha_0}\end{aligned}\right\}. \tag{9.8}$$

Напомним, что во всех рассмотренных случаях за ось ординат на картинной плоскости (аэроснимке) принята главная вертикаль и на предметной плоскости (плоской горизонтальной местности) — проекция главной вертикали, т. е. линия направления съемки. Зависимость между координатами соответственных точек при этом устанавливается через элементы ориентирования f, α_0 и H.

При $\alpha_0 = 0$ получаем следующие зависимости:

$$\frac{x}{X} = \frac{y}{Y} = \frac{f}{H},$$

т. е. горизонтальный аэроснимок представляет план плоской горизонтальной местности масштаба f/H.

§ 47. ОБЩАЯ ФОРМУЛА МАСШТАБА АЭРОСНИМКА

При изучении масштаба аэроснимка будем считать, что на нем изображена плоская горизонтальная местность.

Рассмотрим на предметной плоскости произвольную прямую, продолженную от следа q до бесконечности (рис. 95, *а*).

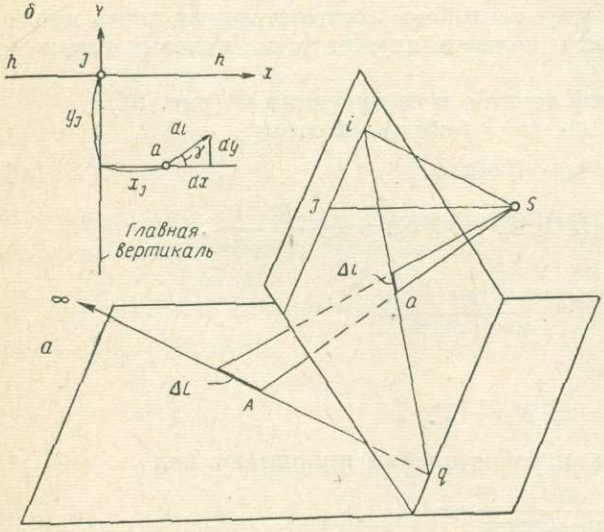


Рис. 95

Так как перспектива прямой qi не параллельна прямой, то масштаб изображения по прямой qi будет величиной переменной, непрерывно изменяющейся от одной точки прямой к другой.

За масштаб изображения $1/m$ в какой-либо точке по данной прямой, например в точке a, принимают величину

$$\frac{1}{m} = \lim_{\Delta L \to 0} \frac{\Delta l}{\Delta L} = \frac{dl}{dL},$$

т. е. масштаб в точке a по данной прямой представляет отношение бесконечно малого отрезка, взятого на этой прямой в заданной точке к соответствующему отрезку на предметной плоскости.

Для вывода формулы масштаба в произвольной точке аэроснимка по произвольному направлению воспользуемся формулами координат (9.4). Пусть x_I, y_I — координаты заданной точки аэроснимка (рис. 95, *б*) и γ — направление, по которому определяется масштаб. Угол γ отсчитывается от прямой, перпендикулярной к главной вертикали, против хода часовой стрелки.

Очевидно, что

$$dl = \frac{dy}{\sin\gamma} = \frac{dx}{\cos\gamma}$$

и

$$dL = \sqrt{dX_I^2 + dY_I^2}.$$

Для определения $dX_{I'}$ и $dY_{I'}$ дифференцируем формулы (9.4) по x_I и y_I. Получаем

$$dX_{I'} = H' \frac{x_I\, dy - y_I\, dx}{y_I^2},$$

или

$$dX_{I'} = H' \frac{x_I \sin\gamma - y_I \cos\gamma}{y_I^2}\, dl;$$

$$dY_{I'} = \frac{H' f'}{y_I^2}\, dy,$$

или

$$dY_{I'} = \frac{H' f' \sin\gamma}{y_I^2}\, dl$$

и, следовательно,

$$dL = \frac{H'}{y_I^2} \sqrt{(x_I \sin\gamma - y_I \cos\gamma)^2 + f'^2 \sin^2\gamma}\, dl.$$

Отсюда находим отношение dl/dL, выражающее масштаб,

$$\frac{1}{m} = \frac{y_I^2}{H' \sqrt{(x_I \sin\gamma - y_I \cos\gamma)^2 + f'^2 \sin^2\gamma}}. \qquad (9.9)$$

Это и есть общая формула масштаба аэроснимка.

Напомним, что $f' = f/\sin\alpha_0$, $H' = H/\sin\alpha_0$ и за начало координат взята главная точка схода I.

Как видим, в формулу входят элементы ориентирования f, α_0, H, координаты x_I, y_I данной точки аэроснимка и угол γ, фиксирующий направление, по которому определяется масштаб.

Таким образом, масштаб аэроснимка меняется не только от точки к точке, но и при одной точке с изменением направления.

Определим, на каких направлениях масштаб в произвольной точке аэроснимка имеет экстремальные значения.

Очевидно, что $(1/m)_{\max}$ или $(1/m)_{\min}$ будем иметь в том случае, когда подрадикальное выражение в знаменателе формулы (9.9), в которое входит переменная γ, получит соответственно наименьшее или наибольшее значение.

Обозначим $u = (x_I \sin\gamma - y_I \cos\gamma)^2 + f'^2 \sin^2\gamma$. Для определения экстремума функции u берем первую производную γ и получаем

$$\frac{du}{d\gamma} = 2(x_I \sin\gamma - y_I \cos\gamma)(x_I \cos\gamma + y_I \sin\gamma) + 2f'^2 \sin\gamma\cos\gamma.$$

Приравниваем производную нулю и находим отсюда значение γ.

Представим уравнение в виде

$$(x_I^2 - y_I^2 + f'^2)\sin\gamma\cos\gamma - x_I y_I (\cos^2\gamma - \sin^2\gamma) = 0,$$

или

$$\frac{1}{2}(x_I^2 - y_I^2 + f'^2)\sin 2\gamma - x_I y_I \cos 2\gamma = 0,$$

откуда

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{2x_I y_I}{x_I^2 - y_I^2 + f'^2}. \qquad (9.10)$$

Так как период тангенса равен 180°, то из равенства (9.10) находим для γ два значения, различающиеся на 90°.

Итак, максимальный и минимальный масштабы имеем по двум взаимно перпендикулярным направлениям. В математической картографии такие направления называются г л а в н ы м и. Они определяют положение осей эллипса искажений, представляющего изображение бесконечно малого круга. Полуоси *эллипса определяются предельными значениями масштабов.*

Преобразуем формулу масштаба аэроснимка, приняв за начало координат точку нулевых искажений *c* (направление осей координат не изменяется).

В этом случае в формуле (9.9) следует положить

$$y_I = y - f';$$

$$x_I = x$$

и формула масштаба после простых преобразований принимает вид

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}\left(1 - \frac{y}{f'}\right)^2\left(1 + \frac{k^2}{f'^2} + 2\frac{k}{f'}\cos\gamma\right)^{-\frac{1}{2}}, \qquad (9.11)$$

где

$$f' = \frac{f}{\sin\alpha_0}, \quad k = x\sin\gamma - y\cos\gamma.$$

Если за начало координат принять главную точку *o* аэроснимка, то в формуле (9.9) следует положить

$$y_I = y - f\operatorname{ctg}\alpha_0;$$

$$x_I = x,$$

и формула масштаба после несложных преобразований принимает вид

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}\left(\cos\alpha_0 - \frac{y}{f}\sin\alpha_0\right)^2\left(1 - \sin^2\alpha_0\cos^2\gamma + \frac{k^2}{f^2}\sin\alpha_0^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{k}{f}\cos\gamma\sin 2\alpha_0\right)^{-\frac{1}{2}}. \qquad (9.12)$$

Полученные формулы являются общими формулами масштаба. Наиболее простой вид имеет формула (9.9), однако ее не всегда удобно использовать, так как при малых углах α_0 (плановая аэросъемка) главная точка схода *I* находится за пределами аэроснимка. При исследовании масштабов планового аэроснимка удобнее пользоваться формулой (9.11), а при решении практических задач — формулой (9.12), в которой за начало координат принята главная точка.

§ 48. ФОРМУЛЫ МАСШТАБОВ ДЛЯ ЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ

1. *Масштаб горизонтального аэроснимка.* Полагая в любой из формул масштаба $\alpha_0 = 0$, получаем известную из § 46 формулу

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}.$$

Итак, масштаб горизонтального аэроснимка плоской горизонтальной местности является величиной постоянной для данного аэроснимка.

2. *Масштаб аэроснимка при* $\alpha \neq 0$ *по радиальным направлениям, проходящим через точку нулевых искажений.* Если за начало координат принята точка нулевых искажений, то координаты произвольной точки a, лежащей на радиальном направлении (рис. 96), связаны уравнением

$$x = y \operatorname{ctg} \gamma.$$

При данном значении x выражение $k = x \sin \gamma - y \cos \gamma$, входящее в формулу (9.11), обращается в нуль, а формула масштаба по радиальным направлениям, проходящим через точку c, имеет вид

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}\left(1 - \frac{y}{f}\sin \alpha_0\right)^2. \qquad (9.13)$$

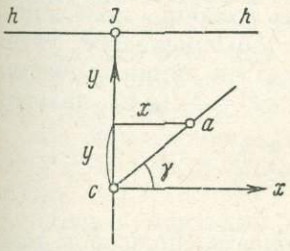


Рис. 96

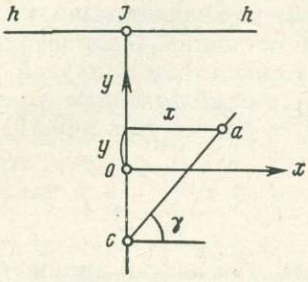


Рис. 97

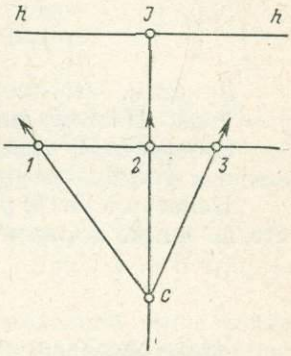


Рис. 98

Для случая, когда началом координат служит главная точка аэроснимка (рис. 97), в формуле (9.12) следует положить

$$x = (y + oc) \operatorname{ctg} \gamma,$$

где $oc = f \operatorname{tg} \alpha_0/2$, и формула масштаба по радиальным направлениям, проходящим через точку c, принимает вид

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}\left(\cos \alpha_0 - \frac{y}{f}\sin \alpha_0\right)^2. \qquad (9.14)$$

Как видим из формулы (9.13) или (9.14), масштаб по любому радиальному направлению зависит только от ординаты точки и не зависит от абсциссы, таким образом, в точках *1*, *2*, *3*, лежащих на прямой, перпендикулярной к главной вертикали (рис. 98), масштабы по радиальным направлениям, выходящим из точки c, равны между собой.

Заметим, что по формулам (9.13) и (9.14) определяется масштаб и по главной вертикали.

Полагая в формуле (9.13) $y = 0$ и в (9.14) $y = -f \operatorname{tg} \alpha_0/2$, находим, что

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H},$$

т. е. масштаб в точке нулевых искажений c по любому направлению равен масштабу горизонтального аэроснимка. Круг бесконечно малого радиуса в этом случае изображается не эллипсом, а кругом.

3. *Масштаб аэроснимка по горизонталям.* Горизонталями на аэроснимке в рассматриваемом случае называются прямые, параллельные линии горизонта (перпендикулярные к главной вертикали). Масштаб по горизонталям будем обозначать через $1/m_h$.

Для получения формул масштаба по горизонталям в (9.11) и (9.12) следует положить $\gamma = 0$, тогда

при начале координат в точке нулевых искажений

$$\frac{1}{m_h} = \frac{f}{H}\left(1 - \frac{y}{f}\sin\alpha_0\right), \tag{9.15}$$

при начале координат в главной точке

$$\frac{1}{m_h} = \frac{f}{H}\left(\cos\alpha_0 - \frac{y}{f}\sin\alpha_0\right). \tag{9.16}$$

Заметим, что все точки, принадлежащие к данной горизонтали, имеют $y = const$. *Поэтому масштаб по данной горизонтали есть величина постоянная.*

С переходом от одной горизонтали к другой масштаб изменяется, уменьшаясь с увеличением y, т. е. с приближением горизонтали к линии горизонта.

Полагая в (9.15) $y = cI = f/\sin\alpha_0$ или в (9.16) $y = oI = f\operatorname{ctg}\alpha_0$, находим, что по линии горизонта

$$\frac{1}{m_h} = 0.$$

Этого следовало ожидать, так как на линии горизонта расположены точки *схода перспектив параллельных горизонтальных линий.*

Следует обратить внимание на то, что горизонтали являются единственными линиями на аэроснимке, масштаб по которым — величина постоянная для каждой горизонтали.

Заметим, что (9.15) и (9.16) могут быть непосредственно получены из (9.5) и (9.7), так как $1/m_h = x/X$.

Сравним масштабы по горизонталям с масштабом горизонтального аэроснимка. Воспользуемся (9.15) как наиболее простой.

Из формулы следует, что при

$$y = 0 \quad \frac{1}{m_h} = \frac{f}{H},$$

$$y < 0 \quad \frac{1}{m_h} > \frac{f}{H},$$

$$y > 0 \quad \frac{1}{m_h} < \frac{f}{H},$$

т. е. горизонталь, проходящая через точку нулевых искажений c, делит аэроснимок на две части: *в нижней части масштаб по горизонталям крупнее масштаба горизонтального аэроснимка и в верхней части масштаб по горизонталям мельче масштаба горизонтального аэроснимка.*

По горизонтали, проходящей через точку нулевых искажений, масштаб равен масштабу горизонтального аэроснимка. Это согласуется с ранее сделанным выводом о том, что масштаб в точке c по любому направлению равен f/H.

Горизонталь, проходящую через точку нулевых искажений, называют линией неискаженного масштаба.

Выведем формулы масштаба по горизонталям, проходящим через главную точку o и точку надира n.

Полагая в (9.16) $y = 0$, получаем формулу масштаба по горизонтали, проходящей через главную точку

$$\frac{1}{m_h} = \frac{f}{H}\cos\alpha_0. \tag{9.17}$$

Принимая во (9.16) $y = -on$, где, согласно (9.1), $on = f\operatorname{tg}\alpha_0$, получаем формулу масштаба по горизонтали, проходящей через точку надира

$$\frac{1}{m_h} = \frac{f}{H\cos\alpha_0}. \tag{9.18}$$

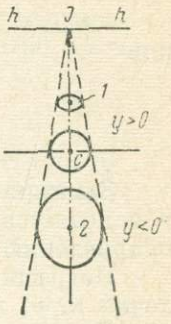


Рис. 99

4. Экстремальные значения масштабов в точках, лежащих на главной вертикали. Возьмем какую-либо точку на главной вертикали. Из формулы (9.10) следует, что при $x_I = 0$ экстремальное значение масштабов имеем при $\gamma = 0$ или $\gamma = 90°$, т. е. по горизонтали и главной вертикали.

Сравним эти масштабы между собой, воспользовавшись формулами (9.15) и (9.13), в которых за начало координат принята точка c. Для масштаба по главной вертикали примем обозначение $1/m_v$.

Из формул вытекает, что при $y > 0$ $1/m_v < 1/m_h$, причем $1/m_h < f/H$; при $y < 0$ $1/m_v > 1/m_h$, причем $1/m_h > f/H$ и, конечно, при $y = 0$ $1/m_v = 1/m_h = f/H$.

Отсюда приходим к выводу, что в точке *1*, расположенной выше точки нулевых искажений c (рис. 99), эллипс искажений сжат по главной вертикали; в точке *2*, расположенной ниже точки нулевых искажений, вытянут по главной вертикали, и в точке c обращается в круг.

§ 49. ПРИБЛИЖЕННАЯ ФОРМУЛА МАСШТАБА ПЛАНОВОГО АЭРОСНИМКА

Воспользуемся общей формулой (9.11) масштаба аэроснимка (начало координат в точке нулевых искажений) и перепишем ее в виде

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}\left(1 - \frac{y}{f}\sin\alpha_0\right)(1+Q)^{-\frac{1}{2}}, \tag{9.19}$$

где

$$Q = \frac{2}{f}\sin\alpha_0\cos\gamma\,(x\sin\gamma - y\cos\gamma) + \frac{1}{f^2}\sin^2\alpha_0\,(x\sin\gamma - y\cos\gamma)^2.$$

Формулу (9.19) для случая плановой аэрофотосъемки ($\alpha_0 \approx 2°$) можно упростить.

Так как $|Q| < 1$, разложим функцию $(1+Q)^{-\frac{1}{2}}$ в ряд и ограничимся первыми двумя членами. Тогда

$$(1+Q)^{-\frac{1}{2}} = 1 - \frac{Q}{2}$$

и, следовательно,

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}\left(1 - \frac{y}{f}\sin\alpha_0\right)^2\left(1 - \frac{Q}{2}\right).$$

Выполним действия, указанные в этом равенстве, и удержим члены, содержащие $\sin\alpha_0$ только в первой степени. Члены, в которые входит $\sin\alpha_0$ в высших степенях, отбросим по малости. Тогда

$$\frac{1}{m}=\frac{f}{H}\left[1-\frac{2y}{f}\sin\alpha_0-\frac{\sin\alpha_0}{f}\cos\gamma(x\sin\gamma-y\cos\gamma)\right]$$

или

$$\frac{1}{m}=\frac{f}{H}\left\{1-\frac{\sin\alpha_0}{f}\left[y(1+\sin^2\gamma)+\frac{1}{2}x\sin 2\gamma\right]\right\}. \qquad (9.20)$$

Это и есть приближенная общая формула масштаба планового аэроснимка.

Заметим, что координаты точки x, y входят в формулу в первой степени, т. е. делается допущение, что масштаб планового аэроснимка по произвольному направлению находится в линейной зависимости от координат точки x, y.

Погрешность определения масштаба по формуле (9.20) зависит от координат точки x, y, в которой определяется масштаб, и направления γ.

Рассмотрим погрешности определения масштабов по горизонталям и по главной вертикали.

Введем следующие обозначения:

для масштаба по горизонталям $1/m_{h'}$,

для масштаба по главной вертикали $1/m_{v'}$.

Полагая в формуле (9.20) $\gamma = 0$, получаем

$$\frac{1}{m_{h'}}=\frac{f}{H}\left(1-\frac{y}{f}\sin\alpha_0\right).$$

При $\gamma = 90°$

$$\frac{1}{m_{v'}}=\frac{f}{H}\left(1-2\frac{y}{f}\sin\alpha_0\right).$$

Сравнивая соответственно эти равенства с равенствами (9.15) и (9.14), приходим к выводу, что масштаб по горизонтали определяется по формуле (9.20) строго, так как $1/m_{h'} = 1/m_h$.

Масштаб по главной вертикали определяется по формуле (9.20) с погрешностью, равной разности величин $m_{v'} - m_v$. Эта ошибка практически и характеризует максимальную погрешность определения масштаба планового аэроснимка по формуле (9.20).

Имеем:

$$\frac{1}{m_v}-\frac{1}{m_{v'}}=\frac{f}{H}\left(1-\frac{y}{f}\sin\alpha_0\right)^2-\frac{f}{H}\left(1-2\frac{y}{f}\sin\alpha_0\right)$$

или

$$\frac{m_{v'}-m_v}{m_v m_{v'}}=\frac{f}{H}\left(\frac{y}{f}\sin\alpha_0\right)^2.$$

Принимая в знаменателе $m_v \approx m_{v'} \approx H/f$ и обозначая числитель через Δm, находим

$$\Delta m=\frac{H}{f}\left(\frac{y}{f}\sin\alpha_0\right)^2. \qquad (9.21)$$

Пусть $f = 200$ мм, $H = 4000$ м, $\alpha_0 = 2°$, $y = 70$ мм, тогда $\Delta m = 2$, т. е. погрешность определения масштаба по формуле (9.20) при данных условиях не превышает двух единиц знаменателя масштаба.

§ 50. СРЕДНИЙ МАСШТАБ В ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКЕ ПЛАНОВОГО АЭРОСНИМКА. СРЕДНИЙ МАСШТАБ ПЛАНОВОГО АЭРОСНИМКА В ЦЕЛОМ

1. В произвольной точке масштаб изменяется в зависимости от направления γ. Обозначим средний масштаб в произвольной точке через $(1/m)$, тогда

$$\left(\frac{1}{m}\right)=\frac{\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}+\ldots+\frac{1}{m_n}}{n},$$

где $1/m_1, 1/m_2, \ldots, 1/m_n$ — значения масштабов в данной точке при углах $\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_n$.

Будем изменять γ через промежутки $\Delta\gamma$ от 0 до 2π, тогда

$$n=\frac{2\pi}{n}$$

и

$$\left(\frac{1}{m}\right)=\frac{\sum_{\gamma=0}^{\gamma=2\pi}\frac{1}{m}\Delta\gamma}{2\pi}.$$

Полагая $\Delta\gamma = d\gamma$ и заменяя знак суммы знаком интеграла, будем иметь

$$\left(\frac{1}{m}\right)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{1}{m}\,d\gamma.$$

Подставляя сюда выражение для $1/m$ из формулы (9.20), после простых преобразований получаем

$$\left(\frac{1}{m}\right)=\frac{f}{H}\left(1-\frac{\sin\alpha_0}{f}\,y-\frac{\sin\alpha_0}{2\pi f}\int_0^{2\pi}\sin^2\gamma\,d\gamma-\frac{\sin\alpha_0}{4\pi f}\,x\int_0^{2\pi}\sin 2\gamma\,d\gamma\right).$$

Найдем значения интегралов

$$\int_0^{2\pi}\sin^2\gamma\,d\gamma=\int_0^{2\pi}\frac{1-\cos 2\gamma}{2}\,d\gamma=\left|\left(\frac{\gamma}{2}-\frac{\sin 2\gamma}{4}\right)\right|_0^{2\pi}=\pi,$$

$$\int_0^{2\pi}\sin 2\gamma\,d\gamma=-\left|\frac{\cos 2\gamma}{2}\right|_0^{2\pi}=0.$$

Следовательно,

$$\left(\frac{1}{m}\right)=\frac{f}{H}\left(1-\frac{3}{2}\,\frac{\sin\alpha_0}{f}\,y\right). \qquad (a)$$

По этой формуле и определяется средний масштаб в произвольной точке планового аэроснимка. В формулу входит одна координата y произвольной точки. Отсюда следует, что геометрическим местом точек, в которых средний масштаб $(1/m) = \text{const}$, являются горизонтали.

Заметим, что средний масштаб в данной точке планового аэроснимка равен полусумме масштабов по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Действительно, обозначим масштаб по направлению γ через $1/m_1$ и по направлению $\gamma + 90°$ через $1/m_2$.

Согласно (9.20), найдем

$$\frac{1}{m_1} = \frac{f}{H}\left\{1 - \frac{\sin\alpha_0}{f}\left[y(1+\sin^2\gamma) + \frac{1}{2}x\sin 2\gamma\right]\right\},$$

$$\frac{1}{m_2} + \frac{f}{H}\left\{1 - \frac{\sin\alpha_0}{f}\left[y(1+\cos^2\gamma) - \frac{1}{2}x\sin 2\gamma\right]\right\}.$$

Взяв среднее арифметическое из этих двух масштабов, приходим к формуле (а).

2. Для определения среднего масштаба планового аэроснимка в целом обратим внимание на то, что средний масштаб по двум горизонталям, симметрично расположенным относительно точки нулевых искажений, равен f/H. Это следует из формулы (9.15). Можно сказать и так, что в пределах зоны, ограниченной двумя симметричными относительно точки нулевых искажений горизонталями, средний масштаб планового аэроснимка равен масштабу горизонтального аэроснимка.

Так как точка c находится на плановом аэроснимке вблизи от главной точки o, масштаб f/H принимают за средний масштаб планового аэроснимка.

§ 51. СМЕЩЕНИЕ КОНТУРНЫХ ТОЧЕК НА АЭРОСНИМКЕ, ВЫЗЫВАЕМОЕ НАКЛОНОМ АЭРОСНИМКА

Рассмотрим два аэроснимка: один горизонтальный P_0 и другой наклонный P. Будем считать, что оба аэроснимка получены при одном положении центра проекции (рис. 100).

Обратим внимание на то, что *наклонный аэроснимок пересекается*

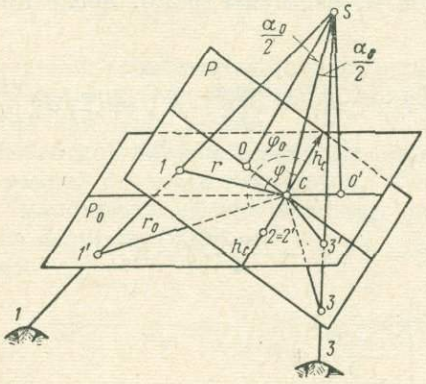


Рис. 100

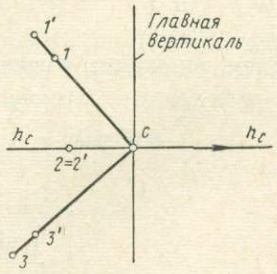


Рис. 101

с горизонтальным по горизонтали $h_c\ h_c$, проходящей через точку нулевых искажений c.

Это следует из того, что прямая Sc — биссектриса угла, а $oSo' = \alpha_0$.

Рассмотрим одноименные точки *1* и *1'* на наклонном и горизонтальном аэроснимках. Проведем из точки c радиус-векторы r и r_0 к этим точкам и заметим, что углы φ и φ_0 равны (см. § 46). Поэтому если плоскость P повернуть вокруг линии неискаженного масштаба h_ch_c и совместить с плоскостью P_0 (рис. 101), то радиус-вектор r ляжет на r_0 и точка *1* наклонного аэроснимка окажется

смещенной относительно точки $1'$ горизонтального аэроснимка по радиус-вектору.

Так как рассматриваемая точка взята произвольно, то можно сделать вывод, что наклон аэроснимка вызывает радиальные смещения точек. Нетрудно убедиться в том, что точка *1* при наклоне аэроснимка приближается к точке *c*, а точка *3* удаляется от точки *c*. Точка *2*, лежащая на линии неискаженного масштаба, занимает одинаковое положение на наклонном и горизонтальном аэроснимках. Это следует из того, что масштаб наклонного аэроснимка выше линии неискаженного масштаба, меньше масштаба горизонтального аэроснимка f/H; масштаб наклонного аэроснимка ниже линии $h_c h_c$, больше f/H, а на линии $h_c h_c$ равен f/H.

Обозначим смещение точки, обусловленное наклоном аэроснимка, через δ_α и перейдем к выводу формулы.

Запишем

$$\delta_\alpha = r - r_0.$$

Радиус-векторам r и r_0 на горизонтальной плоской местности соответствует радиус-вектор R. При этом, если $\alpha_0 \neq 0$, то по формуле (9.6) имеем:

$$R = \frac{Hr}{f - r \sin\varphi \sin\alpha_0}.$$

При $\alpha_0 = 0$

$$R = \frac{Hr_0}{f}.$$

Разделив почленно одно равенство на другое, получим

$$\frac{rf}{r_0 (f - r \sin\varphi \sin\alpha_0)} = 1.$$

Заменяя r_0 через $r - \delta_\alpha$ и решая равенство относительно δ_α, находим

$$\delta_\alpha = -\frac{r^2 \sin\varphi \sin\alpha_0}{f - r \sin\varphi \sin\alpha_0}. \qquad (9.22)$$

Это и есть формула смещения точки вследствие наклона аэроснимка.

Так как угол α_0 всегда имеет положительное значение, то знак δ_α зависит от знака синуса угла φ. При положительном значении синуса, т. е. когда радиус-вектор проводится к точке аэроснимка, находящейся выше линии неискаженных масштабов, величина δ_α будет отрицательна, т. е. $r < r_0$. При отрицательном значении синуса угла φ — положительна, т. е. $r > r_0$. В этом случае радиус-вектор проводится к точке, лежащей ниже линии неискаженных масштабов. При $\varphi = 0°$ или $180°$, $\delta_\alpha = 0$, т. е. $r = r_0$.

Из формулы (9.22) следует, что $|\delta_\alpha|_{\max}$ будет при $r_{\max}$ и $\varphi = 90°$.

При малых углах α_0, т. е. в случае плановой аэрофотосъемки, формулу (9.22) можно упростить. Перепишем ее в виде

$$\delta_\alpha = -\frac{r^2}{f} \sin\varphi \sin\alpha_0 \left(1 - \frac{r}{f} \sin\varphi \sin\alpha_0\right)^{-1}.$$

Учитывая, что $\left|\frac{r}{f} \sin\varphi \sin\alpha_0\right| < 1$, разложим бином с отрицательным показателем в ряд и ограничимся первыми двумя членами. Тогда

$$\delta_\alpha = -\frac{r^2}{f} \sin\varphi \sin\alpha_0 \left(1 + \frac{r}{f} \sin\varphi \sin\alpha_0\right),$$

или

$$\delta_\alpha = -\frac{r^2}{f}\sin\varphi\sin\alpha_0 - \frac{r^3}{f^2}\sin^2\varphi\sin\alpha_0. \tag{9.23}$$

Обозначим допустимую ошибку определения δ_α через σ.

Если

$$\frac{r^3}{f^2}\sin^2\varphi\sin^2\alpha_0 < \sigma, \tag{9.24}$$

то этот член в последнем равенстве можно отбросить. Тогда

$$\delta_\alpha = -\frac{r^2}{f}\sin\varphi\sin\alpha_0. \tag{9.25}$$

Эта формула приближенная, ею можно пользоваться при плановой аэрофотосъемке.

Подсчитаем, с какой точностью определяется δ_α по приближенной формуле.

Положим $\alpha_0 = 2°$, $\sin\alpha_0 = 0{,}03$, $\sin\varphi = 1$, $r_{max} = 70$ мм, $f = 200$ мм. Подставляя эти значения в формулу (9.24), получаем $\sigma \approx 0{,}01$ мм.

Пользуясь приближенной формулой, найдем, при каком угле α_0 смещения точек не будут превышать заданной величины.

Имеем:

$$\delta_{\alpha_{max}} = \frac{r^2_{max}}{f}\sin\alpha_0.$$

Решая это равенство относительно $\sin\alpha_0$ и полагая $\sin\alpha_0 = \alpha_0/\rho$, получаем

$$\alpha_0 = \rho\frac{f}{r^2_{max}}\delta_{\alpha_{max}}.$$

Примем $r_{max} = 70$ мм и поставим условие, чтобы $\delta_{\alpha\,max} = 0{,}2$ мм, тогда при

$$f = 200 \text{ мм } \alpha_0 \leqslant 28',$$

$$f = 100 \text{ мм } \alpha_0 \leqslant 14',$$

$$f = 70 \text{ мм } \alpha_0 \leqslant 10'.$$

Определим геометрическое место точек, для которых величина радиального смещения $\delta_\alpha = \text{const}$.

Решая уравнение (9.22) относительно r, получаем

$$r = \frac{\delta_\alpha}{2} + \sqrt{\frac{\delta^2_\alpha}{4} - \frac{f\delta_\alpha}{\sin\alpha_0\sin\varphi}}. \tag{9.26}$$

Заметим, что δ_α и $\sin\varphi$ имеют противоположные знаки, поэтому отношение $\delta_\alpha/\sin\varphi$ всегда отрицательно, а следовательно, подкоренное выражение положительное. Знак минус перед радикалом опущен, так как иначе r получит отрицательное значение.

В уравнении (9.26) при $\delta_\alpha = \text{const}$ переменными являются r и φ. Это уравнение и определяет искомое геометрическое место точек, для которых радиальное смещение, обусловленное наклоном аэроснимка, одинаково.

На рис. 102 показаны две кривые, изображающие уравнение (9.26).

Для верхней кривой $\delta_\alpha < 0$, а для нижней $\delta_\alpha > 0$. Кривые симметричны относительно главной вертикали и асимптотически приближаются к линии неискаженных масштабов.

Верхняя и нижняя кривые пересекают главную вертикаль в точках *1* и *1'*; при этом точка *1* расположена ближе к точке *c*, чем точка *1'*.

По форме кривые напоминают конхоиды Никомеда.

Если задаться величиной δ_α и построить кривые, то они выделят на аэроснимке зону, внутри которой радиальные смещения, обусловленные наклоном, не будут превышать заданного значения.

В случае плановой аэрофотосъемки для построения кривых, особенно при $f \geqslant 200$ мм, можно пользоваться приближенным уравнением, которое запишем в виде

$$r = \sqrt{-\frac{f\delta_\alpha}{\sin\alpha_0 \sin\varphi}}. \qquad (9.27)$$

Это уравнение вытекает из равенства (9.25).

Применяя уравнение (9.27), получаем две ветви кривой, симметричные относительно линии неискаженного масштаба.

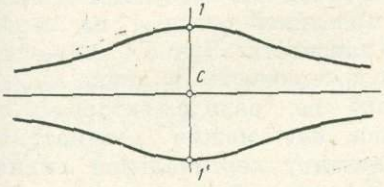


Рис. 102

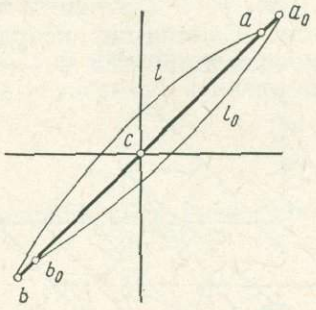


Рис. 103

Рассмотрим на плановом аэроснимке отрезок $ab = l$, делящийся точкой c пополам (рис. 103). На горизонтальном аэроснимке этому отрезку соответствует отрезок $a_0b_0 = l_0$. Искажение отрезка l равно

$$\delta l = l - l_0.$$

Но

$$l = 2r,\ l_0 = 2r + |\delta_a| - |\delta_b|,$$

поэтому

$$\delta l = |\delta_b| - |\delta_a|,$$

где $|\delta_a|$ и $|\delta_b|$ — абсолютные величины радиальных смещений точек a и b вследствие наклона аэроснимка.

Так как

$$|\delta_a| = -\delta_a \text{ и } |\delta_b| = \delta_b,$$

то

$$\delta l = \delta_a + \delta_b.$$

Воспользовавшись формулой (9.23), находим, что

$$\delta l = -2\frac{r^3}{f^2}\sin^2\varphi \sin^2\alpha_0.$$

Очевидно, что $|\delta l|_{\max}$ получим при $\varphi = 90°$, т. е. когда отрезок лежит на главной вертикали

$$|\delta l|_{\max} = 2\frac{r^3}{f^2}\sin^2\alpha_0.$$

При $\alpha_0 = 2°$, $r = 70$ мм, $f = 200$ мм

$$\delta l_{max} = 0{,}02 \text{ мм},$$

т. е. отрезки, делящиеся точкой c пополам, при $f \geqslant 200$ мм, имеют весьма малое искажение, которым в ряде случаев можно пренебречь.

При $f < 200$ мм, например $f = 70$ мм, $\delta l_{max} = 0{,}18$ мм. Однако и в этом случае искажение отрезка не выходит за пределы графической точности построения отрезка.

§ 52. СМЕЩЕНИЕ КОНТУРНЫХ ТОЧЕК НА АЭРОСНИМКЕ, ВЫЗЫВАЕМОЕ РЕЛЬЕФОМ МЕСТНОСТИ

Пусть на аэроснимке (в картинной плоскости) точка a — изображение некоторой контурной точки местности A, имеющей превышение h над горизонтальной плоскостью, относительно которой определяется высота фотографирования H (рис. 104). Примем за полюс точку надира n, а за полярную ось горизонталь. Полярными координатами точки a являются радиус-вектор $r = na$ и полярный угол φ.

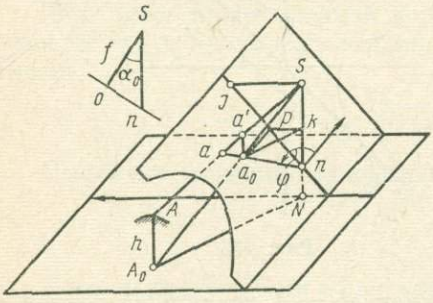


Рис. 104

Проведем из точки S проектирующий луч к точке A_0, являющейся ортогональной проекцией точки A на горизонтальную плоскость. Луч SA_0 пересекает картинную плоскость в точке a_0, расположенной на радиус-векторе r, так как отрезок aa_0 можно рассматривать как перспективу вертикальной линии h.

Итак, если бы данная точка местности находилась на горизонтальной плоскости, то ее изображение получилось бы в точке a_0. В действительности данная точка имеет превышение h и вследствие этого ее изображение смещается вдоль радиус-вектора в точку a. Учитывая, что рассматриваемая точка выбрана произвольно, приходим к выводу, что рельеф местности вызывает смещение контурных точек аэроснимка по направлениям, проходящим через точку надира.

При $h > 0$ точки удаляются от точки надира, а при $h < 0$ приближаются.

Обозначим смещение через δ_h. Проведем из точки a_0 горизонталь до встречи с главной вертикалью и прямую, параллельную A_0N, до пересечения с линией SN; полученные точки p и k соединим прямой, которая будет перпендикулярна к SN. Проведем из точки a_0 вертикальную прямую до пересечения с лучом SA в точке a'. Треугольник $a'aa_0$ подобен треугольнику San, а потому

$$\frac{\delta_h}{a'a_0} = \frac{r}{Sn},$$

откуда

$$\delta_h = \frac{r \cdot a'a_0}{Sn}. \qquad (9.28)$$

Из подобных треугольников SAA_0 и $Sa'a_0$, SA_0N и Sa_0k можно написать

$$a'a_0 = \frac{h}{H} Sk,$$

но

$$Sk = Sn - kn;\ Sn = \frac{f}{\cos\alpha_0}$$

Из прямоугольных треугольников a_0pn и pkn имеем:

$$kn = (r - \delta_h)\sin\varphi\sin\alpha_0.$$

Следовательно,

$$a'a_0 = \frac{h}{H}\left[\frac{f}{\cos\alpha_0} - (r - \delta_h)\sin\varphi\sin\alpha_0\right].$$

Подставляя выражения для $a'a_0$ и Sn в (9.28), после простых преобразований получаем

$$\delta_h = \frac{rh}{H}\,\frac{1 - \frac{r}{2f}\sin\varphi\sin\alpha_0}{1 - \frac{rh}{2Hf}\sin\varphi\sin\alpha_0}. \qquad (9.29)$$

Это и есть формула смещения точки за рельеф. Здесь r и φ в отличие от формулы (9.22) — полярные координаты точки аэроснимка с полюсом в точке надира, а не в точке нулевых искажений.

Если

$$r = 0,\ \text{то и}\ \delta_h = 0.$$

Это означает, что рельеф не вызывает смещения контурной точки, совпадающей с точкой надира.

При $\alpha_0 = 0°$

$$\delta_h = \frac{rh}{H}. \qquad (9.30)$$

Как видим, на горизонтальном аэроснимке смещения точек, обусловленные рельефом, остаются. При $\alpha_0 = 0$ точка надира находится в точке o и, следовательно, рельеф вызывает смещение контурных точек по направлениям, проходящим через главную точку аэроснимка. При этом наибольшее смещение следует ожидать на краях аэроснимка.

Формула (9.30) применяется и в случае плановой аэрофотосъемки, например при расчетах поправок за рельеф (см. § 58). О погрешности определения δ_h дает представление следующий пример.

Положим $\alpha_0 = 2°$, $f = 200$ мм, $r = 70$ мм, $\sin\varphi = 1$, $H = 2000$ м, $h = 30$ м.

Рассчитывая δ_h по формуле (9.29), имеем $\delta_h = 1{,}04$ мм.

Рассчитывая δ_h по формуле (9.30), получаем $\delta_h = 1{,}05$ мм.

Как видим, погрешность определения δ_h по формуле (9.30) при данных условиях выражается 0,01 мм, что во многих случаях не имеет практического значения.

§ 53. ИСКАЖЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ НА АЭРОСНИМКЕ, ВЫЗЫВАЕМОЕ НАКЛОНОМ АЭРОСНИМКА

Примем точку a (рис. 105) за вершину направлений на аэроснимке (картинной плоскости).

Обозначим полярные координаты точки a через r и φ, приняв за полюс точку нулевых искажений и за полярную ось — горизонталь. Проведем из точки a произвольное направление, составляющее с горизонталью h_ah_a

некоторый угол γ. Точку пересечения направления с линией горизонта hh обозначим буквой i.

Пусть точке a на предметной плоскости соответствует точка a'. Тогда проекция данного направления в предметной плоскости пройдет через a' параллельно лучу Si и составит с прямой $h'_a h'_a$, перпендикулярной к линии направления съемки, некоторый угол γ'.

Очевидно, что углы γ и γ', определяющие положение взаимно перспективных направлений на аэроснимке и предметной плоскости, будут взаимно перспективными. В общем случае угол γ' не равен углу γ.

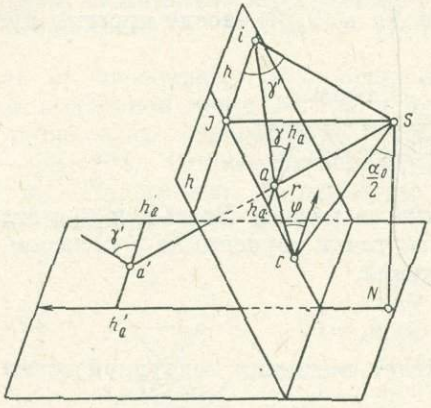


Рис. 105

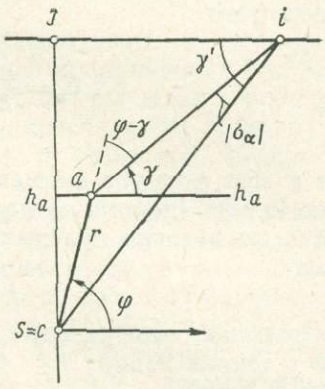


Рис. 106

Введем обозначение

$$\sigma_\alpha = \gamma - \gamma',$$

где σ_α — искажение направления, вызванное наклоном аэроснимка.

Для определения σ_α обратимся к рис. 106, на котором лучи SI и Si совмещены с картинной плоскостью путем поворота плоскости горизонта вокруг линии горизонта hh. При этом луч SI совпадает с главной вертикалью и точка S — с точкой c, так как нам известно, что $SI = cI$.

Угол при точке i в треугольнике aiS равен

$$\gamma' - \gamma = |\sigma_\alpha|,$$

где

$$|\sigma_\alpha| = -\sigma_\alpha.$$

Из треугольника находим

$$\frac{\sin|\sigma_\alpha|}{r} = \frac{\sin(\varphi-\gamma)}{Si}$$

или

$$\sin|\sigma_\alpha| = \frac{r}{Si}\sin(\varphi-\gamma). \qquad (a)$$

Из прямоугольного треугольника SiI имеем:

$$Si = \frac{SI}{\sin\gamma'}, \quad \text{но} \quad \gamma' = \gamma + |\sigma_\alpha| \quad \text{и} \quad SI = \frac{f}{\sin\alpha_0},$$

а потому

$$Si = \frac{f}{\sin\alpha_0 \sin(\gamma + |\sigma_\alpha|)}.$$

Подставляя это выражение в (а) и вводя обозначение $f' = \frac{f}{\sin \alpha_0}$, получаем

$$\sin |\sigma_\alpha| = \frac{r}{f'} \sin(\varphi - \gamma) \sin(\gamma + |\sigma_\alpha|).$$

Разделив обе части равенства на $\cos \sigma_\alpha$, находим

$$\operatorname{tg} |\sigma_\alpha| = \frac{r}{f'} \sin(\varphi - \gamma)(\sin \gamma + \cos \gamma \operatorname{tg} |\sigma_\alpha|),$$

откуда, учитывая, что $|\sigma_\alpha| = -\sigma_\alpha$, получаем строгую формулу искажения направления вследствие наклона аэроснимка

$$\operatorname{tg} \sigma_\alpha = -\frac{r}{f'} \frac{\sin \gamma \sin(\varphi - \gamma)}{1 - \frac{r}{f'} \cos \gamma \sin(\varphi - \gamma)} \tag{9.31}$$

Формула показывает, что величина искажения для данного аэроснимка является функцией направления γ и координат r и φ его вершины.

Напомним, что полюс находится в точке нулевых искажений c и

$$f' = \frac{f}{\sin \alpha_0}$$

Проанализируем формулу (9.31).

Пусть $r = 0$, тогда и $\sigma_\alpha = 0$ при любом значении γ, т. е. наклон аэроснимка не искажает направлений, выходящих из точки нулевых искажений. Это свойство точки c было известно и раньше.

Выясним, какие направления, выходящие из произвольно взятой точки аэроснимка, не искажаются от угла наклона.

При $r \neq 0$

$$\sigma_\alpha = 0, \quad \text{если} \quad \sin \gamma = 0 \quad \text{или} \quad \sin(\varphi - \gamma) = 0.$$

Отсюда находим для γ два значения:

$$\gamma = 0 \quad \text{и} \quad \gamma = \varphi.$$

Итак, в произвольной точке аэроснимка два направления не искажаются от наклона аэроснимка: одно направление совпадает с горизонталью, другое направление является продолжением радиус-вектора вершины направления.

На плановых аэроснимках искажение направлений определяют по упрощенной формуле, отбросив в знаменателе второй дроби в (9.31) второй член как малую величину по сравнению с первым членом — единицей.

Тогда

$$\operatorname{tg} \sigma_\alpha = -\frac{r}{f'} \sin \gamma \sin(\varphi - \gamma). \tag{9.32}$$

При $\alpha_0 \approx 2°$, $f \geqslant 100$ мм, $r = 70$ мм ошибка определения σ_α по этой упрощенной формуле не превышает 1′.

Воспользуемся упрощенной формулой и определим искажения направлений в главной точке и точке надира аэроснимка.

Для определения искажений направлений при главной точке в формулу (9.32) следует подставить

$$r = f \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \quad \text{и} \quad \varphi = 90°.$$

После простых преобразований получаем

$$\operatorname{tg}\sigma_\alpha = -\sin^2\frac{\alpha_0}{2}\sin 2\gamma,$$

или, учитывая малость σ_α,

$$\sigma_\alpha = -\rho\sin^2\frac{\alpha_0}{2}\sin 2\gamma. \tag{9.33}$$

Для точки надира имеем:

$$r = f\left(\operatorname{tg}\alpha_0 - \operatorname{tg}\frac{\alpha_0}{2}\right) \approx f\operatorname{tg}\frac{\alpha_0}{2}, \quad \varphi = 270°,$$

а потому

$$\sigma_\alpha = \rho\sin^2\frac{\alpha_0}{2}\sin 2\gamma. \tag{9.34}$$

Как видим, формула искажения направления для точки надира отличается от аналогичной формулы для главной точки только своим знаком.

Выясним, какие направления, выходящие из главной точки или из точки надира, не искажаются от наклона аэроснимка и какие направления имеют наибольшее искажение.

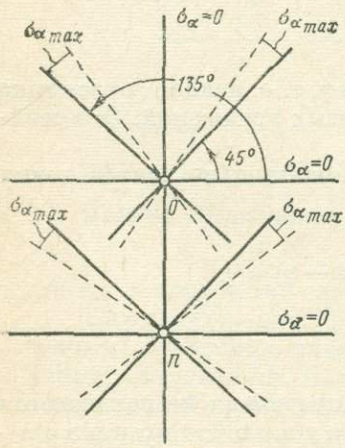


Рис. 107

Очевидно, что

$$\sigma_\alpha = 0, \text{ если } \gamma = 0 \text{ или } \gamma = 90°.$$

$|\sigma_\alpha|_{max}$ получаем при $\gamma = 45°$ или $\gamma = 135°$.

На рис. 107 направления на аэроснимке, т. е. искаженные направления, показаны сплошными линиями, а неискаженные направления — пунктиром.

Очевидно, что

$$|\sigma_\alpha|_{max} = \rho\sin^2\frac{\alpha_0}{2}.$$

При $\alpha_0 = 2°$ $|\sigma\alpha|_{max} = 0{,}8'$.

Отсюда видим, что на плановом аэроснимке наклон вызывает очень небольшое искажение направлений с вершинами в главной точке и точке надира.

Возьмем произвольную точку планового аэроснимка и определим, какое направление, выходящее из этой точки, претерпевает наибольшее искажение и какова величина этого искажения.

Положим в формуле (9.32) $\operatorname{tg}\sigma_\alpha = \frac{\sigma_\alpha}{\rho}$. Тогда для абсолютного значения σ_α будем иметь

$$|\sigma_\alpha| = \rho\frac{r}{f}\sin\gamma\sin(\varphi-\gamma). \tag{б}$$

Для определения $|\sigma_\alpha|_{max}$ берем первую производную

$$\frac{d\sigma}{d\gamma} = \rho\frac{r}{f}[\cos\gamma\sin(\varphi-\gamma) - \sin\gamma\cos(\varphi-\gamma)]$$

и приравниваем ее нулю.

Очевидно, что

$$\frac{d\sigma}{d\gamma} = 0,$$

если

$$\cos\gamma \sin(\varphi - \gamma) - \sin\gamma \cos(\varphi - \gamma) = 0.$$

Изменив знаки на обратные, запишем равенство в виде

$$\sin[\gamma - (\varphi - \gamma)] = 0.$$

Откуда находим, что

$$\gamma - (\varphi - \gamma) = 0^\circ \quad \text{или} \quad \gamma - (\varphi - \gamma) = 180^\circ.$$

Определяя отсюда γ, получаем

$$\gamma = \frac{\varphi}{2} \quad \text{и} \quad \gamma = 90^\circ + \frac{\varphi}{2}.$$

Чтобы решить вопрос, при каком из этих двух углов γ будем иметь $|\sigma_\alpha|_{max}$, подставим полученные выражения γ в (б).

При

$$\gamma = \frac{\varphi}{2} \quad |\sigma_\alpha| = \rho \frac{r}{f'} \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

но

$$\sin^2 \frac{\varphi}{2} = \frac{1}{2}(1 - \cos\varphi),$$

поэтому

$$|\sigma_\alpha| = \frac{\rho r}{2f'}(1 - \cos\varphi). \qquad (в)$$

При

$$\gamma = 90^\circ + \frac{\varphi}{2} \quad |\sigma_\alpha| = \rho \frac{r}{f'} \cos^2 \frac{\varphi}{2},$$

но

$$\cos^2 \frac{\varphi}{2} = \frac{1}{2}(1 + \cos\varphi),$$

поэтому

$$|\sigma_\alpha| = \frac{\rho r}{2f'}(1 + \cos\varphi). \qquad (г)$$

Сравнивая (в) с (г), приходим к выводу, что если $\cos\varphi$ положителен, $|\sigma_\alpha|_{max}$ определится по формуле (г) и, наоборот, при отрицательном значении $\cos\varphi$ — по формуле (в).

Положительное значение $\cos\varphi$ имеет, когда вершина направления находится справа от главной вертикали, и отрицательное значение — когда вершина направления находится слева от главной вертикали. Обе формулы могут быть объединены в одну, если при определении $|\sigma_\alpha|_{max}$ брать для $\cos\varphi$ абсолютное значение.

Тогда

$$|\sigma_\alpha|_{max} = \frac{\rho r}{2f'}(1 + |\cos\varphi|). \qquad (9.35)$$

По этой формуле и определяется максимальное искажение направления, выходящего из произвольной точки планового аэроснимка, вследствие угла наклона.

Как видим, на данном аэроснимке $|\sigma_\alpha|_{max}$ — функция координат вершины направления r и φ.

Если вершина направления находится справа от главной вертикали (точки *1* и *4* на рис. 108), то направление, претерпевающее максимальное искажение, имеет угол $\gamma = \varphi/2 + 90°$; если же *вершина направления находится* слева от главной вертикали (точки *2* и *3*), то угол $\gamma = \varphi/2$. Очевидно, что если вершина направлений находится на главной вертикали (точка *5*), то $|\sigma_\alpha|_{max}$ имеют два взаимно перпендикулярных направления, составляющих с горизонталью углы γ в 45 и 135°.

При этом

$$|\sigma_\alpha|_{max} = \rho \frac{r}{2f'}.$$

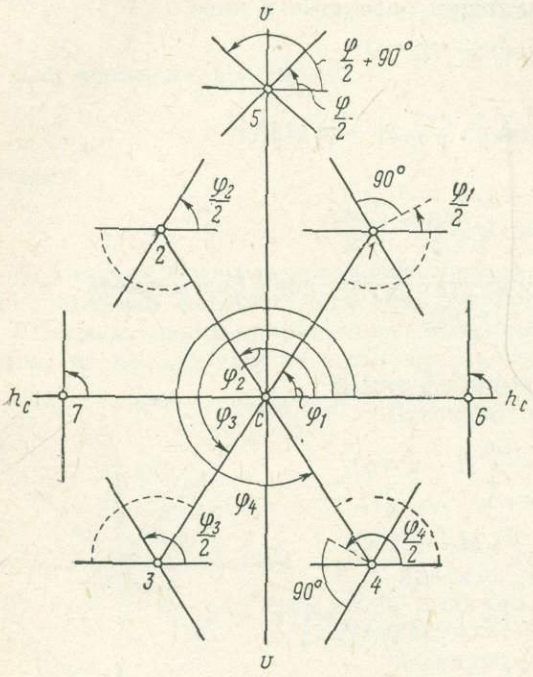


Рис. 108

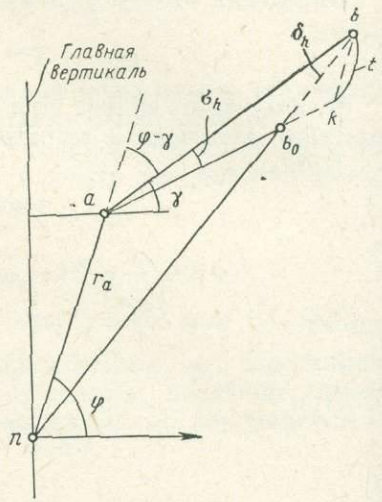


Рис. 109

Если вершина направлений лежит на горизонтали, проходящей через точку нулевых искажений (точки *6* и *7*), то $|\sigma_\alpha|_{max}$ получаем при $\gamma = 90°$.

При этом

$$|\sigma_\alpha|_{max} = \rho \frac{r}{f'}.$$

Как видим, при одинаковых значениях r направления с вершиной на *горизонтали, проходящей через точку нулевых искажений, искажаются вдвое* больше направлений, имеющих вершину на главной вертикали.

Нетрудно убедиться в том, что направление с наибольшим искажением при любом положении вершины направления — всегда биссектриса тупого угла, образованного горизонталью с радиус-вектором r. Эти углы обозначены на рис. 108 пунктирными дужками.

§ 54. ИСКАЖЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ НА АЭРОСНИМКЕ, ВЫЗЫВАЕМОЕ РЕЛЬЕФОМ МЕСТНОСТИ

Примем на аэроснимке (рис. 109) произвольную точку a с полярными координатами r_a, φ *за вершину направления и проведем из нее направление* на произвольную точку b, составляющее с горизонталью угол γ. Допустим, что на местности точка B имеет превышение $h > 0$ относительно точки A.

Если бы точка местности B не имела превышения, то ее изображение получилось бы в точке b_0, смещенной относительно точки b на величину δ_h в сторону точки надира n.

Очевидно, что угол σ_h, образованный направлениями ab_0 и ab, представляет искажение направления вследствие рельефа местности.

Для определения σ_h проведем из точки b прямую, параллельную r_a, до пересечения в точке k с продолжением прямой ab_0.

Из треугольника abk имеем:

$$\sin \sigma_h = \frac{t}{d} \sin[(\varphi - \gamma) + \sigma_h], \tag{а}$$

где $d = ab$.

Из подобных треугольников b_0bk и b_0na находим

$$t = r_a \frac{\delta_h}{r - \delta_h}, \tag{б}$$

где r — радиус-вектор точки b.

Подставляя выражение t из (б) в (а), получаем

$$\sin \sigma_h = r_a \frac{\delta_h}{(r - \delta_h)\, d} \sin[(\varphi - \gamma) + \sigma_h],$$

или

$$\operatorname{tg} \sigma_h = r_a \frac{\delta_h}{(r - \delta_h)\, d} [\sin(\varphi - \gamma) + \cos(\varphi - \gamma) \operatorname{tg} \sigma_h],$$

откуда находим

$$\operatorname{tg} \sigma_h = r_a \frac{\delta_h}{(r - \delta_h)\, d} \frac{\sin(\varphi - \gamma)}{1 - \frac{\delta_h}{(r - \delta_h)\, d} \cos(\varphi - \gamma)}. \tag{9.36}$$

По этой строгой формуле и определяется искажение направлений вследствие рельефа местности. δ_h, входящее в формулу, определяется по (9.29).

Из формулы (9.36) следует, что $\sigma_h = 0$, при $r_a = 0$, т. е. направления не искажаются вследствие рельефа, если они выходят из точки надира.

Если же вершиной направлений служит произвольная точка ($r_a \neq 0$), то не искажается только одно направление, проходящее через точку надира $\gamma = \varphi$.

В большинстве случаев при определении σ_h можно пользоваться упрощенной формулой, отбросив в знаменателе второй дроби второй член как малую величину по сравнению с первым членом — единицей.

Тогда

$$\operatorname{tg} \sigma_h = r_a \frac{\delta_h}{(r - \delta_h)\, d} \sin(\varphi - \gamma). \tag{9.37}$$

При определении искажения направлений вследствие рельефа на плановых аэроснимках возможно дальнейшее упрощение формулы (9.37).

Полагая $\sigma_h \approx rh/H$ и $r - \delta_h \approx r$, будем иметь:

$$\operatorname{tg} \sigma_h = r \frac{h}{Hd} \sin(\varphi - \gamma). \tag{9.38}$$

Здесь вместо r_a записано r, где r, φ — полярные координаты вершины направления; γ — угол, определяющий взятое направление; d — расстояние между точками; h — превышение точки местности, на которую взято направление, относительно точки местности — вершины направления; H — высота фотографирования относительно точки местности — вершины направления.

Воспользуемся формулой (9.38) и определим искажение направлений, выходящих из главной точки и точки нулевых искажений.

Полагая $r = f \operatorname{tg} \alpha_0$ и $\varphi = 90°$, получаем

$$\operatorname{tg} \sigma_h = \frac{hf}{Hd} \operatorname{tg} \alpha_0 \cos \gamma,$$

или

$$\sigma_h = \rho \frac{h}{dm} \operatorname{tg} \alpha_0 \cos \gamma, \tag{9.39}$$

где m — знаменатель масштаба аэроснимка, $\rho' = 3438'$.

При $r = f \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}$ и $\varphi = 90°$

$$\sigma_h = \rho \frac{h}{dm} \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \cos \gamma. \tag{9.40}$$

По этим формулам и определяется искажение направлений вследствие рельефа местности с вершинами в главной точке (9.39) и точке нулевых искажений (9.40) планового аэроснимка. Как видим, при точке *о* направления практически искажаются вдвое больше, чем при точке *с*.

Из формул следует, что $\sigma_h = 0$, если $\gamma = 90°$, и $\sigma_h = \max$ при $\gamma = 0°$, т. е. наибольшее искажение (при заданном значении $\frac{h}{d}$) получает направление, совпадающее с горизонталью.

Глава 10

ФОТОСХЕМЫ

§ 55. ПОНЯТИЕ О ФОТОСХЕМАХ

Фотосхемой называется фотографическое изображение местности, полученное путем монтажа плановых аэроснимков.

Фотосхему равнинной и равнинно-холмистой местности можно рассматривать как приближенный фотографический план местности. Применение фотосхем разнообразно: они нередко используются в качестве обзорного материала, при полевом дешифрировании, съемке рельефа, географических, геологических и других исследованиях, предварительных инженерно-проектировочных работах и в ряде других случаев, когда допускается меньшая точность измерений, чем по фотопланам и топографическим картам.

Фотосхемы делятся на маршрутные и многомаршрутные. В первом случае монтируются аэроснимки, принадлежащие к одному маршруту, во втором случае — нескольким маршрутам.

Точность фотосхемы существенно зависит от углов наклона аэроснимков, рельефа местности, колебаний высоты полета, погрешностей монтажа аэроснимков. Наиболее точный монтаж по начальным направлениям, менее точный, но более быстрый — по контурам.

Первый способ монтажа целесообразно применять в том случае, когда фотосхема предназначена для измерений, второй способ монтажа — в остальных случаях, например при использовании фотосхемы в качестве обзорного материала, для дешифрирования и пр. Способы монтажа и техника изготовления фотосхем изложены в Практикуме по фотограмметрии [16].

§ 56. ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ ПО МАРШРУТНОЙ ФОТОСХЕМЕ

Рассмотрим точность определения расстояний по маршрутной фотосхеме, смонтированной по начальным направлениям, полагая, что ее масштаб определен по двум опознакам, расположенным в начале и конце маршрута (рис. 110), и в точках пересечения прямой I—II со стыковыми линиями смежных аэроснимков невязки в контурах отсутствуют.

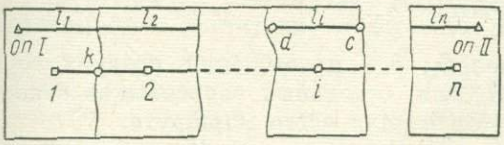


Рис. 110

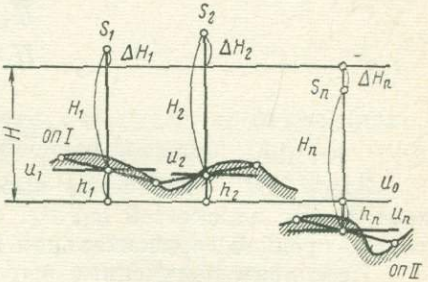


Рис. 111

Обозначим масштаб фотосхемы через $1/m$ и напишем для него выражение

$$\frac{1}{m}=\frac{\sum_{1}^{n} l}{L_{\text{оп}}}, \tag{10.1}$$

где $L_{\text{оп}}$ — горизонтальное проложение расстояния между опознаками, l — отрезки на аэроснимках, заключенные между стыковыми линиями.

При $\alpha_0 = 0$ этим отрезкам на местности соответствуют расстояния

$$L_1=l_1\frac{H_1}{f};\quad L_2=l_2\frac{H_2}{f},\ \ldots\ L_n=l_n\frac{H_n}{f}.$$

При $\alpha_0 \neq 0$ зависимости принимают вид

$$\left.\begin{aligned} L_1&=(l_1+\delta l_1)\frac{H_1}{f}\\ L_2&=(l_2+\delta l_2)\frac{H_2}{f}\\ &\ldots\ldots\ldots\\ L_n&=(l_n+\delta l_n)\frac{H_n}{f}\end{aligned}\right\}. \tag{10.2}$$

Здесь δl_1, δl_2, . . . , δl_n — поправки в отрезки l за углы наклона аэроснимков и рельеф местности.

H_1, H_2, . . . , H_n — высоты фотографирования относительно соответственных горизонтальных плоскостей u_1, u_2, . . . , u_n, проходящих на среднем уровне между точками местности, соответствующими концам отрезков l_1, l_2, . . . , l_n. Будем считать, что эти плоскости можно принять и за средние горизонтальные плоскости для данных аэроснимков.

Представим расстояние между опознаками $L_{\text{оп}}$ как сумму отрезков L_1, L_2, . . . , L_n.

Если принять в равенствах (10.2) $l_1 = l_2 = \ldots = l_n = l$, то

$$L_{оп} = \frac{l}{f}\sum_1^n H + \frac{1}{f}\sum_1^n \delta l H. \qquad (10.3)$$

Введем среднюю высоту фотографирования H для маршрута и среднюю горизонтальную плоскость u_0. Из рис. 111 следует, что

$$H_1 = H + \Delta H_1 - h_1$$
$$H_2 = H + \Delta H_2 - h_2$$
$$\ldots\ldots\ldots$$
$$H_n = H + \Delta H_n - h_n.$$

Здесь ΔH — изменение высоты полета; h — превышения средних горизонтальных плоскостей $u_1, u_2, \ldots, u_n$ для отдельных аэроснимков относительно средней горизонтальной плоскости u_0 для всего маршрута.

Подставим полученные выражения для $H_1, H_2, \ldots, H_n$ в первое слагаемое равенства (10.3), во втором слагаемом, содержащем поправочные члены, практически можно принять $H_1 = H_2 = \ldots = H_n = H$.

Тогда

$$L_{оп} = \frac{H}{f} ln + \frac{l}{f}\left(\sum_1^n \Delta H - \sum_1^n h\right) + \frac{H}{f}\sum_1^n \delta l. \qquad (10.4)$$

Подставив это выражение в равенство (10.1) и решив его относительно m, получим

$$m = \frac{H}{f} + \frac{1}{fn}\left(\sum_1^n \Delta H - \sum_1^n h\right) + \frac{H}{fln}\sum_1^n \delta l. \qquad (10.5)$$

Так выражается знаменатель масштаба фотосхемы, определенного по двум крайним опознакам, при отсутствии невязок в контурах на стыковых линиях смежных аэроснимков.

В действительности при монтаже по начальным направлениям достигается совмещение контуров по середине начального направления, т. е. в точке K (см. рис. 110). На остальных участках стыковой линии возможны несовпадения одноименных контурных точек смежных аэроснимков, т. е. невязки, которые обозначим через t.

Если учесть эти невязки, то выражение для масштаба примет вид

$$\frac{1}{m} = \frac{\sum_1^n l + \sum_1^{n-1} t}{L_{оп}},$$

или

$$m = \frac{L_{оп}}{\sum_1^n l}\left(1 + \frac{\sum_1^{n-1} t}{\sum_1^n l}\right)^{-1}.$$

Учитывая, что второй член в скобке — величина малая по сравнению с единицей, разложим бином с отрицательным показателем в ряд и ограничимся первыми двумя членами.
Тогда

$$m = \frac{L_{\text{оп}}}{\sum_1^n l} - \frac{L_{\text{оп}}}{\sum_1^n l} \frac{\sum_1^{n-1} t}{\sum_1^n l},$$

где $\sum_1^n l = nl$.

Подставим в первый член выражение для $L_{\text{оп}}$ из (10.4), во второй (поправочный) член достаточно подставить приближенное значение для $L_{\text{оп}}$, тогда

$$\frac{L_{\text{оп}}}{\sum_1^n l} \approx \frac{H}{f}.$$

Получим

$$m = \frac{H}{f} + \frac{1}{fn}\left(\sum_1^n \Delta H - \sum_1^n h\right) + \frac{H}{fln}\left(\sum_1^n \delta l - \sum_1^{n-1} t\right). \qquad (10.6)$$

Воспользуемся этим масштабом для определения расстояния между опознаком I и контурной точкой c (см. рис. 110).
Обозначим определенное по фотосхеме расстояние через L

$$L = \left(li + \sum_1^i t\right) m.$$

Истинное расстояние между этими точками обозначим через L° и по аналогии с (10.4) запишем

$$L^0 = \frac{H}{f} li + \frac{l}{f}\left(\sum_1^i \Delta H - \sum_1^i h\right) + \frac{H}{f}\sum_1^i \delta l.$$

Очевидно, что ошибка определения данного расстояния при использовании среднего масштаба фотосхемы будет

$$L - L^0 = \mathrm{l} \cdot \mathrm{i} \cdot \mathrm{m} + m\sum_1^i t - L^0.$$

Подставляя сюда выражения для m и L^0, после простых преобразований получаем

$$L - L^0 = \frac{l}{fn}\left[(i-n)\sum_1^i \Delta H + i\sum_{i+1}^n \Delta H - (i-n)\sum_1^i h - i\sum_{i+1}^n h\right] +$$

$$+ \frac{H}{fn}\left[(i-n)\sum_1^i \delta l + i\sum_{i+1}^n \delta l\right] - \frac{H}{fn}\left[(i-n)\sum_1^i t + i\sum_{i+1}^{n-1} t\right]. \qquad (10.7)$$

Заметим, что величины $\Delta H_1, \Delta H_2, \ldots, \Delta H_n$ одного порядка, независимы и носят характер случайных ошибок; то же можно сказать и о величинах $\delta l_1, \delta l_2, \ldots, \delta l_n$. Что же касается превышений h, то при их определении относительно средней горизонтальной плоскости u_0 можно предположить, что положительные и отрицательные превышения будут равновероятны. Обозначив предельные значения указанных величин через ΔH, δl и h и предельную ошибку определения расстояния по фотосхеме через ΔL, можно записать

$$\Delta L^2 = \left(\frac{l}{fn}\right)^2 [\Delta H^2 i\,(i-n)^2 + \Delta H^2 (n-i)\,i^2 + h^2 i\,(i-n)^2 + h^2 (n-i)\,i^2] +$$

$$+ \left(\frac{H}{fn}\right)^2 [\delta l^2 i\,(i-n)^2 + \delta l^2 (n-i)\,i^2] + \left(\frac{H}{fn}\right)^2 [t^2 i\,(i-n)^2 + t^2 (n-i-1)\,i^2]. \quad (10.8)$$

Перепишем выражение в виде

$$\Delta L^2 = \frac{l^2}{f^2}\frac{i\,(n-i)}{n}(\Delta H^2 + h^2) + \frac{H^2}{f^2}\frac{i\,(n-i)}{n}\delta l^2 + \frac{H^2}{f^2}\frac{i\,(n^2-ni-i)}{n^2}t^2,$$

или

$$\Delta L = \frac{H}{f}\sqrt{\frac{i\,(n-i)}{n}\left(\frac{\Delta H^2+h^2}{H^2}l^2 + \delta l^2\right) + \frac{i\,(n^2-ni-i)}{n^2}t^2}. \quad (10.9)$$

Нетрудно видеть, что $\Delta L_{\max}$ получим при $i = n/2$ (полагаем, что n — число четное), т. е. когда определяемое расстояние равно половине расстояния между опознаками

$$\Delta L_{max} = \frac{H}{f}\sqrt{\frac{n}{4}\left(\frac{\Delta H^2+h^2}{H^2}l^2 + \delta l^2\right) + \frac{n-1}{4}t^2}.$$

Если $n \geqslant 6$, то единицей в последнем члене под радикалом можно пренебречь и формулу записать в следующем виде:

$$\Delta L_{\max} = \frac{1}{2}\frac{H}{f}\sqrt{n}\sqrt{\frac{\Delta H^2+h^2}{H^2}l^2 + \delta l^2 + t^2}.$$

Напишем формулу относительной максимальной ошибки определения расстояния по фотосхеме, пользуясь ее масштабом, вычисленным по двум крайним опознакам.

Полагая $L \approx \frac{H}{f}\,l\,\frac{n}{2}$, получаем

$$\frac{\Delta L_{max}}{L} = \frac{1}{\sqrt{n}}\sqrt{\left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{h}{H}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{t}{l}\right)^2}. \quad (10.10)$$

где H — средняя высота фотографирования, ΔH — максимальное изменение высоты фотографирования, h — максимальное превышение средних горизонтальных плоскостей для отдельных аэроснимков относительно средней горизонтальной плоскости для всего маршрута, t — максимальная невязка в контурах на стыковых линиях, δl — максимальное искажение отрезка l вследствие наклона аэроснимка и рельефа местности.

Из формулы (10.10) следует, что $\Delta L_{\max}/L$ обратно пропорционально корню квадратному из числа n аэроснимков, составляющих маршрутную фотосхему.

Максимальное искажение отрезка l, обусловленное наклоном аэроснимка, имеем, когда отрезок перпендикулярен к главной вертикали.

При этом

$$\frac{\delta l_\alpha}{l} = \frac{\delta_\alpha}{y},$$

где y — расстояние от точки нулевых искажений до отрезка l, δ_α — искажение y вследствие наклона аэроснимка.

В нашем случае ($\varphi = 90°$)

$$\delta_\alpha = \frac{y^2}{f} \sin \alpha_0,$$

поэтому

$$\frac{\delta l_\alpha}{l} = \frac{y}{f} \sin \alpha_0. \qquad (10.11)$$

Как видим, относительная величина искажения отрезка обратно пропорциональна фокусному расстоянию камеры.

Для определения искажения отрезка l вследствие рельефа местности обратимся к рис. 112.

Здесь a и b — изображения контурных точек местности. Прямая $ab = l$ перпендикулярна к главной вертикали и делится ею пополам. Если бы точки местности A и B не имели превышения над средней горизонтальной плоскостью u_0, то их изображения получились бы в точках a_0 и b_0 и вместо отрезка l мы имели бы отрезок $l_0 = a_0 b_0$.

Очевидно, что $\delta l_h = l - l_0$.

Отрезки $aa_0 = \delta_{h_a}$ и $bb_0 = \delta_{h_b}$ представляют радиальные смещения контурных точек вследствие рельефа местности. В случае плановой аэросъемки применима формула

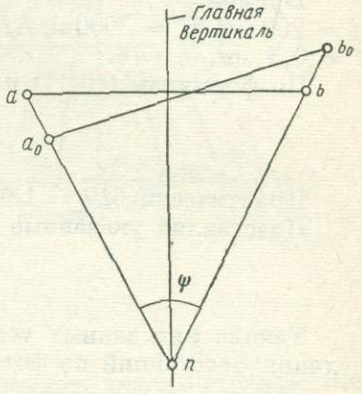


Рис. 112

$$\delta_h = \frac{rh}{H}.$$

В нашем случае $\delta_{h_a} = |\delta_{h_b}|$. Это следует из того, что радиус-векторы точек a и b равны, а превышения различаются по знаку.

Из треугольника na_0b_0 находим

$$l_0 = \sqrt{(r - \delta_h)^2 + (r + \delta_h)^2 - 2(r - \delta_h)(r + \delta_h)\cos\psi},$$

или после простых преобразований

$$l_0 = \sqrt{2}\sqrt{r^2(1 - \cos\psi)\left(1 + \frac{h^2}{H^2}\frac{1 + \cos\psi}{1 - \cos\psi}\right)},$$

но $1 - \cos\psi = 2\sin^2\frac{\psi}{2}$, $\frac{1 + \cos\psi}{1 - \cos\psi} = \operatorname{ctg}^2\frac{\psi}{2}$,

поэтому

$$l_0 = 2r \sin\frac{\psi}{2}\sqrt{1 + \frac{h^2}{H^2}\operatorname{ctg}^2\frac{\psi}{2}}.$$

Учитывая, что

$$2r \sin\frac{\psi}{2} = l; \quad \operatorname{ctg}\frac{\psi}{2} = \frac{2y}{l}; \quad \frac{\delta l_h}{l} = \frac{l - l_0}{l},$$

находим

$$\frac{\delta l_h}{l} = 1 - \sqrt{1 + 4\left(\frac{h}{H}\right)^2\left(\frac{y}{l}\right)^2}.$$

Полагая, что второй член под радикалом малая величина по сравнению с первым членом, можно принять

$$\frac{\delta l_h}{l} = 1 - \left[1 + 2\left(\frac{h}{H}\right)^2 \left(\frac{y}{l}\right)^2\right],$$

или окончательно

$$\frac{|\delta l_h|}{l} = 2\left(\frac{h}{H}\right)^2 \left(\frac{y}{l}\right)^2. \qquad (10.12)$$

Здесь h — превышение точек относительно горизонтальной плоскости, проведенной на среднем уровне между этими точками, y — отстояние отрезка l относительно точки надира (приближенно главной точки).

Подсчитаем теперь относительную ошибку определения расстояния по фотосхеме по формуле (10.10).

Примем:

$f = 200$ мм, $H = 2000$ м, $\Delta H = 10$ м, $\alpha_0 = 2°$, $h = 30$ м, $l = 70$ мм, $y = 70$ мм, $t = 0{,}5$ мм, $n = 6$.

По формулам (10.11) и (10.12) находим

$$\frac{\delta l_\alpha}{l} = \frac{1}{95}; \quad \frac{\delta l_h}{l} = \frac{1}{2222}.$$

Практически $\delta l/l = 1/95$.

Подставляя указанные величины в формулу (10.10), находим

$$\frac{\Delta L_{max}}{L} = \frac{1}{120}.$$

Такова при данных условиях относительная максимальная ошибка определения расстояний по фотосхеме.

Глава 11

ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ АЭРОСНИМКОВ

§ 57. ОБЩЕЕ ПОНЯТИЕ. АНАЛИЗ ТРАНСФОРМИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ. СПОСОБЫ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ

Различают два случая трансформирования (преобразования) аэроснимков:

1) трансформирование отдельных элементов изображения, например координат контурных точек;

2) трансформирование изображения местности в целом.

В первом случае задача трансформирования заключается в преобразовании координат контурных точек, измеренных на наклонном аэроснимке, в координаты точек горизонтального аэроснимка. Трансформирование координат широко применяется в аналитической фототриангуляции. Эту задачу решают аналитическим способом, используя формулы связи координат соответственных точек горизонтального и наклонного аэроснимков.

Во втором случае задача трансформирования заключается в преобразовании изображения местности на наклонном аэроснимке в изображение, идентичное плану местности, масштаб которого задается.

Для строгого решения этой задачи необходимо при трансформировании устранить смещения контурных точек, обусловленные наклоном аэроснимка и рельефом местности.

При практическом решении задачи зачастую достаточно бывает устранить смещения, обусловленные только наклоном аэроснимка (разномасштабность вследствие наклона аэроснимка). Это достигается путем коллинеарного трансформирования.

Если же при трансформировании необходимо устранить также смещения контурных точек, обусловленные рельефом местности (разномасштабность вследствие наклона аэроснимка и рельефа местности), то применяют неколлинеарное трансформирование.

Коллинеарное трансформирование осуществляется значительно проще, чем неколлинеарное.

Коллинеарное трансформированное изображение можно рассматривать как изображение, полученное путем центрального проектирования всех точек наклонного аэроснимка на неподвижный горизонтальный экран.

Неколлинеарное трансформированное изображение получается методом центрального проектирования отдельных точек наклонного аэроснимка или небольших участков на горизонтальный экран, высота которого непрерывно изменяется в соответствии с рельефом местности.

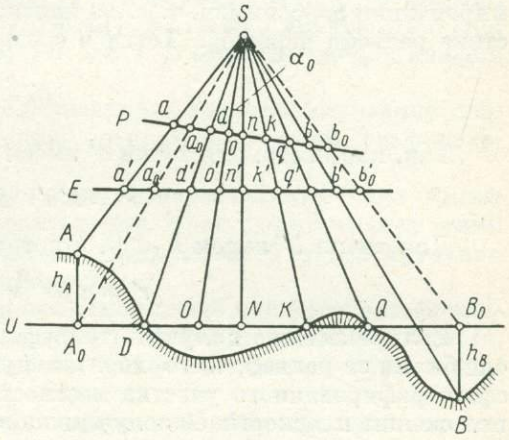


Рис. 113

Коллинеарное трансформирование принято называть просто «трансформированием», а неколлинеарное — дифференциальным или щелевым трансформированием (проекция аэроснимка на экран осуществляется небольшими участками путем сканирования с помощью щелевого приспособления).

Дифференциальное трансформирование будет рассмотрено в § 133.

Перейдем к анализу коллинеарного трансформированного изображения.

На рис. 113 в главной вертикальной плоскости показано положение аэроснимка P в момент фотографирования относительно местности и положение плоскости E, на которую проектируется аэроснимок при трансформировании.

Точки местности A, D, K, Q, B изобразились на аэроснимке в точках a, d, k, q, b, а при трансформировании они получились в точках a', d', k', q', b'.

Из рисунка видно, что трансформированное изображение геометрически можно рассматривать также как центральную проекцию местности на горизонтальную плоскость E из той же точки S пространства, с которой был получен аэроснимок P.

Проведем на местности горизонтальную плоскость U и потребуем, чтобы сечение местности этой плоскостью изобразилось на плоскости E в масштабе $1/M$, т. е.

$$\frac{d'k'}{DK}=\frac{k'q'}{KQ}=\frac{Sn'}{SN}=\frac{1}{M}.$$

Откуда находим, что плоскость E должна находиться от точки S на расстоянии

$$Sn'=\frac{H}{M},$$

где $H = SN$ — высота фотографирования относительно горизонтальной плоскости U.

Изображения всех остальных точек местности, имеющих превышения над плоскостью U, будут смещены относительно планового положения по радиус-векторам, проходящим через точку надира n'. Эти смещения аналогичны смещениям точек вследствие рельефа на горизонтальном аэроснимке. Принимая трансформированное изображение за план, смещения точек, вызванные рельефом, рассматриваем как ошибки. Обозначим радиус-вектор точки на трансформированном аэроснимке, т. е. на плоскости E, через r', а смещение точки вследствие рельефа через δ'_h. Тогда в соответствии с формулой (9.27) запишем

$$\delta'_h = \frac{r'h}{H}. \tag{11.1}$$

Так, например, для точки a' имеем $h > 0$ и, следовательно, $\delta'_h > 0$, причем

$$r'_a = n'a' \quad \text{и} \quad \delta'_h = a'a'_0.$$

Для точки b' имеем $h < 0$, а потому и $\delta'_h < 0$, причем

$$r'_b = n'b' \quad \text{и} \quad |\delta'_h| = b'b'_0.$$

Если возможно получить трансформированный аэроснимок с допустимыми ошибками за рельеф, то горизонтальную плоскость проводят на средней высоте сфотографированного участка местности (на рис. 113 $h_A = |h_B|$). При таком положении плоскости U получим наименьшее значение для $|h|_{max}$ и, следовательно, наименьшее значение для $|\delta'_h|_{\max}$.

При этом можно ожидать, что положительные и отрицательные ошибки за рельеф будут равновероятны и сумма положительных значений δ'_h будет примерно равна модулю суммы отрицательных значений δ'_h.

Определим предельные превышения $h_{\max}$, при которых ошибки за рельеф не превышают допустимой величины $\delta'_{h\,\max}$.

Исходя из равенства (11.1), запишем

$$h_{\max} = \frac{H}{r'} \delta'_{h\,\max}.$$

При трансформировании плановых аэроснимков в масштабе $1 : M$ можно принять

$$\frac{r'}{r} \approx \frac{\frac{1}{M}}{\frac{f}{H}},$$

где r — радиус-вектор на нетрансформированном аэроснимке.

Откуда

$$r' \approx r \frac{H}{fM}, \tag{11.2}$$

и, следовательно,

$$h_{\max} = \frac{fM}{r} \delta'_{h\,\max}. \tag{11.3}$$

По этой формуле и определяется предельное превышение точек местности относительно средней горизонтальной плоскости U при условии, чтобы ошибки за рельеф не превышали заданной величины $\delta'_{h\,\max}$.

Из формулы (11.3) следует, что $h_{\max}$ прямо пропорционально f.

Пусть масштаб трансформирования $1/M = 1/25\,000$, $f = 200$ мм, $r = 80$ мм; если потребовать, чтобы

$$\delta'_{h\max} = 0{,}4 \text{ мм},$$

то

$$h_{\max} = 25 \text{ м}.$$

Если превышения точек местности относительно средней горизонтальной плоскости больше допустимых, рассчитанных по формуле (11.3), то ошибки за рельеф будут превышать допустимую величину, их можно уменьшить путем трансформирования аэроснимка по зонам (см. § 80). В этом случае для каждой зоны выбирается своя средняя плоскость.

Применяются различные способы коллинеарного трансформирования изображения на аэроснимке: фотомеханический, оптико-графический, графомеханический и графический *.

Производственное значение при создании топографических карт имеют первые два способа, как наиболее производительные. Трансформирование этими способами осуществляется путем оптического центрального проектирования аэроснимка на экран специальными приборами.

При фотомеханическом способе (или иначе при фототрансформировании) трансформированное изображение отпечатывается на фотобумаге, при оптико-графическом способе оно вычерчивается карандашом на планшете в условных знаках.

При графомеханическом способе трансформирование производится с помощью механических приборов, называемых перспектографами [1]. Этот способ не нашел практического применения из-за малой производительности по сравнению с оптико-графическим.

Графический способ трансформирования не требует применения специальных приборов. Трансформирование обычно осуществляется путем построения на аэроснимке и на планшете взаимно проективных сеток, которыми и пользуются для перенесения контуров с аэроснимка на планшет.

Для трансформирования аэроснимка необходимо знать элементы внутреннего и внешнего ($\alpha_0, \varkappa, H$) ориентирования или иметь на аэроснимке и плоскости трансформирования (на плане) четыре взаимно проективные точки, из которых никакие три не лежат на одной прямой. Эти точки принято называть ориентирующими или трансформационными.

§ 58. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТИРУЮЩИХ (ТРАНСФОРМАЦИОННЫХ) ТОЧЕК

Пусть на аэроснимке имеем четыре контурные точки, плановое положение которых известно. Если все точки на местности лежат в одной горизонтальной плоскости, то плановое положение точек проективно связано с контурными точками аэроснимка, так как на плоскости трансформирования E имеем подобное изображение горизонтальной плоскости U (см. рис. 113). Таким образом, с контурной точкой d аэроснимка проективно связана точка d' на плане, совпадающая с центральной проекцией точки местности D на плоскости E.

Если точка имеет превышение над плоскостью U, например точка A, то с контурной точкой аэроснимка будет проективно связана на плоскости трансформирования не точка a'_0, а точка a'. Для получения этой точки необходимо

---

* В стадии разработки находится электронный способ трансформирования.

от планового положения a'_0 точки отложить величину δ'_h (в данном случае на продолжении радиус-вектора, проходящего через точку надира, так как $h_A > 0$).

Можно поступить и наоборот, т. е. принять на плоскости трансформирования за ориентирующую точку плановое положение точки A — точку a'_0 и определить на аэроснимке точку, проективно связанную с нею. Очевидно, что такой точкой будет a_0. Чтобы ее получить, необходимо от контурной точки a по направлению к точке надира аэроснимка отложить величину δ_h.

Величины δ_h и δ'_h, которые откладывают на аэроснимке или на плане для получения ориентирующих точек, называют п о п р а в к а м и з а р е л ь е ф.

Результаты трансформирования не зависят от того, где откладывались поправки за рельеф, — на аэроснимке или на плане.

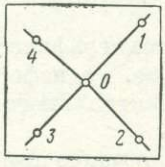


Рис. 114

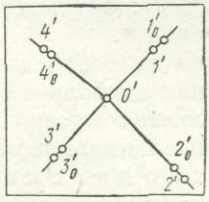


Рис. 115

Рассмотрим, как рассчитываются и откладываются поправки за рельеф на плане при трансформировании плановых аэроснимков.

Воспользуемся формулой (11.1)

$$\delta'_h = \frac{r'h}{H}.$$

Зная отметки A_i четырех контурных точек и отметку A_0 средней горизонтальной плоскости, находим превышения контурных точек

$$h_i = A_i - A_0.$$

Высоту фотографирования H относительно средней горизонтальной плоскости можно определить по формуле

$$H = H_{абс} - A_0,$$

где

$$H_{абс} = f\frac{l_{пл}}{l_{сн}}M + \frac{A' + A''}{2}.$$

Отрезки $l_{пл}$ и $l_{сн}$ измеряют на плане и аэроснимке между двумя точками, симметрично расположенными относительно главной точки; A' и A'' — отметки этих точек; M — знаменатель масштаба плана.

Для определения радиус-вектора r' необходимо на плане найти проекцию точки надира аэроснимка. Во многих случаях возможно точку надира заменить главной точкой [3].

Проекцию точки o на плане определяют по способу Болотова, принимая углы с вершиной в главной точке за неискаженные. Поступают следующим образом: на аэроснимок (рис. 114) накладывают восковку, на которой проводят из точки o направления на все четыре контурные точки, затем восковку укладывают на планшетик так, чтобы направления проходили через соответственные точки планшетика (рис. 115), после чего с восковки перекалывают на план-

шетик главную точку. Наколотая точка o' — проекция главной точки аэроснимка.

Остается измерить радиус-векторы. В формулу (11.1) входит радиус-вектор r' центральной проекции контурной точки аэроснимка в плоскости трансформирования. В данном случае можно измерить только радиус-векторы $\bar{r}'$ планового положения точек. Например, для точки $1'_0$ имеем:

$$\bar{r}' = o'1'_0.$$

Заменим r' в формуле (11.1) через $\bar{r}' + \delta'_h$. После простых преобразований получим

$$\delta'_h = \frac{\bar{r}'h}{H-h}. \qquad (11.4)$$

Рассчитанные поправки за рельеф откладывают от планового положения контурных точек по направлению к точке o', если $\delta'_h < 0$, и в противоположную сторону — при $\delta'_h > 0$. На рис. 115 поправки за рельеф для точек $1'_0$ и $3'_0$ отрицательны, а для точек $2'_0$ и $4'_0$ — положительны. Полученные точки $1'$, $2'$, $3'$, $4'$ — ориентирующие.

Если поправки за рельеф откладываются не на плане, а на аэроснимке, то расчеты поправок производят по формуле (11.1). Очевидно, что в этом случае при $\delta_h > 0$ поправку следует отложить по направлению к главной точке (или точке надира), а при $\delta_h < 0$ — в противоположную сторону, на продолжении радиус-вектора.

Поправки за рельеф меньше 0,2 мм не учитывают и практически принимают контурные точки на аэроснимке и их плановое положение за ориентирующие точки.

§ 59. ГРАФИЧЕСКОЕ ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ АЭРОСНИМКОВ ПО ЧЕТЫРЕМ ОРИЕНТИРУЮЩИМ ТОЧКАМ

Пусть на аэроснимке (рис. 116) имеем четыре контурные точки *1*, *2*, *3*, *4*, плановое положение которых $1'$, $2'$, $3'$, $4'$ дано на чертежной бумаге в масштабе трансформирования (рис. 117). Положим, что поправки за рельеф малы так, что плановое положение точек можно принять за ориентирующие (в противном случае в плановое положение точек вводятся поправки за рельеф).

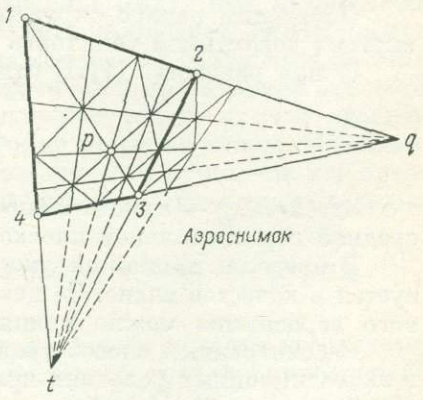


Рис. 116

Разобъем на аэроснимке и на плане взаимно проективные сетки. Это можно сделать различными способами [1]. Рассмотрим простейший из них. Проведем в каждом четырехугольнике диагонали и продолжим противоположные стороны до их пересечения. Допустим, что они пересекаются в пределах чертежа.

Очевидно, что полученные точки p и p', q и q', t и t' взаимно проективны, так как они находятся на пересечении соответственных прямых. Эти точки дают возможность разбить основные четырехугольники на четыре малых четырехугольника. При этом соответствующие пары

малых четырехугольников взаимно проективны. Через точки пересечения диагоналей этих четырехугольников проводят прямые, образующие сеть новых, более мелких четырехугольников. Построения продолжают до тех пор, *пока не получат сетки надлежащей густоты.*

В случае необходимости сетку можно распространить за пределы основных четырехугольников, что и сделано справа от стороны *2—3*.

Нередки случаи, когда противоположные стороны четырехугольника не пересекаются в пределах чертежа. Тогда путем геометрических построений проводят через точку пересечения диагоналей прямые к недоступным точкам пересечения (рис. 118). Для этого на продолженных сторонах строят четырехугольники, подобные данному. Точки пересечения их диагоналей лежат на искомых прямых.

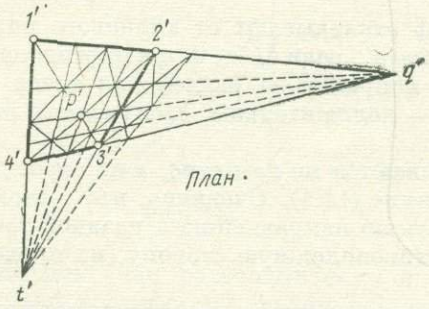


Рис. 117

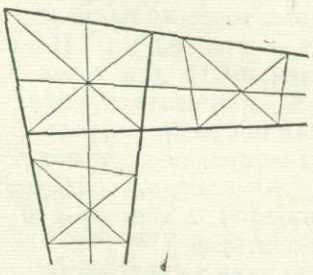


Рис. 118

При использовании плановых аэроснимков взаимно проективные сетки получаются почти подобными, при использовании перспективных аэроснимков — значительно отличающимися по форме.

Трансформирование аэроснимков заключается в переносе контуров с аэроснимка *на план, пользуясь построенными сетками.*

На трансформированном изображении остаются ошибки за рельеф.

Определим радиус окружности, в пределах которой эти ошибки не превышают допустимой величины.

Решая равенство (11.1) относительно r', записываем

$$r' = \frac{H}{h_{\max}} \delta'_{h\,\max}. \qquad (11.5)$$

Здесь h_{max} — максимальное превышение точек местности относительно средней горизонтальной плоскости.

В пределах данной окружности трансформированное изображение используется в качестве плана. За центр окружности при трансформировании планового аэроснимка можно принять проекцию главной точки аэроснимка.

Рассмотренный способ трансформирования *применяется преимущественно* в экспедиционных условиях при отсутствии приборов для трансформирования в *небольшом объеме работ.*

Если с аэроснимка на план или карту требуется перенести отдельные точки, то задача может быть решена способом прямой проективной засечки (методом ангармонических отношений). Положим, что на аэроснимке и на плане отождествлены четыре соответственные точки A, B, C, D и A', B', C', D', которые

можно принять за ориентирующие (если этого сделать нельзя, то в плановое положение точек вводят поправки за рельеф).

Пусть требуется определить на плане положение точки Q аэроснимка (рис. 119). Примем за полюсы ориентирующие точки A и B и проведем из этих точек направления на точку Q. Перенесем направление AQ на план, воспользовавшись методом ангармонических отношений [1]. Для этого пересечем четыре луча с полюсом в точке A прямой, прочерченной на полоске восковки, и отметим точки пересечения b, c, d, q прямой с лучами. Затем восковку перенесем на план и уложим так, чтобы лучи, идущие к точкам B', C', D', проходили через соответственные точки прямой на полоске восковки. После этого на план перекалывают точку q прямой, которая и определяет направление $A't'$, проективное направлению AQ аэроснимка. Это следует из того, что пучок лучей A' $(B'C'D't')$ имеет

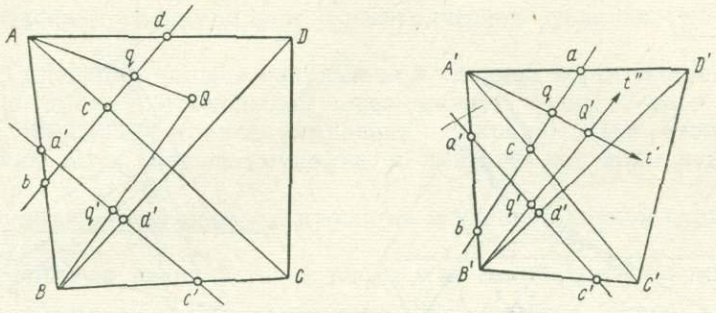


Рис. 119

то же ангармоническое отношение, что и пучок лучей A $(BCDQ)$, так как оба пучка опираются на один ряд точек.

Аналогично определяют на плане направление $B't''$, проективное направлению BQ аэроснимка.

Точка пересечения построенных на плане направлений определяет положение точки Q', проективно связанной с точкой Q аэроснимка.

Способ прямой проективной засечки можно применять при любом угле наклона аэроснимка. Для строгого решения задачи необходимо, чтобы четыре опорные точки вместе с определяемой лежали на местности в одной горизонтальной или наклонной плоскости. В обоих случаях прямой проективной засечкой будет определено плановое положение определяемой точки, причем вводить поправки за рельеф в положение опорных точек на плане не нужно. Плановое положение опорных точек принимается за ориентирующие точки, так как ортогональная проекция точек плоской наклонной местности проективно связана с соответственными точками аэроснимка.

§ 60. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОТОТРАНСФОРМИРОВАНИЯ АЭРОСНИМКОВ

Под геометрическими условиями понимаются условия, которые необходимо выполнить для получения геометрически правильного трансформированного изображения в заданном масштабе.

Несмотря на то, что проектирование аэронегатива на экран осуществляется оптическим путем, при рассмотрении геометрических условий центр проекции S принимается за геометрическую точку без наделения ее физическими свойствами.

Воспользуемся формулами (9.4) связи координат соответственных точек аэроснимка и плоской горизонтальной местности:

$$X_{I'} = -\frac{H'}{y_I} x_I;$$

$$Y_{I'} = -\frac{H'}{y_I} f',$$

где

$$f' = \frac{f}{\sin \alpha_0}, \quad H' = \frac{H}{\sin \alpha_0}.$$

В этих формулах индексы I и I' указывают, что началом координат на аэроснимке является главная точка схода I, а началом координат на плоской

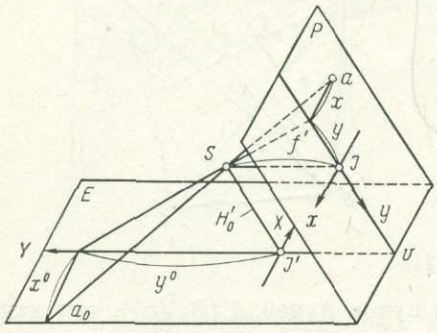


Рис. 120

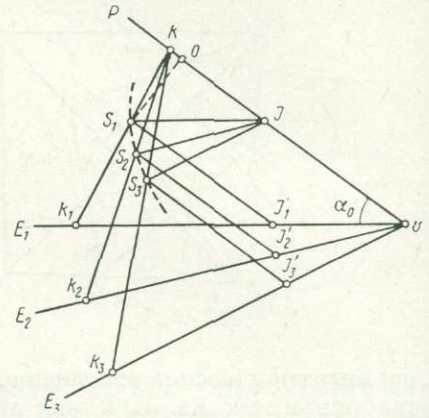


Рис. 121

горизонтальной местности — главная точка схода I'. В дальнейшем эти значки записывать нет надобности, так как переходить к другой системе координат не потребуется.

Введем обозначения:

$$x^0 = \frac{X}{M}; \quad y^0 = \frac{Y}{M}; \quad H'_0 = \frac{H'}{M},$$

тогда

$$\left.\begin{aligned} x^0 &= -\frac{H'_0}{y} x \\ y^0 &= -\frac{H'_0}{y} f' \end{aligned}\right\}. \tag{11.6}$$

Как видим, зависимость между координатами x, y точки a на аэроснимке и координатами x^0, y^0 точки a_0 на трансформированном изображении устанавливается через отрезки f' и H'_0, являющиеся сторонами параллелограмма $SIvI'$ (рис. 120). Здесь в отличие от рис. 91 плоскость P показана в негативном положении, при этом

$$SI = f' = \frac{f}{\sin \alpha_0}; \quad SI' = H'_0 = \frac{H}{M \sin \alpha_0}.$$

Очевидно, что зависимость между координатами не нарушится, если изменять угол между плоскостями E и P, сохраняя стороны параллелограмма.

Так, например, изображения плоскости P на плоскостях E_1, E_2, E_3 (рис. 121) будут конгруэнтны, если центрами проекции соответственно будут точки S_1, S_2, S_3. На этом рисунке $vk_1 = vk_2 = vk_3$, т. е. проекции точки k на плоскостях E_1, E_2, E_3 занимают одно положение.

Заметим, что все центры проекции лежат на одной окружности радиуса $SI = f'$ с центром в главной точке схода I.

Плоскость E_1 составляет с плоскостью P угол α_0 и центр проектирования S_1 находится на перпендикуляре к плоскости P, проходящей через главную точку аэроснимка, причем $S_1o = f$, т. е. при трансформировании на плоскость E_1 сохраняются элементы внутреннего ориентирования аэроснимка.

При трансформировании на плоскости E_2 и E_3 положение центра проекции относительно аэроснимка оказывается иным, не соответствующим элементам внутреннего ориентирования аэроснимка.

В заключение сформулируем геометрические условия трансформирования.

1. Центр проекции должен находиться в главной вертикальной плоскости аэроснимка на прямой, проходящей через главную точку схода I аэроснимка параллельно плоскости трансформирования (экрана). При этом плоскость экрана должна быть перпендикулярна к главной вертикальной плоскости аэроснимка.

2. Расстояние между центром проекции и главной точкой схода I должно быть равно $f/\sin\alpha_0$.

3. Расстояние от главной точки схода I до линии пересечения плоскости экрана с плоскостью негатива (аэроснимка) должно быть равно $\frac{H}{M\sin\alpha_0}$.

Нарушение третьего условия влечет за собой изменение масштаба трансформирования. Нарушение второго условия приводит к деформации трансформированного изображения. Деформация возникает также при частичном нарушении первого условия (см. § 79).

Итак, рассматривая геометрические условия трансформирования, приходим к выводу, что они выполнимы при любом угле φ между плоскостью экрана и плоскостью негатива. В общем случае $\varphi \neq \alpha_0$. Угол $\varkappa$ аэроснимка всегда сохраняется, иначе центр проекции не будет находиться в главной вертикальной плоскости аэроснимка.

§ 61. ОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОТОТРАНСФОРМИРОВАНИЯ АЭРОСНИМКОВ

Под оптическими условиями понимаются условия, которые необходимо выполнить для получения резкого изображения на экране.

Рассмотрим построение оптически сопряженных плоскостей. Пусть точки a и a', лежащие на оптической оси объектива (рис. 122), оптически сопряжены. Проведем через точку a плоскость P, перпендикулярную к оптической оси, тогда оптически сопряженная плоскость E будет также перпендикулярна к оптической оси.

Проведем теперь через точку a плоскость P_1, не перпендикулярную к оптической оси. Для построения оптически сопряженной плоскости продолжим плоскость P_1 до пересечения с главной плоскостью W. Линия пересечения этих плоскостей проходит через точку q_1, перпендикулярно к плоскости рисунка. Сопряженная плоскость E_1 пройдет через точку a' и точку q_1', сопряженную с точкой q_1. Точка q_1' находится в главной плоскости W' на том же удалении

от оптической оси, что и точка q_1, т. е. $S_1q_1 = S_2q_1'$. Это следует из известного свойства главных плоскостей: главные плоскости оптически сопряжены и увеличение в них равно $+1$.

Очевидно, что через пару оптически сопряженных точек a и a' можно провести сколько угодно пар оптически сопряженных плоскостей, при этом каждая пара сопряженных плоскостей пересекает главные плоскости объектива по взаимно параллельным прямым, равноудаленным от оптической оси. На рис. 122 построено несколько пар оптически сопряженных плоскостей.

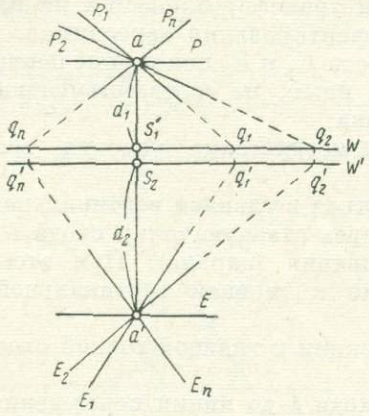


Рис. 122

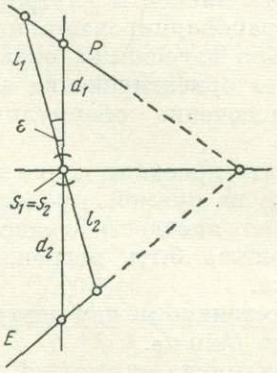


Рис. 123

Если пренебречь расстоянием между узловыми точками и считать их совпадающими, то условия резкости применительно к фототрансформированию можно сформулировать так:

1) плоскость негатива и экрана должны проходить через пару оптически сопряженных точек, лежащих на оптической оси объектива (первое оптическое условие);

2) обе плоскости должны пересекаться в главной плоскости объектива (второе оптическое условие).

В качестве пары сопряженных точек можно взять точки, лежащие на главной оптической оси или на побочной оптической оси (рис. 123). В первом случае расстояния d_1 и d_2 от точки S по главной оптической оси удовлетворяют уравнению оптики

$$\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}=\frac{1}{f_{об}}.$$

Во втором случае расстояния l_1 и l_2 по побочной оптической оси удовлетворяют уравнению

$$\left.\begin{aligned}\frac{1}{l_1\cos\varepsilon}+\frac{1}{l_2\cos\varepsilon}&=\frac{1}{f_{об}}\\ \frac{1}{l_1}+\frac{1}{l_2}&=\frac{1}{f_{об}}\end{aligned}\right\},\quad (11.7)$$

или

где

$$f_{об}=\frac{f_{об}}{\cos\varepsilon}.$$

Здесь ε — угол между главной и побочной оптическими осями.

§ 62. СОВМЕСТНОЕ РАССМОТРЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОТОТРАНСФОРМИРОВАНИЯ. ФОТОТРАНСФОРМАТОРЫ ПЕРВОГО И ВТОРОГО РОДА

На рис. 124 имеем плоскость негатива P, экран E, главную точку схода I и центр проекции S. Их взаимное расположение отвечает геометрическим условиям трансформирования. Построения сделаны в главной вертикальной плоскости

$$SI = \frac{f}{\sin \alpha_0}; \quad Iv = \frac{H}{M \sin \alpha_0}.$$

Переходя к выполнению оптических условий, будем рассматривать точку S как физический центр проекции. Строго рассуждая, физическим центром проекции является центр входного зрачка объектива. В симметричных объективах он совпадает с узловой точкой пространства предметов, в несимметричных объективах — не совпадает. Однако и в этом случае за центр проекции также принимается узловая точка пространства предметов, т. е. узловая точка, отнесенная к плоскости негатива.

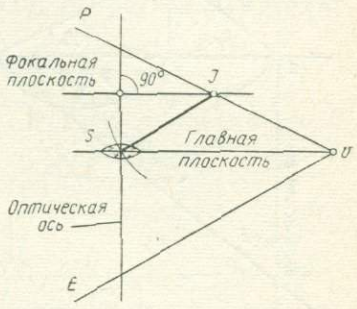


Рис. 124

Итак, точку S на рис. 124 следует рассматривать как узловую точку объектива трансформатора, отнесенную к плоскости негатива, с которой для упрощения рисунка совмещена узловая точка пространства изображения, т. е. узловая точка, отнесенная к экрану.

Для выполнения оптических условий трансформирования объектив следует повернуть вокруг точки S так, чтобы главная плоскость прошла через линию, пересечения плоскости негатива с экраном. Кроме того, необходимо потребовать, чтобы линия горизонта, проходящая через главную точку схода I перпендикулярно к плоскости чертежа, находилась в фокальной плоскости объектива. Это следует из того, что изображение линии горизонта на экране находится в бесконечности, а с бесконечно удаленными точками оптически сопряжены точки фокальной плоскости.

Таким образом, совместное рассмотрение геометрических и оптических условий трансформирования приводит к следующим выводам:

1. Узловая точка объектива S должна находиться в главной вертикальной плоскости на расстоянии $\frac{f}{\sin \alpha_0}$ от главной точки схода I.

2. Точка схода I должна лежать в фокальной плоскости объектива.

3. Главная плоскость объектива должна проходить через линию пересечения плоскости негатива с экраном, расположенную на расстоянии $\frac{H}{M \sin \alpha_0}$ от линии горизонта.

4. Плоскость экрана должна быть параллельна лучу SI.

При рассмотрении одних геометрических условий было отмечено, что правильное трансформированное изображение можно получить при любом положении центра проекции на окружности радиуса $f/\sin \alpha_0$ с центром в главной точке схода I. Сама окружность должна лежать в главной вертикальной плоскости.

Если геометрические условия дополнить оптическими, то окажется, что оптические условия выполнимы при одном положении узловой точки S на окружности, когда фокальная плоскость проходит через линию горизонта, а главная плоскость — через линию пересечения плоскости негатива и экрана.

Тем самым определяется и угол φ между плоскостью негатива и экраном. Чтобы убедиться в этом, построим чертеж в главной вертикальной плоскости, задавшись значениями

$$f,\ \alpha_0,\ H,\ \frac{1}{M},\ f_{об}.$$

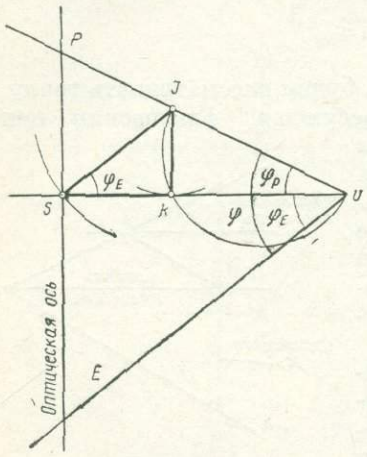


Рис. 125

Вычисляем длины отрезков SI и Iv по формулам

$$SI = \frac{f}{\sin\alpha_0};\quad Iv = \frac{H}{M\sin\alpha_0}.$$

Проводим произвольно главную вертикаль плоскости негатива P (рис. 125) и нижний конец ее принимаем за точку v. Откладываем от точки v по главной вертикали отрезок, равный $\frac{H}{M\sin\alpha_0}$, и получаем точку I. Описываем из точки I дугу окружности радиуса $f/\sin\alpha_0$. На дуге намечаем точку S так, чтобы фокальная плоскость прошла через точку I, а главная плоскость — через точку v. Для этого строим полуокружность, приняв отрезок Iv за диаметр. Из точки I делаем засечку радиусом, равным $f_{об}$. Через полученную точку k и v проводим прямую до пересечения с дугой окружности, описанной из главной точки схода. Здесь должна находиться узловая точка объектива S. Прямая Sv будет следом главной плоскости объектива, а точка I будет лежать в фокальной плоскости объектива.

Остается провести через v след экрана E параллельно лучу SI.

Итак, построением подтверждается, что при заданных значениях элементов внутреннего и внешнего ориентирования, масштабе трансформирования и фокусном расстоянии объектива фототрансформатора мы получаем определенный угол φ между экраном и плоскостью негатива и определенное положение узловой точки объектива относительно этих плоскостей.

Выведем формулу для угла φ_P между плоскостью негатива и главной плоскостью объектива и угла φ_E между экраном и главной плоскостью объектива, составляющих угол φ.

Из $\triangle Ikv$ имеем:

$$\sin\varphi_P = \frac{f_{об}M}{H}\sin\alpha_0. \tag{11.8}$$

Умножим числитель и знаменатель правой части равенства на f

$$\sin\varphi_P = \frac{f_{об}Mf}{Hf}\sin\alpha_0.$$

Но f/H — масштаб аэроснимка по линии неискаженного масштаба. Обозначим отношение масштаба трансформирования $1/M$ к масштабу аэроснимка $1/m_h$

по какой-либо горизонтали через k_t. Назовем k_t коэффициентом трансформирования. Для каждой горизонтали k_t имеем свое значение. В данном случае k_t берется для горизонтали, проходящей через точку нулевых искажений.

Введем для этого случая обозначение:

$$k_t^0 = \frac{\frac{1}{M}}{\frac{f}{H}} \quad \text{или} \quad k_t^0 = \frac{H}{fM}.$$

Тогда

$$\sin \varphi_P = \frac{f_{об}}{f k_t^0} \sin \alpha_0. \tag{11.9}$$

Для определения угла φ_E обратимся к прямоугольному треугольнику SIk, откуда

$$\sin \varphi_E = \frac{f_{об}}{SI},$$

но

$$SI = \frac{f}{\sin \alpha_0},$$

поэтому

$$\sin \varphi_E = \frac{f_{об}}{f} \sin \alpha_0. \tag{11.10}$$

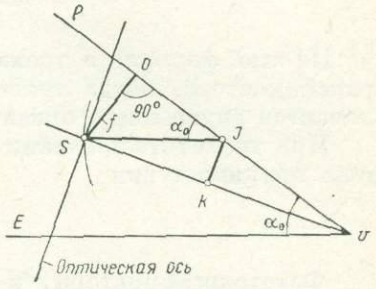


Рис. 126

Определив углы φ_P и φ_E, находим угол

$$\varphi = \varphi_P + \varphi_E,$$

при котором и должно вестись трансформирование.

Подсчитаем угол φ при следующих условиях: $f = 200$ мм, $\alpha_0 = 2°$, $k_t^0 = 2$, $f_{об} = 150$ мм.

По формулам (11.09) и (11.10) находим, что

$$\varphi_E = 1°30',$$

$$\varphi_P = 0°42'.$$

Следовательно, угол φ между плоскостью негатива и экраном должен быть равен 2°12′.

Рассмотрим случай трансформирования аэроснимков с сохранением угла α_0.

Известно (см. рис. 121), что при $\varphi = \alpha_0$ центр проектирования S_1 должен находиться на перпендикуляре к главной вертикали, проходящем через точку o, причем $S_1 o = f$. Это значит, что при трансформировании сохраняются элементы внутреннего ориентирования аэроснимка. При этом возникает необходимость подбора фокусного расстояния объектива трансформатора.

Действительно, точка I (рис. 126) должна находиться в фокальной плоскости объектива, а потому фокусное расстояние объектива трансформатора $f_{об}$ должно быть равно перпендикуляру Ik.

Из подобных прямоугольных треугольников Ikv и Svo находим

$$\frac{f_{об}}{f} = \frac{Iv}{Sv},$$

где

$$Sv = \sqrt{f^2 + ov^2}.$$

Следовательно,

$$f_{об} = \frac{f \cdot Iv}{\sqrt{f^2 + ov^2}}, \qquad (а)$$

но

$$ov = oI + Iv; \quad oI = f \operatorname{ctg} \alpha_0; \quad Iv = \frac{H}{M \sin \alpha_0},$$

или

$$Iv = \frac{f}{\sin \alpha_0} k_t^0.$$

Подставляя эти выражения в равенство (а), после несложных преобразований получаем

$$f_{об} = \frac{f k_t^0}{\sqrt{1 + k_t^{0\,2} + 2k_t^0 \cos \alpha_0}}. \qquad (11.11)$$

По этой формуле и производится подбор фокусного расстояния объектива трансформатора, когда трансформирование ведется с сохранением значений *элементов внутреннего ориентирования*.

При трансформировании плановых аэроснимков ($\alpha \approx 2°$, $\cos \alpha \approx 1$) формула принимает вид

$$f_{об} = f \frac{k_t^0}{1 + k_t^0}. \qquad (11.12)$$

Фототрансформаторы, в которых трансформирование аэроснимков производится с сохранением значений элементов внутреннего ориентирования аэроснимков, называются фототрансформаторами первого рода. В этих фототрансформаторах угол φ при трансформировании равен углу α_0.

Фототрансформаторы, в которых трансформирование аэроснимков производится при нарушенных значениях элементов внутреннего ориентирования аэроснимков, называются фототрансформаторами второго рода. В этих фототрансформаторах угол φ при трансформировании не равен углу α_0. Угол $\varkappa$ аэроснимка в обоих случаях сохраняется.

Очевидно, что в фототрансформаторах первого рода воспроизводится пучок лучей, подобный тому, который был при съемке. В фототрансформаторах второго *рода проектирующий пучок лучей неподобный*. Подобный пучок лучей принято называть нормальным пучком, или нормальной связкой; неподобный пучок лучей — преобразованным пучком, или преобразованной связкой.

Фототрансформаторы первого рода должны быть обеспечены набором объективов с различными фокусными расстояниями. Это существенный недостаток фототрансформаторов первого рода, которые в настоящее время почти не применяются.

§ 63. ПОНЯТИЕ О КОНСТРУКТИВНОЙ ОСИ ФОТОТРАНСФОРМАТОРА. ЛИНЕЙНАЯ И УГЛОВАЯ ДЕЦЕНТРАЦИЯ. АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТАНОВОК

1. *Конструктивная ось фототрансформатора*. Каждая конструкция фототрансформатора имеет систему установочных движений, отнесенных к экрану, объективу, кассете, позволяющих выполнять геометрические и оптические

условия. Системы установочных движений бывают различные, но в каждую входит прямолинейное движение объектива и плоскости негатива.

Прямую, проходящую через узловую точку по направлению прямолинейного движения объектива, называют конструктивной осью фототрансформатора. Обычно ей придается вертикальное положение.

2. *Линейная децентрация.* Конструктивная ось в общем случае пересекает плоскость негатива в точке, не совпадающей с главной точкой аэроснимка. Смещение главной точки относительно конструктивной оси называется линейной децентрацией. Условимся обозначать линейную децентрацию буквой δ.

Выведем формулу линейной децентрации для двух случаев.

Первый случай. Конструктивная ось совпадает с оптической осью объектива. Из рис. 127 имеем:

$$\delta = \omega I - oI,$$

где

$$oI = f \operatorname{ctg} \alpha_0; \tag{11.13}$$

ωI определим из треугольника $S\omega I$

$$\omega I = SI \frac{\sin \angle\, \omega SI}{\sin \angle\, S\omega I},$$

но

$$SI = \frac{f}{\sin \alpha_0}; \quad \sin \angle\, \omega SI = \cos \varphi_E;$$

$$\sin \angle\, S\omega I = \cos \varphi_P.$$

Следовательно,

$$\omega I = \frac{f}{\sin \alpha_0} \frac{\cos \varphi_E}{\cos \varphi_P}$$

и

$$\delta = \frac{f}{\sin \alpha_0} \left(\frac{\cos \varphi_E}{\cos \varphi_P} - \cos \alpha_0 \right). \tag{11.14}$$

Эта формула линейной децентрации строгая. При трансформировании плановых аэроснимков возможно применение упрощенной формулы.

Так как углы α, φ_E и φ_P малые, примем

$$\left.\begin{aligned} \sin \alpha_0 &= \alpha_0 \\ \cos \alpha_0 &= 1 - \frac{\alpha_0^2}{2} \\ \cos \varphi_E &= 1 - \frac{\varphi_E^2}{2} \\ \cos \varphi_P &= 1 - \frac{\varphi_P^2}{2} \\ \sin \varphi_E &= \varphi_E = \frac{f_{об}}{f} \alpha_0 \\ \sin \varphi_P &= \varphi_P = \frac{f_{об}}{f k_l^0} \alpha_0 \end{aligned}\right\}. \tag{а}$$

Подставим выражения (а) в равенство (11.14) и запишем его в виде

$$\delta = \frac{f}{\sin \alpha_0}\left[\left(1-\frac{\varphi_E^2}{2}\right)\left(1-\frac{\varphi_P^2}{2}\right)^{-1}-\left(1-\frac{\alpha_0^2}{2}\right)\right].$$

Разложим бином с отрицательным показателем, входящий в это равенство в ряд и выполним действия, указанные в квадратных скобках. Отбрасывая члены третьего и высшего порядка малости, получаем

$$\delta = \frac{f}{2\alpha_0}(\alpha_0^2-\varphi_E^2+\varphi_P^2).$$

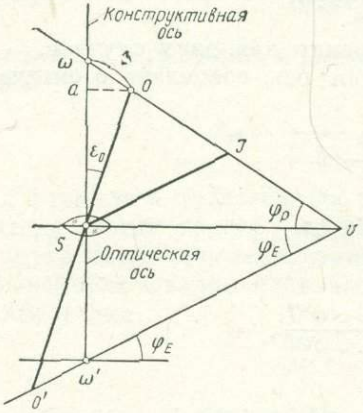


Рис. 127

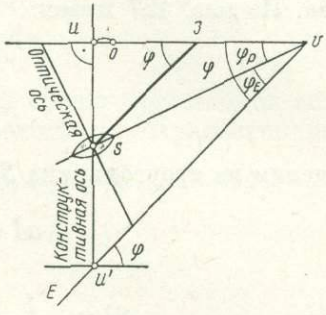


Рис. 128

Подставляя сюда выражения для φ_E и φ_P и делая простые преобразования, получаем

$$\delta = \frac{\alpha_0}{2f\rho}\left(f^2-f_{об}^2\frac{k_t^{0\,2}-1}{k_t^{0\,2}}\right), \qquad (11.15)$$

где f — главное расстояние аэрокамеры, $f_{об}$ — фокусное расстояние объектива трансформатора, k_t^0 — коэффициент трансформирования по линии неискаженного масштаба.

Это и есть упрощенная формула децентрации для случая трансформирования плановых аэроснимков, когда конструктивной осью является оптическая ось объектива. Угол α_0 выражен в градусной мере.

Принимая $f_{об}$ величиной постоянной для данного трансформатора, приходим к выводу, что δ — функция величин f, k_t^0, α_0.

В некоторых случаях удобнее выражать δ не в функции угла α_0, а в функции угла наклона экрана, который равен (см. рис. 127) углу φ_E.

Определяя α_0 из (а), получаем

$$\alpha_0 = \frac{f}{f_{об}}\varphi_E.$$

Подставляя это выражение в (11.15), после простых преобразований найдем

$$\delta = \frac{1}{2}f_{об}\frac{\varphi_E}{\rho}\left[\left(\frac{f}{f_{об}}\right)^2-1+\frac{1}{k_t^{0\,2}}\right]. \qquad (11.16)$$

Угол φ_E выражен в градусной мере.

Второй случай. Конструктивная ось перпендикулярна к плоскости негатива (рис. 128). В равенство (11.13) вместо ωI следует подставить выражение

$$uI = \frac{f}{\sin \alpha_0} \cos \varphi,$$

что следует из треугольника SuI, в котором $SI = f/\sin \alpha_0$. Формула децентрации принимает вид

$$\delta = \frac{f}{\sin \alpha_0} (\cos \varphi - \cos \alpha_0). \tag{11.17}$$

Эта формула строгая. Для получения упрощенной формулы, применимой при трансформировании плановых аэроснимков, следует воспользоваться равенствами (а) и учесть, что

$$\varphi = \varphi_E + \varphi_P.$$

После простых преобразований получаем

$$\delta = \frac{1}{2} f \frac{\alpha_0}{\rho} \left[1 - \left(\frac{f_{об}}{f} \right)^2 \left(1 + \frac{1}{k_t^0} \right)^2 \right]. \tag{11.18}$$

Чтобы выразить δ как функцию угла наклона экрана, который равен углу φ (см. рис. 128), определим α_0 из последних двух равенств (а), предварительно их просуммировав, и подставим полученное выражение в (11.18). После простых преобразований найдем

$$\delta = \frac{f_{об}}{2\left(1 + \frac{1}{k_t^0}\right)} \frac{\varphi}{\rho} \left[\left(\frac{f}{f_{об}} \right)^2 - \left(1 + \frac{1}{k_t^0} \right)^2 \right]. \tag{11.19}$$

В формулах (11.18) и (11.19) углы φ и α_0 выражены в градусной мере.

Линейная децентрация может быть положительной и отрицательной.

Если $\delta > 0$, то главная точка o смещена относительно конструктивной оси в сторону точки v; при $\delta < 0$ — в обратную сторону. На рис. 127 и 128 показана положительная децентрация.

3. *Угловая децентрация.* Угловой децентрацией объектива называется угол ε_0 между главной оптической осью объектива и побочной оптической осью, проходящей через главную точку аэроснимка. Из рис. 127 следует, что

$$\operatorname{tg} \varepsilon_0 = \frac{oa}{Sa},$$

но $oa = \omega o \cos \varphi_P$ или, учитывая (11.14),

$$oa = \frac{f}{\sin \alpha_0} (\cos \varphi_E - \cos \varphi_P \cos \alpha_0);$$

$$Sa = SI \sin \varphi_E + oI \sin \varphi_P,$$

но

$$SI = \frac{f}{\sin \alpha_0}; \quad oI = f \operatorname{ctg} \alpha_0,$$

а потому

$$Sa = \frac{f}{\sin \alpha_0} (\sin \varphi_E + \cos \alpha_0 \sin \varphi_P).$$

Следовательно,

$$\operatorname{tg}\varepsilon_0 = \frac{\cos\varphi_E - \cos\varphi_P \cos\alpha_0}{\sin\varphi_E + \sin\varphi_P \cos\alpha_0}. \qquad (11.20)$$

Это и есть строгая формула угловой децентрации объектива.

Для получения упрощенной формулы угловой децентрации объектива, применяемой при трансформировании плановых аэроснимков, формулу (11.20) следует преобразовать, воспользовавшись равенствами (а). После преобразований получаем

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2}\alpha_0 k_l^0 \left[\frac{f}{f_{об}(1+k_l^0)} + \frac{f_{об}}{f}(1-k_l^0)\right]. \qquad (11.21)$$

4. Автоматизация некоторых установок. В фототрансформаторах имеются особые устройства, называемые инверсорами, автоматически выполняющие некоторые условия трансформирования.

Наибольшее распространение получили инверсоры, выполняющие оптические условия. Этими инверсорами оснащены все современные фототрансформаторы. Инверсоры, выполняющие оптические условия, делятся на масштабные и перспективные. Масштабные выполняют первое оптическое условие, перспективные — второе.

Масштабный инверсор связывает движение объектива вдоль конструктивной оси с движением плоскости негатива вдоль той же оси, обеспечивая оптическое сопряжение точек плоскости негатива и экрана, лежащих на конструктивной оси.

Перспективный инверсор связывает поворот экрана с поворотом плоскости негатива или главной плоскости объектива так, что три эти плоскости пересекаются по одной прямой. Этим обеспечивается резкость изображения по всему экрану.

Кроме инверсоров, выполняющих оптические условия, в некоторых фототрансформаторах имеются инверсоры, выполняющие условие линейной децентрации аэронегатива.

В результате действия этого инверсора при наклоне экрана, а также при изменении масштаба изображения на экране происходит перемещение кассеты в своей плоскости в соответствии с формулами (11.16) или (11.19) в зависимости от конструкции фототрансформатора.

Необходимо иметь в виду, что большинство современных фототрансформаторов предназначено для трансформирования по ориентирующим точкам, когда все установки производятся по методу последовательного приближения. В этом случае особо важное значение приобретает сокращение количества тех установок, которые производятся оператором. Это и достигается при помощи инверсоров. Каждый инверсор сокращает количество таких установок на одну.

§ 64. БОЛЬШОЙ ФОТОТРАНСФОРМАТОР (ФТБ). ОПИСАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ФТБ * — фототрансформатор второго рода, предназначенный для трансформирования плановых и перспективных аэроснимков.

В трансформаторе три вращательных и четыре поступательных установочных движения (рис. 129). Оптическая ось объектива $\omega S\omega'$ занимает вертикаль-

* ФТБ (SEG-1) разработан и впервые изготовлен фирмой Цейсса.

ное положение и является одновременно конструктивной осью прибора.

К вращательным движениям относятся:

а) поворот экрана E и плоскости негатива P вокруг горизонтальных осей, расположенных в вертикальной плоскости, проходящей через конструктивную ось;

б) вращение кассеты в своей плоскости.

К поступательным движениям относятся:

а) движение объектива и плоскости негатива вдоль конструктивной оси;

б) перемещения кассеты в своей плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям, из которых одно параллельно горизонтальной оси вращения плоскости P.

Прибор имеет перспективный инверсор и два одинаковых синхронно действующих масштабных инверсора. Один масштабный инверсор перемещает каретки объектива и негатива, расположенные на левой вертикальной направляющей, другой — соответствующие каретки, расположенные на правой вертикальной направляющей. Оба масштабных инверсора приводятся в действие одним ножным штурвалом. Совместная их работа предохраняет движущиеся массивные части прибора от перекоса.

Масштабные инверсоры согласовывают поступательные движения объектива и плоскости негатива вдоль конструктивной оси, перспективный инверсор согласовывает повороты экрана и плоскости негатива вокруг горизонтальных осей.

Благодаря действию масштабного и перспективного инверсоров две установки выполняются автоматически, поэтому при трансформировании оператору нужно сделать не семь, а пять установок.

Общий вид фототрансформатора показан на рис. 130.

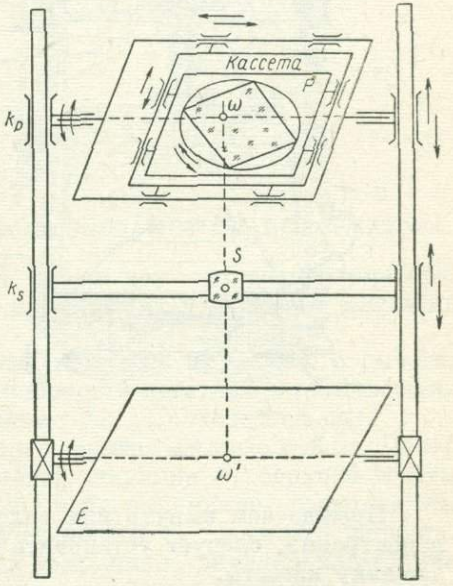


Рис. 129

Основные части фототрансформатора: *1* — станина; *2* — осветительное устройство; *3* — кольцо, несущее кассету с ее устройствами; *5* — ось вращения кольца, укрепленная на каретках негатива; *6* — труба, несущая держатель объектива, укрепленная на каретках объектива; *8* — рукоятка поперечной децентрации. При вращении рукоятки кольцо *3* перемещается вдоль оси вращения. Шкала поперечной децентрации на рисунке не видна. *9* — объектив; *10* — экран; *11* и *14* — вертикальные направляющие; *12* — ножной штурвал перспективного инверсора; *13* — ножной штурвал масштабных инверсоров; *15* — ось вращения экрана; *16* — рукоятка продольной децентрации; *17* — шкала продольной децентрации. При вращении этой рукоятки каретка, помещенная внутри кольца, перемещается по направлению, перпендикулярному к оси вращения кольца; *7* — рукоятка для вращения градуированного круга, находящегося на указанной каретке; *4* — шкала круга. В круге имеется

квадратный вырез примерно 32×32 см. На нижней стороне круга укреплены направляющие, по которым вставляется кассета. Эти детали на рисунке не видны. Установка кассеты фиксируется замком-защелкой. Кассета приспособлена для работы с отдельными аэронегативами и целым фильмом. Пленочный аэронегатив помещается между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами. Нижняя пластина, называемая прижимной, вмонтирована в рамку кассеты; она имеет координатные метки. Верхняя пластина (покровное стекло) съемная. Ось вращения (геометрическая) кольца *3* лежит в плоскости нижней стеклянной пластины, на которую кладется эмульсионной стороной аэронегатив и прижимается к ней при помощи покровного стекла и двух пружинных рычажков.

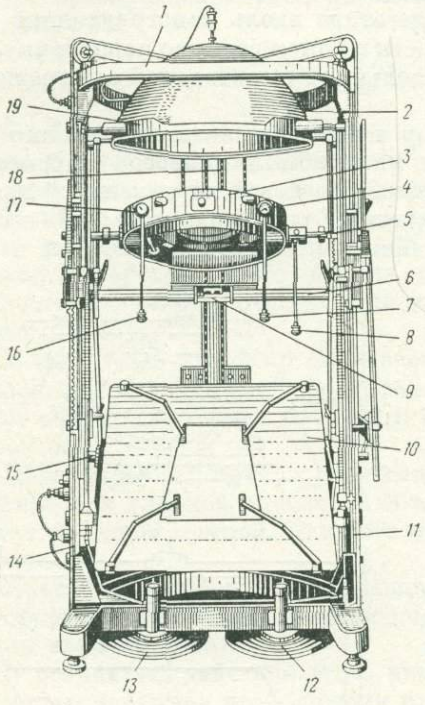


Рис. 130

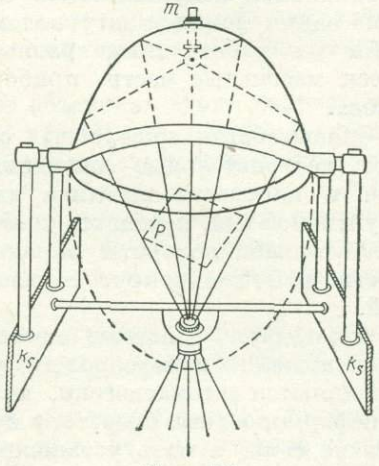


Рис. 131

Прежде чем вынуть или заложить кассету в прибор на круге и шкалах децентраций, следует установить примерно нулевые отсчеты и отвести замок-защелку кассеты.

Осветительное устройство *2* состоит из металлического рефлектора, имеющего форму эллипсоида вращения. В верхнем фокусе помещена ртутная электролампа, дающая актиничный свет. Нижний фокус совмещен с центром зрачка объектива, через который поступают световые лучи от источника света. Оба фокуса находятся на конструктивной оси. Рефлектор крепится на кольце *19*, опирающемся на четыре колонки, связанные с левой и правой каретками объектива. Таким образом, при перемещении объектива вдоль конструктивной оси нижний фокус рефлектора всегда остается совмещенным с указанным зрачком объектива.

Схема рефлектора показана на рис. 131. Для устранения неравномерностей освещения на отдельных участках экрана, объясняющихся погрешностями центрировки электролампы и другими причинами, в кольце *3* (см. рис. 130) над кассетой помещено матовое стекло.

На опорное кольцо *19* рефлектора и кольцо *3*, а также на это кольцо и держатель объектива надеваются чехлы из светонепроницаемой материи. Застежки «молния» в чехлах открывают доступ к электролампе и кассете.

На рис. 130 видны цепи, идущие от кареток объектива и негатива к противовесам, скользящим по задней направляющей *18*. Повороты экрана и кольца, несущего кассету, учитываются по шкалам. Имеются также шкалы, учитывающие движение кареток объектива и негатива. Отсчеты по всем шкалам делаются по индексам.

Прибор имеет электрическую сигнализацию, включающуюся при подходе к границам рабочих движений, осуществляемых вращением ножных штурвалов. Кроме того, для предотвращения поломок установлены фрикционные муфты сцеплений.

Основные характеристики фототрансформатора ФТБ:

формат снимков	18×18, 24×24, 30×30 см
объектив «Луч»	$f_{об}$ = 180 мм; 1 : 6,8
коэффициент трансформирования	от 0,6 до 5,7
размер экрана	100×100 см
наклон экрана	+45 — —9°
поворот кассеты	360°
продольная децентрация	+90 — —70 мм
поперечная децентрация	± 50 млм
мощность источника света	150 Вт
размеры прибора	1,5×1,2×3,0 м

§ 65. МАСШТАБНЫЙ ИНВЕРСОР БОЛЬШОГО ФОТОТРАНСФОРМАТОРА

Масштабный инверсор, установленный в большом фототрансформаторе, называется прямоугольным. Его принципиальная схема показана на рис. 132.

На каретке объектива находится ось вращения Q прямоугольного рычага. Она параллельна осям вращения экрана и плоскости негатива и расположена в главной плоскости объектива * на расстоянии $f_{об}$ от оптической оси.

Вообразим, что плечи q_2 и q_1 пропущены через шарнирные муфты. Центр шарнира a_2 нижней муфты неподвижен, центр шарнира a_1 верхней муфты перемещается вместе с кареткой негатива. Оба центра шарниров расположены на прямой gg, являющейся проекцией оптической оси на плоскости рисунка. Расстояние от центра нижнего шарнира до оси вращения ω' экрана и расстояние от центра верхнего шарнира до оси вращения ω плоскости негатива P равны фокусному расстоянию объектива.

Движение каретки объектива осуществляется ножным штурвалом, вращающим ходовой винт каретки. При движении каретки плечо q_2 скользит по нижней муфте, вращаясь вокруг точки Q, перемещающейся по прямой mm', параллельной оптической оси. Центр шарнира a_2 нижней муфты остается неподвижным. Вместе с плечом q_2 поворачивается плечо q_1, которое скользит по верхней муфте, находящейся на негативной каретке, и заставляет ее двигаться вдоль прямой gg.

На рис. 133 показано два положения системы: при коэффициенте увеличения, равном единице и большем единицы.

---

* Главные плоскости здесь и в дальнейшем принимаются совмещенными.

В первом случае объектив находится в точке S, плечи рычага занимают положение q_1 и q_2, центр верхнего ролика находится в точке a_1, плоскость негатива — в положении P

$$Sa_1 = Sa_2 = f_{об};$$

$$S\omega = S\omega' = 2f_{об}$$

Во втором случае объектив находится в точке S', плечи занимают положение q_1' и q_2', верхняя муфта находится в точке a_1' и плоскость негатива в положении P'.

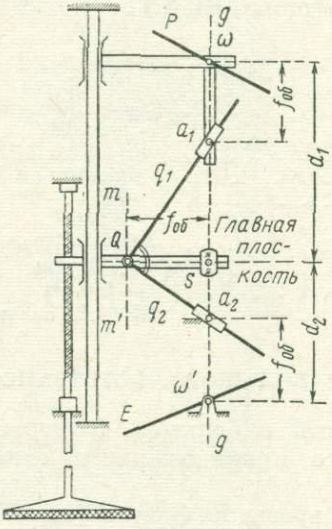


Рис. 132

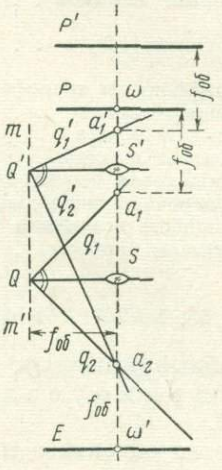


Рис. 133

Докажем, что точки ω и ω′, расположенные на осях вращения плоскости негатива и экрана, всегда находятся в оптическом сопряжении (см. рис. 132).

Воспользуемся уравнением Ньютона

$$x_1 x_2 = f_{об}.$$

Здесь x_1 и x_2 — расстояния от главных фокусов до оптически сопряженных точек, лежащих на оптической оси, или

$$x_1 = d_1 - f_{об} = Sa_1;$$

$$x_2 = d_2 - f_{об} = Sa_2.$$

Таким образом, для оптического сопряжения точек ω и ω′ необходимо потребовать, чтобы

$$Sa_1 \cdot Sa_2 = f_{об}^2. \qquad (а)$$

Нетрудно видеть, что это равенство будет выполнено в каждый момент движения объектива и плоскости негатива, если

$$SQ = f_{об}.$$

Действительно, из прямоугольного треугольника Qa_1a_2 имеем:

$$\frac{Sa_1}{SQ} = \frac{SQ}{Sa_2},$$

или

$$Sa_1 \cdot Sa_2 = SQ^2,$$

откуда при $SQ = f_{об}$ приходим к равенству (а).

Рассмотрим конструктивную схему масштабного инверсора (рис. 134).

Имеем две линейки, скрепленные под прямым углом и вращающиеся вокруг оси Q. Рабочие грани линеек наружные. Эти грани ножничными шарнирами прижаты к верхнему A_1 и нижнему A_2 роликам.

Ось вращения линеек Q и оба ролика расположены на юстировочных суппортах u, имеющих закрепительные винты. Суппорт с осью вращения Q находится на каретке k_S объектива, с верхним роликом — на каретке k_P негатива, суппорт с нижним роликом расположен на неподвижной пластине. Ослабив закрепительный винт, первый суппорт можно сместить в плоскости каретки k_S по направлению, перпендикулярному вертикальной направляющей W, а второй и третий — по направлению, параллельному вертикальной направляющей кареток. Суппорты необходимы для юстировки инверсора.

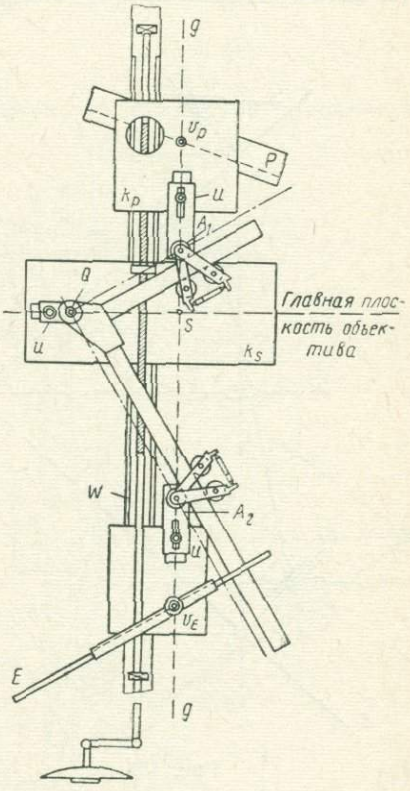


Рис. 134

Точкам a_1 и a_2 на принципиальной схеме соответствуют центры верхнего A_1 и нижнего A_2 роликов. Оси вращения v_P и v_E плоскости негатива и экрана перпендикулярны к прямой gg, параллельной вертикальной направляющей W. Расстояния от оси Q до этой прямой и от центров роликов A_1 и A_2 соответственно до осей v_P и v_E равны $f_{об}$. Ось вращения Q лежит в главной плоскости объектива (главные плоскости принимаются совмещенными) и параллельна осям вращения экрана и плоскости негатива.

§ 66. ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИНВЕРСОР БОЛЬШОГО ФОТОТРАНСФОРМАТОРА

В фототрансформаторе установлен перспективный инверсор Карпантье. Принципиальная схема этого инверсора показана на рис. 135. Рычаги d_1 и d_2, укрепленные на осях вращения плоскости негатива и экрана, закреплены перпендикулярно к этим плоскостям. Рычаги шарнирно соединены в точках c_1

и c_2 с каретками k_1 и k_2, перемещающимися по направляющим l_1 и l_2. При движении кареток рычаги, поворачиваясь вокруг осей вместе с плоскостями, скользят по шарнирам c_1 и c_2.

Направляющие l_1 и l_2 параллельны главной плоскости объектива и закреплены на одинаковых расстояниях t от осей v_P и v_E. Каретки шарнирно соединены в точках c_1 и c_2 с линейкой L, имеющей ось вращения θ, параллельную осям вращения v_P и v_E (все три оси перпендикулярны к плоскости чертежа).

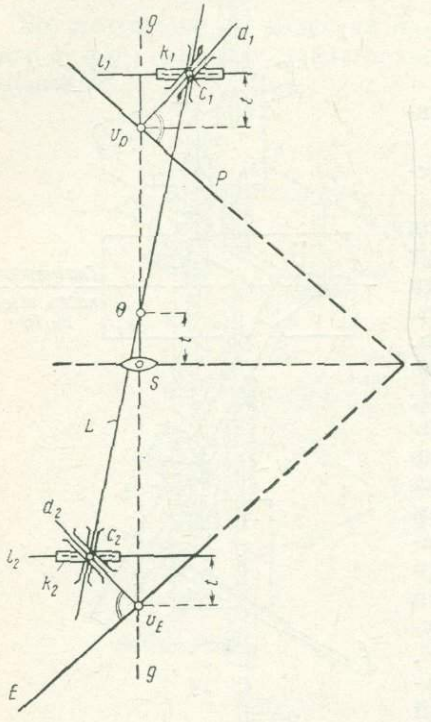


Рис. 135

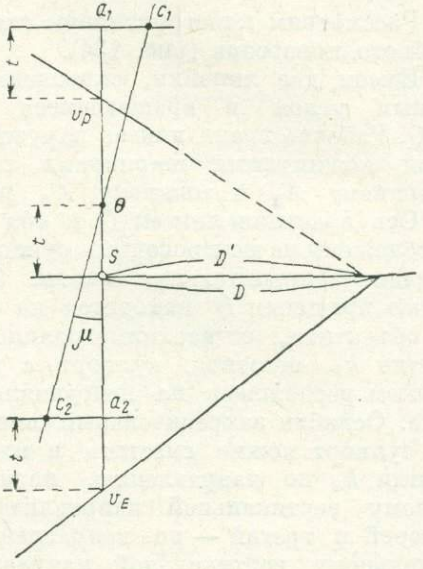


Рис. 136

Ось вращения θ расположена на расстоянии t от главной плоскости объектива и лежит на прямой gg, являющейся проекцией конструктивной (оптической) оси на плоскость рисунка.

При движении кареток линейка скользит по шарнирам c_1 и c_2 и поворачивается вокруг оси θ.

Рассмотрим, как будет действовать это устройство при вращении экрана (ножной штурвал для вращения экрана на рис. 135 не показан).

При вращении экрана рычаг d_2 заставит перемещаться каретку k_2 вдоль направляющей l_2. Это вызовет вращение линейки L вокруг оси θ и движение каретки k_1 по направляющей l_1. Движение каретки вызовет вращение рычага d_1 совместно с плоскостью негатива.

Если экран привести в горизонтальное положение, то линейка L займет вертикальное положение и плоскость P расположится горизонтально.

Докажем, что при наклоне экрана инверсор поворачивает плоскость негатива так, что обе плоскости пересекаются в главной плоскости объектива.

Пусть экран (рис. 136) пересекает главную плоскость объектива на расстоянии D от точки S, тогда

$$\frac{D}{Sv_E} = \frac{t}{a_2c_2}, \quad \text{откуда} \quad D = t\frac{Sv_E}{a_2c_2}.$$

Но

$$\frac{Sv_E}{a_2c_2} = \frac{\theta a_2}{a_2c_2} = \operatorname{ctg}\mu,$$

поэтому

$$D = t\operatorname{ctg}\mu.$$

Предположим, что плоскость негатива пересекается с главной плоскостью объектива на расстоянии D' от точки S. Тогда

$$\frac{D'}{Sv_P} = \frac{t}{a_1c_1}, \quad \text{откуда} \quad D' = t\frac{Sv_P}{a_1c_1}.$$

Но

$$\frac{Sv_P}{a_1c_1} = \frac{\theta a_1}{a_1c_1} = \operatorname{ctg}\mu,$$

а потому

$$D' = t\operatorname{ctg}\mu.$$

Как видим, $D' = D$, т. е. плоскость негатива и экрана действительно пересекается в главной плоскости объектива.

Конструктивная схема инверсора приведена на рис. 137. Инверсор расположен на правых каретках объектива и негатива и правой вертикальной направляющей.

Точкам c_1, c_2 здесь соответствуют центры роликов, укрепленных на верхней k_1 и нижней k_2 каретках.

Направляющая каретки k_1 находится на каретке негатива, направляющая каретки k_2 неподвижна. Обе направляющие горизонтальны. Ролики при помощи ножничных шарниров прижимаются к линейке L, ее ось вращения θ находится на каретке объектива. Такие же ножничные шарниры (на рисунке не показаны) прижимают ролики к линейкам d_1 и d_2.

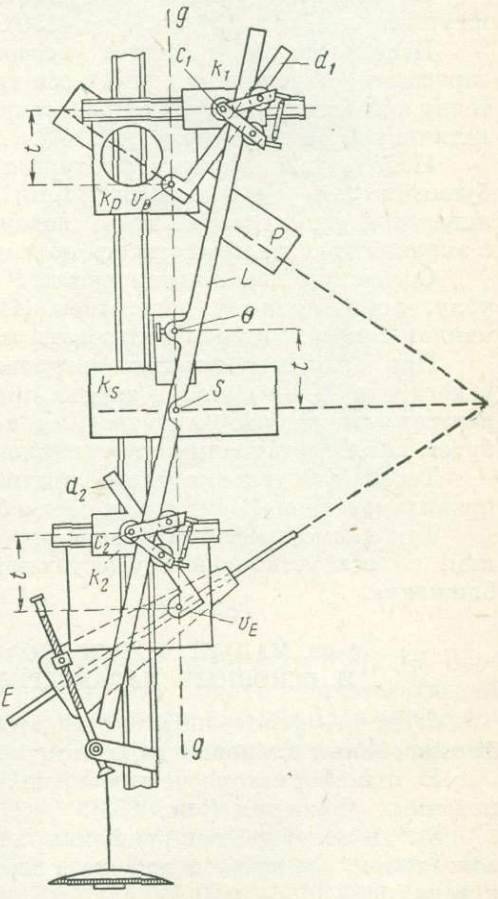


Рис. 137

Проведем мысленно прямые через точки v_P и c_1, v_E и c_2, c_1 и c_2. Эти прямые параллельны рабочим граням соответственных линеек. Точки v_P, θ, S, v_E лежат на прямой gg. Точка θ, кроме того, лежит на прямой c_1c_2.

Расстояние от точки θ до главной плоскости объектива, а также расстояния от точек v_P и v_E соответственно до прямых, по которым перемещаются центры роликов c_1 и c_2, равны между собой и обозначены через t.

Ось вращения θ линейки L имеет устройство, позволяющее перемещать ее в небольших пределах в плоскости рисунка по направлению, перпендикулярному gg. Это движение используется при юстировке инверсора.

§ 67. ВЫПОЛНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ТРАНСФОРМИРОВАНИИ НА ФТБ

Благодаря действию масштабного и перспективного инверсоров на экране всегда сохраняется резкое изображение аэронегатива; это означает, что оптические условия трансформирования всегда выполняются и остается выполнить геометрические условия.

Необходимые установки осуществляются рукоятками *7*, *8*, *16* и ножными штурвалами *12* и *13* (см. рис. 130).

Использование рукояток позволяет расположить главную вертикаль аэроснимка перпендикулярно к оси вращения плоскости P и сместить главную точку аэроснимка относительно точки ω конструктивной оси на требуемую величину δ [см. формулу (11.14)].

Использование ножного штурвала *12* позволяет наклонить экран на требуемый угол φ_E [см. формулу (11.10)]. При этом под действием перспективного инверсора плоскость негатива повернется так, что она будет пересекаться *с экраном в главной плоскости объектива*.

Однако угол наклона плоскости P в общем случае не будет равен требуемому углу, определяемому равенством (11.9). Чтобы получить требуемый угол наклона, необходимо использовать масштабный инверсор.

При вращении ножного штурвала *13* перемещаются каретки объектива и негатива. Угол наклона экрана при этом изменяться не будет, а плоскость негатива станет поворачиваться, и в некоторый момент угол наклона плоскости будет равен требуемому углу наклона, удовлетворяющему формуле (11.9).

Теперь все условия трансформирования соблюдены, и на экране получим правильное трансформированное изображение в заданном масштабе.

Так как трансформирование аэроснимка ведется по ориентирующим точкам, то все установки осуществляются по способу последовательного приближения.

§ 68. МАЛЫЙ ФОТОТРАНСФОРМАТОР (ФТМ). ОПИСАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ФТМ * — фототрансформатор второго рода, предназначенный для трансформирования плановых аэроснимков.

В трансформаторе четыре вращательных и четыре поступательных установочных движения (рис. 138).

Экран имеет две оси вращения, лежащие в плоскости экрана. Ось xx горизонтальная, ось yy расположена в вертикальной плоскости, перпендикулярной к оси xx.

Объектив имеет также две оси вращения, проходящие через узловую точку S перпендикулярно к оптической оси. Ось вращения $y'y'$ горизонтальна и находится в одной вертикальной плоскости с осью yy экрана. Ось вращения $x'x'$ лежит в одной вертикальной плоскости с осью xx экрана.

Кроме вращательных объектив имеет поступательное движение по вертикальным направляющим.

---

* ФТМ (SEG—IV) разработан и впервые изготовлен фирмой Цейсс—Аэротопограф.

Плоскость негатива расположена горизонтально и имеет только одно поступательное движение по вертикальным направляющим.

Кассета P, расположенная в плоскости негатива, может перемещаться по двум взаимно перпендикулярным направлениям, из которых одно параллельно горизонтальной оси вращения экрана.

Конструктивная ось прибора проходит через заднюю узловую точку объектива перпендикулярно к плоскости P. На конструктивной оси находятся точки пересечения осей вращения объектива S и экрана u'.

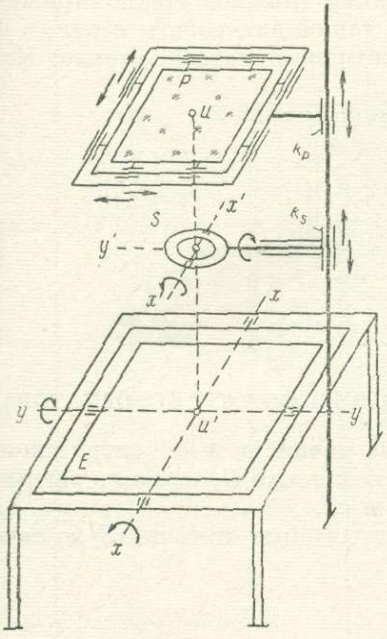


Рис. 138

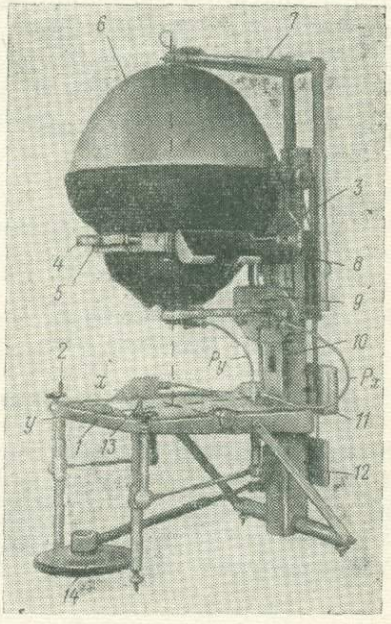


Рис. 139

Прибор имеет масштабный и два перспективных инверсора. Каждый перспективный инверсор действует при повороте экрана вокруг соответствующей оси. Благодаря действию масштабного и перспективных инверсоров три установки выполняются автоматически, поэтому при трансформировании нужно сделать не восемь, а пять независимых установок.

Общий вид фототрансформатора показан на рис. 139.

Здесь *1* — рама станины, несущая карданную раму экрана. Оси вращения экрана *xx*, *yy* обозначены пунктиром. *10* — массивная колонка, соединенная с рамой станины. На колонке имеются вертикальные направляющие кареток объектива *9* и негатива *8*, а также направляющие для противовесов *11* и *12* этих кареток. *6* — рефлектор, подвешенный на кронштейне *7*, укрепленном на каретке объектива. Как и в большом фототрансформаторе, рефлектор имеет форму эллипсоида вращения. В верхнем его фокусе находится источник света (ртутная лампа), нижний фокус совмещен с центром зрачка объектива, через который поступают в объектив лучи от источника света. *2* и *13* — ручные штурвалы для поворотов экрана вокруг осей *xx* и *yy*. Поворот объектива вокруг соответственных осей осуществляется, как указывалось ранее, автоматически

двумя перспективными инверсорами. *14* — ножной штурвал для перемещения каретки *9*, несущей объектив *S*, вдоль конструктивной оси, т. е. по вертикальным направляющим. Движение каретки негатива по тому же направлению осуществляется автоматически масштабным инверсором. *5* — рама, несущая кассету, перемещается при помощи винта *4* по горизонтальным цилиндрическим направляющим, укрепленным на каретке негатива. На рис. 139 видна правая направляющая *3*. Кассета, расположенная на раме *5*, может перемещаться вдоль нее. Это движение осуществляется вручную. Движение кассеты перпендикулярно к движению рамы *5*. Аэронегатив в кассете помещается между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами (нижнее стекло прижимное, верхнее покровное). Кассета приспособлена также для работы с целым фильмом. Сверх кассеты на четырех выступах находится матовое стекло. Кассета с матовым стеклом на рисунке не видна.

Основные характеристики фототрансформатора ФТМ:

формат снимков	до 30×30 см
объектив «Луч»	$f_{об} = 180$ мм; 1 : 6,8
коэффициент трансформирования	от 0,7 до 2,5
размеры экрана	60×60 см
наклон экрана	до 15°
поворот снимка	0°
продольная и поперечная децентрация	± 50 мм
мощность источника света	150 Вт

§ 69. МАСШТАБНЫЙ ИНВЕРСОР МАЛОГО ФОТОТРАНСФОРМАТОРА

Рассмотрим две оптически сопряженные точки ω и ω′ оптической оси (рис. 140). Отложим от них по направлению к точке S отрезки, равные $f_{об}$, и обозначим полученные точки буквами a_1 и a_2.

Известно, что расстояния x_1 и x_2, отсчитываемые от точки S до точек a_1 и a_2, удовлетворяют уравнению оптики

$$x_1 x_2 = f_{об}^2.$$

Примем за начало отсчета расстояний точку симметрии m и введем обозначения:

$$mS = q,$$

$$ma_1 = ma_2 = p.$$

Так как

$$p - q = x_1$$

и

$$p + q = x_2,$$

то

$$(p - q)(p + q) = f_{об}^2,$$

или

$$p^2 - q^2 = f_{об}^2, \tag{11.22}$$

или

$$p^2 = f_{об}^2 + q^2, \tag{11.23}$$

т. е. отрезки q и p, отсчитываемые от точки симметрии m до точки S и точек a_1 и a_2, связаны с фокусным расстоянием объектива теоремой Пифагора.

Уравнение (11.23) механически решается масштабным инверсором, который называется л е н т о ч н ы м.

Принципиальная схема ленточного масштабного инверсора показана на рис. 141.

На каретке объектива $\overline{K}_S$ находится гайка, через которую пропущен ходовой винт. Опорный подшипник a винта находится на вспомогательной каретке K. Вращение ходового винта осуществляется ножным штурвалом. На каретке объектива имеется цилиндр. Его ось c расположена в горизонтальной плоскости, проходящей через точку S объектива. К цилиндру присоединена стальная лента, огибающая ролик, укрепленный на вспомогательной каретке.

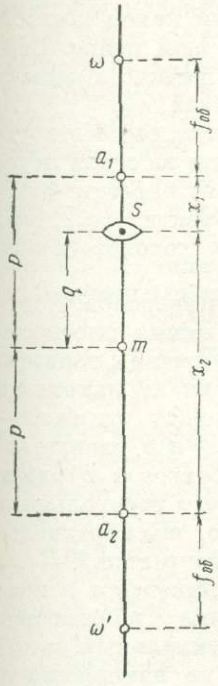


Рис. 140

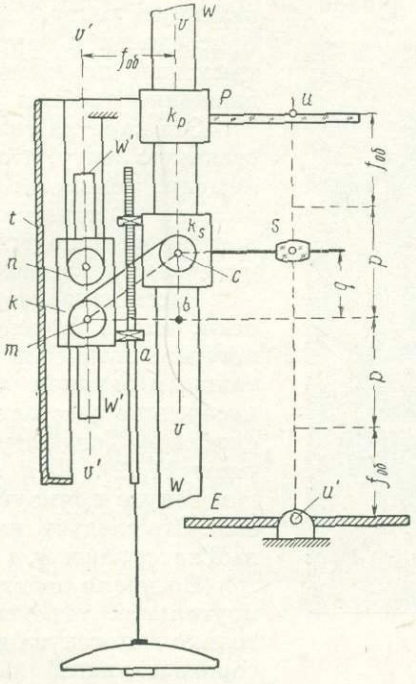


Рис. 141

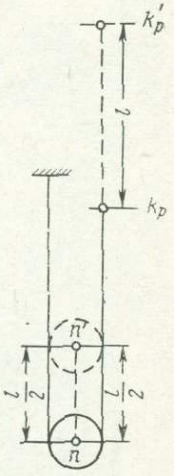


Рис. 142

Центр ролика обозначен буквой m. Другой конец ленты закреплен на нижнем конце вертикальной рейки t. Верхний конец рейки присоединен к каретке негатива. Цилиндр можно повернуть вокруг своей оси в небольших пределах и тем самым удлинить или укоротить ленту. Это движение используется только для юстировки инверсора. Во время работы длина ленты не меняется. Радиус круга основания цилиндра равен радиусу ролика.

На вспомогательной каретке k имеется второй ролик n, его огибает вторая стальная лента, один конец которой присоединен к каретке негатива k_P, а другой конец — к станине.

Каретки k_S и k_P перемещаются по вертикальной направляющей W, а каретка k — по вертикальной направляющей W'.

Расстояние между вертикальными прямыми vv и $v'v'$, проходящими соответственно через центры цилиндра c и ролика m, равно $f_{об}$.

Центр ролика m соответствует точке симметрии на рис. 140. Поэтому он должен всегда находиться в горизонтальной плоскости, проходящей посередине между точками u и u' конструктивной оси. Для этого каретка k должна пере-

мещаться вдвое медленнее каретки k_P. Это и осуществляется при помощи верхней стальной ленты и ролика n. Действительно, пусть каретка k_P поднялась на расстояние l и заняла положение k'_P; из рис. 142 следует, что стальная лента поднимет ролик с кареткой k на расстояние $nn' = {}^{l}/_{2}$. Таким образом, если в начале движения центр ролика m — точка симметрии, то симметричное положение ролика относительно точек u и u' не нарушится и во время перемещения каретки k_P.

Рассмотрим действие инверсора (см. рис. 141). При вращении ножным штурвалом ходового винта перемещается каретка объектива k_S и тянет за собой стальную ленту, нижний конец которой присоединен к вертикальной рейке. Вертикальное перемещение рейки вызывает движение каретки негатива k_P.

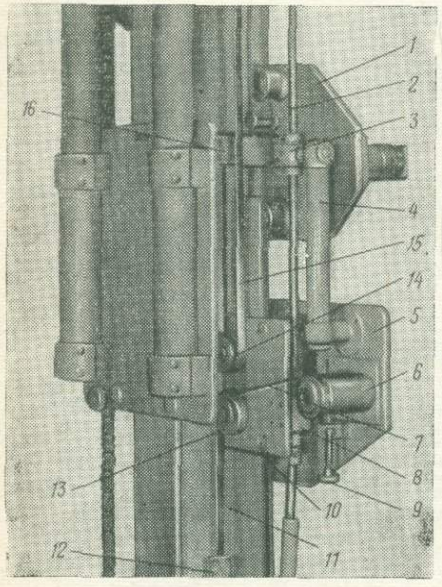


Рис. 143

Эта каретка увлекает за собой вторую стальную ленту, что влечет за собой перемещение вспомогательной каретки k совместно с кареткой объектива k_S, так как опорный подшипник ходового винта укреплен на каретке k.

Рассмотрим теорию инверсора. Допустим, что в начале движения плоскость негатива оптически сопряжена с горизонтальным экраном и ролик m находится посередине расстояния между этими плоскостями. Тогда отрезки p и q удовлетворяют (11.22). При этом отрезок p равен гипотенузе прямоугольного треугольника cmb. Это следует из того, что вертикальный катет равен q, а горизонтальный — $f_{об}$.

Во время действия инверсора в прямоугольном треугольнике изменяются только гипотенуза и вертикальный катет, горизонтальный катет не изменяется и остается равным $f_{об}$. Точка m по-прежнему является точкой симметрии. Очевидно, отрезки p и q, соответственно равные гипотенузе и вертикальному катету прямоугольного треугольника, всегда удовлетворяют (11.22).

Инверсор строго выполняет условие оптического сопряжения точек, лежащих на конструктивной оси, только в том случае, когда оптическая ось совпадает с конструктивной осью, т. е. при горизонтальном положении экрана.

При наклоне экрана оптическое сопряжение точек u и u' несколько нарушается, так как в результате действия перспективных инверсоров оптическая ось объектива поворачивается и составляет с конструктивной осью угол φ_P.

В данном случае для строгого оптического сопряжения точек u и u' уравнение (11.22) по аналогии с (11.7) следует заменить уравнением

$$p^2 - q^2 = f'^2_{об},$$

где

$$f'_{об} = \frac{f_{об}}{\cos \varphi_P}.$$

Для механического решения этого уравнения необходимо соответственно увеличить горизонтальный катет в прямоугольном треугольнике *cmb*. Однако в конструкции инверсора это не предусмотрено, так как трансформатор предназначен для трансформирования только плановых аэроснимков, когда $\cos \varphi_P$ практически можно принять равным единице, а следовательно, возможно пользоваться формулой (11.22).

На рис. 143 показан общий вид масштабного инверсора.

Здесь *1* — каретка негатива; *5* — каретка объектива; *10* — вспомогательная каретка; *11* — направляющая вспомогательной каретки; *2* — ходовой винт, пропущенный через гайку *3*. Гайка укреплена на колонке *4*, присоединенной к каретке объектива; *8* — подшипник ходового винта, укрепленный на вспомогательной каретке; *6* — цилиндр; *9* — юстировочный винт для поворота цилиндра вокруг своей оси; *13* — ролик, укрепленный на вспомогательной каретке. Центр ролика соответствует точке симметрии *m* на рис. 141; *7* — стальная лента, огибающая ролик *13* и одним концом присоединенная к цилиндру, а другим концом к нижнему концу *12* рейки (сама рейка на рисунке не видна; верхний конец ее скреплен с планкой *16* каретки негатива); *15* — вторая стальная лента, огибающая ролик *14*, укрепленный на вспомогательной каретке, и одним концом присоединенная к станине, а другим концом к планке *16* каретки негатива.

§ 70. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИНВЕРСОРЫ МАЛОГО ФОТОТРАНСФОРМАТОРА

При трансформировании экран E необходимо наклонить на угол φ в вертикальной плоскости, проходящей через главную вертикаль аэроснимка. При этом перспективные инверсоры поворачивают главную плоскость объектива на угол φ_P, так что она проходит через линию пересечения экрана и плоскости негатива (рис. 144).

Установим зависимость между тангенсами углов φ и φ_P, обозначив расстояния от точки S до плоскостей P и E по конструктивной оси через $l_1 = Su$ и $l_2 = Su'$.

Очевидно,

$$\operatorname{tg} \varphi_P = \frac{l_1}{uv};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{l_1 + l_2}{uv},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{l_1 + l_2}{l_1} \operatorname{tg} \varphi_P,$$

или

$$\operatorname{tg} \varphi = (1 + k_t) \operatorname{tg} \varphi_P,$$

или

$$\operatorname{tg} \varphi_P = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{1 + k_t}, \qquad (11.24)$$

где k_t — коэффициент трансформирования для горизонтали, проходящей через точку u конструктивной оси.

Наклон экрана на угол φ в требуемом направлении осуществляется путем поворота экрана вокруг двух взаимно перпендикулярных осей xx и yy (см. рис. 138) соответственно на углы φ_y и φ_x.

φ_y — угол между осью вращения yy экрана и горизонтальной плоскостью; φ_x — угол между осью вращения xx и экраном E.

Аналогично и поворот главной плоскости объектива на угол φ_P осуществляется путем поворота вокруг осей $x'x'$ и $y'y'$ соответственно на углы φ_{P_y} и φ_{P_x}; φ_{P_y} — угол между осью вращения $y'y'$ и плоскостью кольца, совпадающей с главной плоскостью объектива; φ_{P_x} — угол между осью вращения $x'x'$ и горизонтальной плоскостью.

Один инверсор поворачивает главную плоскость объектива на угол φ_{P_y}, другой — на угол $\varphi_{P\,x}$.

Между углами поворота φ_{P_x}, φ_{P_y} главной плоскости объектива и углами поворота φ_x, φ_y экрана существуют зависимости [3]

$$\operatorname{tg}\varphi_{P_x} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_x}{(1+k_t)\cos\varphi_y};$$

$$\operatorname{tg}\varphi_{P_y} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_y \cos\varphi_{P_x}}{1+k_t}.$$

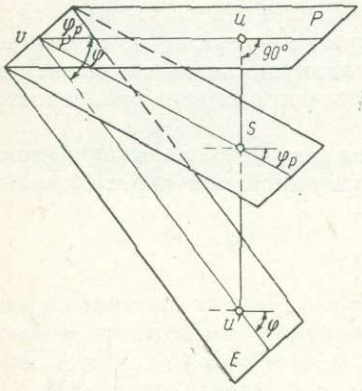
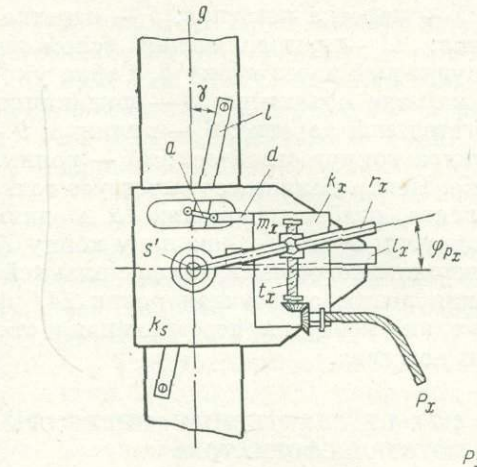


Рис. 144



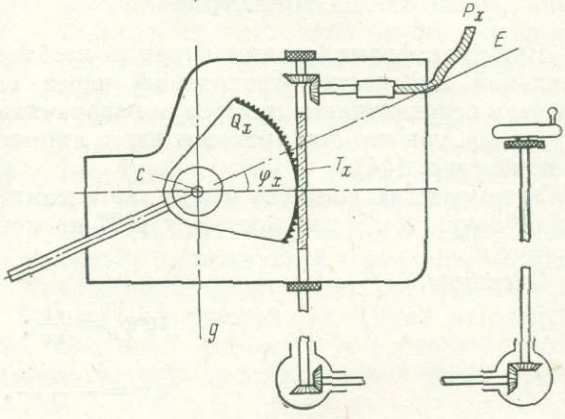


Рис. 145

При трансформировании плановых аэроснимков можно принять

$$\cos\varphi_y = 1 \quad \text{и} \quad \cos\varphi_x = 1.$$

Тогда

$$\operatorname{tg}\varphi_{P_x} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_x}{1+k_t} \tag{11.25}$$

и

$$\operatorname{tg}\varphi_{P_y} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_y}{1+k_t}. \tag{11.26}$$

Эти уравнения и решаются перспективными инверсорами ФТМ, называемыми тангенциальными.

Принципиальная схема тангенциального инверсора, поворачивающего главную плоскость объектива вокруг оси $y'y'$, показана на рис. 145.

На ось вращения yy карданной рамы экрана, проходящую через точку c перпендикулярно к плоскости рисунка, наглухо насажен червячный сектор Q_x, находящийся в зацеплении с винтом T_x.

Вращение винта производится ручным штурвалом, соединенным с ним системой зубчатых конических колес и валов. Вращение винта T_x при помощи гибкого вала P_x и конической пары передается винту t_x, подшипники которого находятся на каретке k_x, перемещающейся по горизонтальной направляющей l_x.

Направляющая скреплена с кареткой объектива k_S. На винте t_x находится гайка с шарнирной муфтой m_x, через которую пропущен рычаг r_x, наглухо надетый на ось вращения $y'y'$ держателя объектива *. Эта ось проходит через точку S' перпендикулярно к плоскости рисунка.

К каретке k_x присоединен конец планки d, другой конец заканчивается роликовым шарниром a, охватывающим неподвижную наклонную линейку l.

Рассмотрим действие инверсора. При вращении ручного штурвала происходит вращение винтов T_x и t_x. Вращение винта T_x вызывает вращение червячного сектора, а следовательно, и экрана вокруг оси yy.

Вращение винта t_x вызывает перемещение гайки с шарниром m_x вдоль оси винта; при этом рычаг r_x поворачивается вокруг оси совместно с главной плоскостью объектива.

Вращение рычага r_x происходит не только при вращении винта t_x, но и при перемещении каретки k_x вдоль направляющей l_x при условии, что рычаг занимает наклонное положение **.

Движение каретки k_x по направляющей происходит во время перемещения каретки объектива k_S вдоль конструктивной оси gg, когда роликовый шарнир a катится по наклонной линейке l.

Таким образом, вращение рычага r_x а следовательно, и главной плоскости объектива вокруг оси $y'y'$ происходит при вращении экрана вокруг оси yy и при изменении коэффициента трансформирования, если экран занимает наклонное положение.

Установим зависимость между тангенсами углов поворота экрана и главной плоскости объектива.

Пусть в исходном положении экран и рычаг r_x горизонтальны. Повернем ручной штурвал на n оборотов. То же число оборотов сделают винты T_x и t_x, так как радиусы конических колес одинаковы. Экран повернется на некоторый угол φ_x, а главная плоскость объектива на некоторый угол φ_{P_x}.

Очевидно, что

$$\operatorname{tg}\varphi_x = \frac{nV_x}{R_x},$$

где V_x — шаг винта T_x, R_x — радиус начальной окружности червячного сектора.

$$\operatorname{tg}\varphi_{P_x} = \frac{nv_x}{r_x^0},$$

---

* Схема держателя показана на рис. 138, а конструктивное оформление — на рис. 147 и 148.

** В наклонном положении рычаг находится, когда угол наклона экрана $\varphi_x \neq 0$. При $\varphi_x = 0$ рычаг занимает горизонтальное положение.

где v_x — шаг винта t_x, r_x^0 — расстояние от точки S' до прямой, проходящей через центр шарнира m_x перпендикулярно к направляющей l_x.

Разделив почленно последнее равенство на предыдущее и сделав сокращение, получим

$$\frac{\operatorname{tg}\varphi_{P_x}}{\operatorname{tg}\varphi_x} = \frac{v_x}{V_x}\frac{R_x}{r_x^0}. \qquad (а)$$

В правую часть этого равенства входит одна переменная величина r_x^0. С изменением этой величины будет изменяться и отношение тангенсов углов φ_{P_x} и φ_x. Потребуем, чтобы это отношение удовлетворяло условию (11.25), т. е. чтобы

$$\frac{\operatorname{tg}\varphi_{P_x}}{\operatorname{tg}\varphi_x} = \frac{1}{1+k_t}.$$

Сопоставляя это равенство с (а), находим величину r_x^0, при которой выполняется условие пересечения трех плоскостей по одной прямой

$$r_x^0 = \frac{v_x}{V_x} R_x (1+k_t). \qquad (11.27)$$

Здесь v_x, V_x, R_x — величины постоянные для данного фототрансформатора. Таким образом, расстояние r_x^0 от оси вращения $y'y'$ держателя объектива до прямой, проходящей через центр шарнира m_x перпендикулярно к направляющей l_x, является линейной функцией от коэффициента трансформирования.

В частном случае, при $k = 1$

$$r_x^0 = 2\frac{v_x}{V_x} R_x. \qquad (б)$$

В инверсоре каретка k_x перемещается вдоль направляющей l_x при помощи наклонной линейки l. Определим, под каким углом γ линейка должна быть закреплена относительно конструктивной оси.

Из равенства (11.27) следует, что

$$\Delta r_x^0 = \frac{v_x}{V_x} R_x \Delta k_t, \qquad (в)$$

т. е. *с изменением коэффициента трансформирования на величину* Δk_t каретка k_x должна перемещаться по направляющей l_x на величину Δr_x^0.

Выразим Δk_t через величину перемещения каретки объектива по конструктивной оси.

Имеем:

$$k_t = \frac{l_2}{l_1}.$$

В соответствии с рис. 144

$$l_2 = Su'; \quad l_1 = Su.$$

Отрезки l_1 и l_2 связаны уравнением оптики (11.07). Умножим обе части этого равенства на l_2 и, полагая $\cos\varepsilon \approx 1$, запишем в виде

$$k_t + 1 = \frac{l_2}{f_{об}}.$$

Отсюда находим, что

$$\Delta k_t = \frac{\Delta l_2}{f_{об}}.$$

Подставляя это выражение в равенство (в), получаем

$$\Delta r_x^0 = \frac{v_x}{V_x}\,\frac{\Delta l_2}{f_{об}}\,R_x.$$

Из рис. 146 видно, что

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{\Delta r_x^0}{\Delta l_2}.$$

Подставляя сюда выражение для Δr_x^0 из предыдущего равенства, окончательно имеем:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{v_x}{V_x}\,\frac{R_x}{f_{об}}. \qquad (11.28)$$

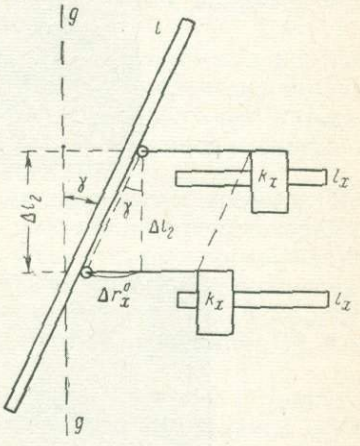


Рис. 146

По этой формуле и определяется угол γ, под которым должна быть закреплена линейка l относительно конструктивной оси трансформатора.

Все величины, входящие в это равенство, являются постоянными для данного фототрансформатора.

Обратим внимание на следующие условия, которые должны быть выполнены в инверсоре:

1. При горизонтальном положении экрана рычаг r_x должен занимать горизонтальное положение.

2. При коэффициенте трансформирования $k_t = 1$ расстояние r_x^0 должно удовлетворять равенству (б).

3. Линейка l должна быть установлена под углом γ к конструктивной оси, определяемым равенством (11.28).

Первое условие проверяется при рабочей юстировке прибора, последние два обеспечиваются заводской юстировкой.

Верхняя часть рассмотренного перспективного инверсора, смонтированная на каретке объектива, показана на рис. 147. Обозначения на этом и предшествующих рисунках одинаковые. Местоположение червячного сектора R_x и винта T_x, соединенного гибким валом P_x с верхней частью инверсора, видно на рис. 139. Как указывалось раньше, вращение экрана вокруг оси yy осуществляется ручным штурвалом *13*.

Другой тангенциальный инверсор, поворачивающий главную плоскость объектива вокруг оси $x'x'$, устроен так же, как и первый, и имеет такие же размеры, т. е. $R_y = R_x$, $V_y = V_x$, $v_y = v_x$.

Поэтому по аналогии с равенством (11.27) можем записать, что для выполнения условия (11.26) расстояние r_y^0 от оси вращения $x'x'$ карданного кольца объектива до прямой, проходящей через центр шарнира m_y и перпендикулярной к направляющей l_y, должно удовлетворять уравнению

$$r_y^0 = \frac{v_y}{V_y}\,R_y\,(1 + k_t). \qquad (11.29)$$

Таким образом, при любом значении k_t

$$r_y^0 = r_x^0.$$

Общий вид инверсора показан на рис. 148.

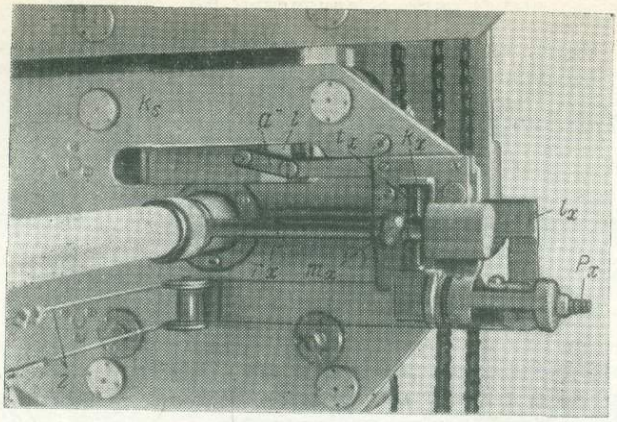


Рис. 147

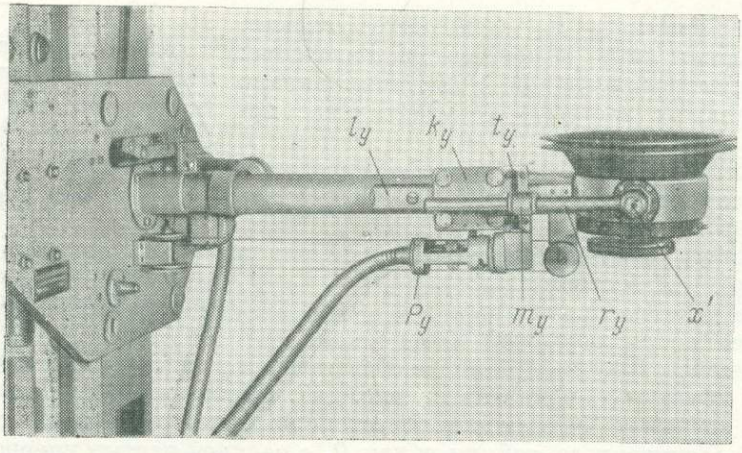


Рис. 148

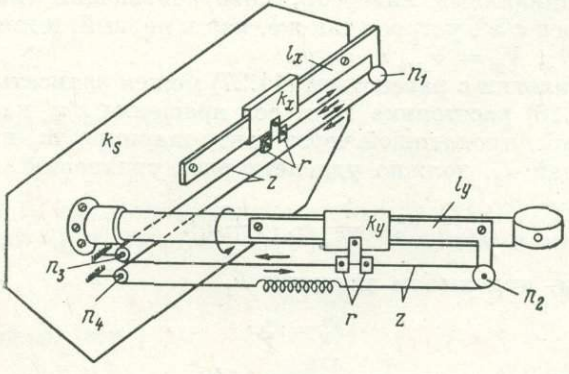


Рис. 149

Направляющая l_y укреплена на держателе, вращающемся вокруг своей оси $y'y'$. Это вращение осуществляется первым перспективным инверсором. На конце держателя имеется кольцо, несущее ось вращения $x'x'$ внутреннего бочкообразного кольца (на рисунке не видно), в котором помещен объектив. Остальные детали второго перспективного инверсора — рычаг r_y, каретка k_y, винт t_y и муфта m_y — хорошо видны на рисунке. Нижний конец гибкого вала P_y присоединен к винту T_y, вращающему червячный сектор Q_y, надетый на ось вращения xx карданной рамы экрана; местоположение этих деталей видно на рис. 139. Как указывалось раньше, экран вращается вокруг оси xx при помощи ручного штурвала *2*.

Перемещение каретки k_y вдоль направляющей l_y при изменении коэффициента трансформирования k_t происходит одновременно с перемещением каретки k_x. Достигается это при помощи тросика z, соединяющего обе каретки (рис. 149). Тросик огибает блоки n_1 и n_2, укрепленные на концах линеек l_x и l_y, и блоки n_3 и n_4, укрепленные на каретке объектива k_S.

Концы тросика присоединены к пружинке для натяжения тросика. Каретки k_x и k_y сцеплены с тросиком при помощи пластинок-ограничителей r, охватывающих планки, скрепленные с каретками. Ограничители имеют закрепительные винты. Ослабив винты, можно передвинуть ограничители по тросику и в нужном положении закрепить. Это движение используется при юстировке второго перспективного инверсора. Оно позволяет сделать расстояние r_y^0 равным r_x^0.

Как отмечалось раньше, движение каретки k_x по направляющей l_x происходит в результате движения роликового шарнира по наклонной линейке l (см. рис. 145). При этом каретка увлекает за собой тросик, что и заставляет каретку k_y перемещаться по направляющей l_y одновременно с перемещением каретки k_x. Очевидно, обе каретки проходят одинаковый путь.

Таким образом, отрезки r_x^0 и r_y^0 изменяются на одинаковую величину, и, следовательно, равенство отрезков не нарушается.

§ 71. ВЫПОЛНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ТРАНСФОРМИРОВАНИИ НА ФТМ

Оптические условия при трансформировании выполняются автоматически благодаря действию масштабного и перспективных инверсоров. Для выполнения геометрических условий необходимо:

1. Используя движение кассеты по осям x и y, сместить главную точку o аэроснимка по направлению главной вертикали относительно точки u конструктивной оси на требуемую величину δ (11.17).

2. Используя ручные штурвалы, наклонить экран на угол $\varphi = \varphi_P + \varphi_E$ (11.9) и (11.10) в направлении проекции главной вертикали.

При этом в результате действия перспективных инверсоров повернется и главная плоскость объектива. Однако угол поворота в общем случае не будет соответствовать формуле (11.9).

3. Используя ножной штурвал, переместить каретку объектива k_S по конструктивной оси так, чтобы угол наклона главной плоскости объектива был равен требуемому углу φ_P.

При наклонном положении экрана движение каретки объектива вдоль конструктивной оси вызывает вращение рычагов r_x и r_y перспективных инверсоров. Поэтому при движении каретки изменяется наклон главной плоскости объектива, т. е. изменяются углы φ_P и φ_E, но их сумма остается равной углу

наклона φ экрана. В некоторый момент движения углы φ_P и φ_E будут равны углам, требуемым теорией. После этого все условия трансформирования будут выполнены и на экране получено правильное трансформированное изображение в заданном масштабе.

Прибор предназначен для трансформирования по ориентирующим точкам, поэтому все установки осуществляются по способу последовательного приближения.

§ 72. ЛЕКАЛЬНЫЙ И РОМБИЧЕСКИЙ МАСШТАБНЫЕ ИНВЕРСОРЫ

Кроме рассмотренных конструкций масштабных инверсоров широко распространены лекальный и ромбический инверсоры. На рис. 150 показана принципиальная схема масштабного лекального инверсора, предложенного П. П. Соколовым *. На ось вращения v наглухо насажены лекало *1*, шестерня *3* и червячное колесо *2*.

С шестерней сцеплена зубчатая рейка *7*, присоединенная к каретке

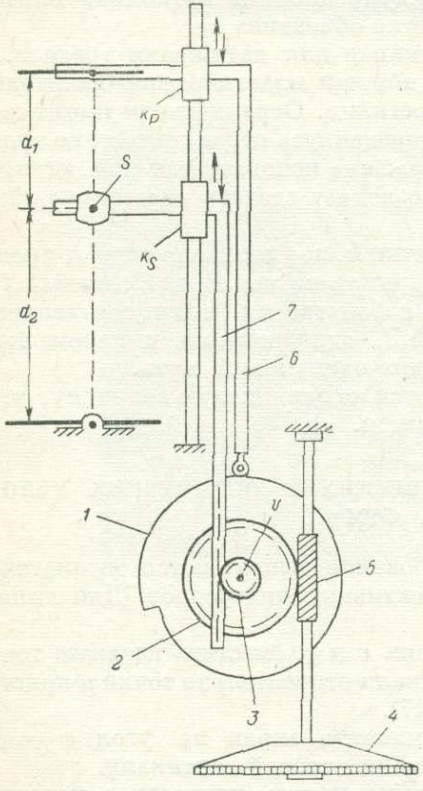


Рис. 150

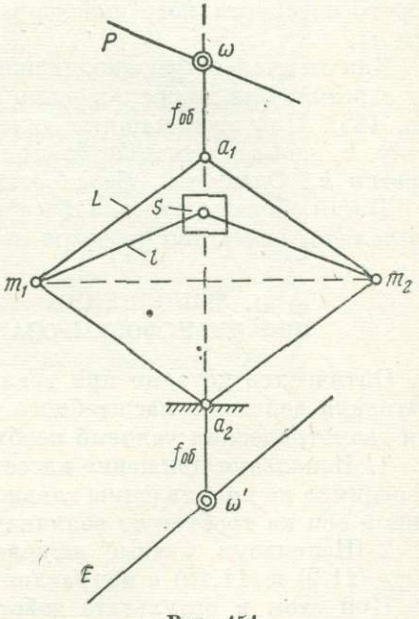


Рис. 151

объектива k_S^1. На лекало опирается ролик рейки *6*, присоединенный к каретке негатива k_P. Вращение шестерни и лекала производится с помощью ножного штурвала *4*, соединенного при помощи червячного вала *5* с червячным колесом. Вращение шестерни вызыва перемещение каретки объектива вдоль оптиче-

* Этот инверсор был установлен в фототрансформаторах Московского геодезического института, применявшихся на производстве в течение многих лет.

ской оси, вращение лекала — перемещение каретки негатива по тому же направлению. Лекало рассчитывается так, чтобы перемещение каретки негатива было согласовано с перемещением каретки объектива, т. е. в каждый момент движения расстояния d_1 и d_2 удовлетворяли уравнению оптики

$$\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}=\frac{1}{f_{об}}.$$

Принцип лекального инверсора в различном конструктивном оформлении находит применение в рассмотренных ниже современных зарубежных фототрансформаторах. Профессор Ф. В. Дробышев использовал лекальный инверсор в оптическом редукторе (см. § 90).

На рис. 151 показана принципиальная схема ромбического инверсора.

Он представляет собой шарнирный ромб, образованный металлическими стержнями L. Шарниры a_1 и a_2 расположены на прямой, параллельной оптической оси объектива (являющейся конструктивной осью), и закреплены соответственно на расстоянии $f_{об}$ от горизонтальных осей вращения плоскости негатива P и экрана E.

Шарниры m_1 и m_2 ромба соединены при помощи стержней l с кареткой объектива. При этом шарнир S находится в главной плоскости объектива.

Инверсор действует при перемещении каретки объектива k_S вдоль конструктивной оси. Это движение осуществляется ножным штурвалом, вращающим ведущий винт (на рисунке не показаны). Каретка объектива увлекает за собой стержни l, заставляющие ромб сжиматься или растягиваться. Так как центр нижнего шарнира остается неподвижным, то происходит движение верхнего шарнира совместно с кареткой негатива P.

Рассмотрим, в каком случае будет выполняться условие (а) [см. § 65], т. е.

$$Sa_1 \; Sa_2 = f_{об}^2.$$

Из рис. 151 следует, что

$$Sa_1 = \sqrt{L^2-Q^2}-\sqrt{l^2-Q^2};$$

$$Sa_2 = \sqrt{L^2-Q^2}+\sqrt{l^2-Q^2},$$

где

$$Q=\frac{1}{2}\overline{m_1m_2}.$$

Откуда

$$Sa_1 \cdot Sa_2 = L^2-l^2,$$

следовательно, длины стержней L и l должны удовлетворять условию

$$L^2-l^2=f_{об}^2. \qquad (11.30)$$

Обычно стержень l конструктивно оформляют так, чтобы его длину можно было несколько изменять. Это необходимо для юстировки инверсора. Длина стержня l должна равняться

$$l=\sqrt{L^2-f_{об}^2}.$$

При $k_t = 1$ стержни l занимают горизонтальное положение и шарнир S находится на одном уровне с шарнирами m_1 и m_2. При $k_t > 1$ шарнир находится выше и при $k_t < 1$ — ниже шарниров m_1 и m_2.

Ромбический инверсор установлен во многих зарубежных фототрансформаторах. По этому принципу действует масштабный инверсор в оптическом редукторе Н. А. Попова (см. § 89).

§ 73. ФОТОТРАНСФОРМАТОР SEG-V

SEG-V (рис. 152) — фототрансформатор второго рода, предназначенный для трансформирования плановых аэроснимков. Разработан фирмой «Цейсс—Аэротопограф»*. Имеет четыре вращательных и четыре поступательных установочных движения. Конструктивной осью прибора служит оптическая ось объектива, занимающая всегда отвесное положение.

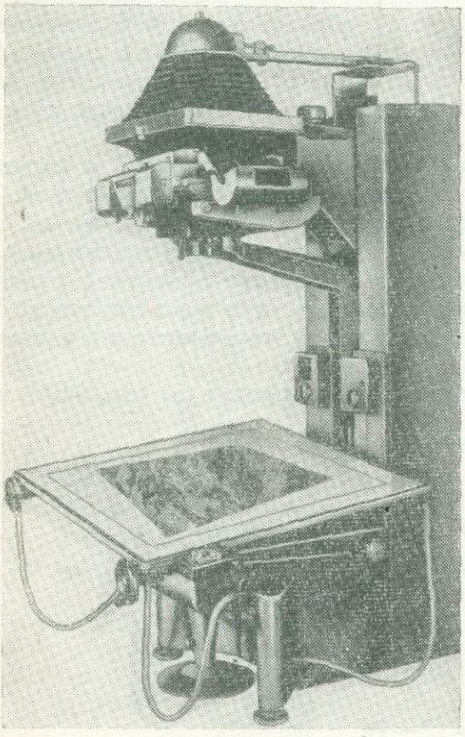


Рис. 152

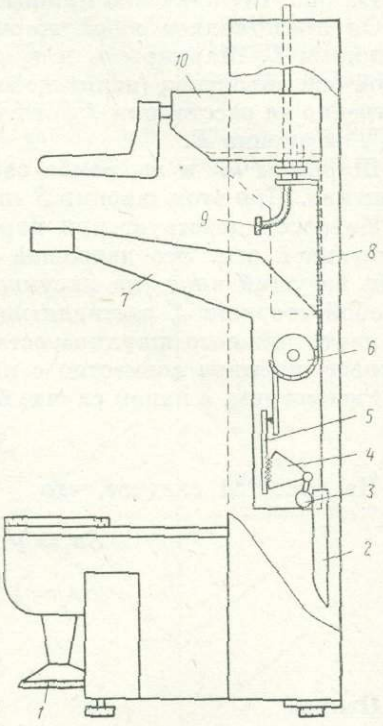


Рис. 153

К вращательным движениям относятся:

а) повороты экрана вокруг двух взаимно перпендикулярных осей,

б) наклоны плоскости негатива вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

К поступательным движениям относятся:

а) движения объектива и плоскости негатива вдоль конструктивной (оптической) оси,

б) перемещения кассеты в своей плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям (продольная и поперечная децентрации).

---

* В настоящее время изготовляется фирмой Opton (ФРГ)

Прибор оснащен масштабным и перспективным инверсорами, кроме того, в нем впервые применено устройство для автоматического введения децентраций.

Задача решается электромеханическим способом.

Воспользуемся формулой децентрации (11.16), которую для нашего случая перепишем в виде

$$\left.\begin{aligned}\delta_y &= \frac{1}{2} f_{об} \frac{\varphi_{E_y}}{\rho}\left[\left(\frac{f}{f_{об}}\right)^2 - 1 + \frac{1}{k^{0^2}}\right] \\ \delta_x &= \frac{1}{2} f_{об} \frac{\varphi_{E_x}}{\rho}\left[\left(\frac{f}{f_{об}}\right)^2 - 1 + \frac{1}{k^{0^2}}\right]\end{aligned}\right\}, \tag{11.31}$$

где δ_y и δ_x — продольная и поперечная децентрации, φ_{E_y} и φ_{E_x} — поперечный и продольный углы наклона экрана.

Вычисление децентраций по этим формулам производится счетно-решающим устройством механического типа, в котором предварительно делается установка фокусного расстояния f аэроснимка. Так как фокусное расстояние объектива фототрансформатора $f_{об}$ — постоянно, децентрации δ_y и δ_x являются функциями двух переменных — угла наклона экрана и коэффициента трансформирования.

Вычисленные значения δ_y и δ_x снимаются потенциометрами и через усилитель подаются к сервомоторам, встроенным в каретку негатива, которые и смещают держатель кассеты на требуемые величины.

Автоматическое устройство можно отключить и вводить децентрации с помощью рукояток.

Первое оптическое условие выполняется лекальным инверсором и электрическим устройством.

Перемещение каретки объектива *7* (рис. 153) осуществляется ножным штурвалом *1*.

Движение каретки негатива *10* относительно каретки объектива производится путем изменения длины цепи * *8*, связывающей обе каретки так, что расстояния d_1 и d_2 всегда удовлетворяют уравнению оптики $\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f_{об}}$, приведенному к виду

$$d_1 = \frac{d_2 f_{об}}{d_2 - f_{об}},$$

или

$$\Delta d_1 = \frac{d_2 f_{об}}{d_2 - f_{об}} - 2f_{об}. \tag{11.32}$$

Это уравнение решается лекальным инверсором. Изменение же длины цепи на величину Δd_1 осуществляется не механическим путем, а электрическим устройством.

Рассмотрим действие инверсора.

При движении каретки объектива ролик *3* катится по лекалу *2*, поворачивая зубчатый сектор *4*, что вызывает вертикальное перемещение зубчатой рейки *5* согласно уравнению (11.32). При этом начинает действовать электрическое устройство, включается сервомотор *6*, который и изменяет длину цепи

---

* Эта цепь всегда натянута благодаря действию противовеса (на рисунке не показан), стремящегося поднять каретку негатива.

на требуемую величину, после чего сервомотор автоматически выключается. Винт *9* служит для юстировки инверсора.

Второе оптическое условие выполняется перспективным инверсором Карпантье. В отличие от перспективного инверсора большого фототрансформатора, в котором линейка L (см. рис. 137), управляющая наклоном плоскости негатива, вращается только в одной плоскости, перпендикулярной к оси вращения экрана, в данном случае эта линейка может наклоняться в любом направлении в соответствии с наклонами экрана вокруг двух осей.

Осветительное устройство состоит из ртутной лампы и конденсора. В качестве конденсора использованы две линзы Френеля, позволившие уменьшить размеры верхней части проектирующей камеры.

Рама конденсора закреплена на каретке негатива. Ртутная лампа укреплена на держателе, который автоматически перемещается по конструктивной оси относительно объектива во время действия масштабного инверсора. Благодаря этому источник света всегда фокусируется в зрачке объектива, через который поступают в объектив световые лучи, и тем самым сохраняется равномерность освещения на экране. Заметим, что автоматическая фокусировка происходит при коэффициентах увеличения от 1,7 до 6,5. При коэффициенте увеличения менее 1,7 фокусировка света осуществляется рукояткой.

Для лучшего выравнивания освещения в камеру вставляется рамка с супрониловой или матовой пленкой.

На держателе объектива укреплен экспонометр.

Выравнивание и прижим фотобумаги к экрану осуществляются вакуумным способом.

Фототрансформатор снабжен счетчиками для отсчета тангенсов углов наклона экрана с точностью до 0,001, коэффициента трансформирования с точностью до 0,001 и децентраций с точностью до 0,01 мм.

Это дает возможность производить трансформирование аэроснимков не только по ориентирующим точкам, но и по установочным элементам.

В случае автоматического введения децентраций оператором делаются три установки: двух углов наклона экрана и коэффициента трансформирования.

Основные характеристики фототрансформатора Seg-V:

формат снимков	до 24×24 см
наклон экрана	до 14°
объектив «Топогон»	$f_{об}$ = 180 мм; 1:6,3
коэффициенты трансформирования	от 0,5 до 6,5
размер экрана	100×100 см
децентрации, продольная и поперечная	±45 мм
размеры прибора	1,0×1,4×2,8 м

§ 74. ФОТОТРАНСФОРМАТОР Е-4 ВИЛЬДА

Е-4 — фототрансформатор второго рода, предназначенный для трансформирования плановых аэроснимков (рис. 154). Изготовлен фирмой Вильда. Система установочных движений у прибора такая же, как у фототрансформатора Seg-V.

Прибор имеет масштабный инверсор лекального типа. Перемещение каретки объектива осуществляется электромотором и ножным штурвалом (для точной установки), вращающими ходовой винт.

Перемещение каретки негатива относительно каретки объектива осуществляется электрическим устройством в соответствии с уравнением (11.32),

решаемым масштабным инверсором (обе каретки соединены винтом, который вращается сервомотором).

Инверсор имеет регулятор резкости, позволяющий получить резкое изображение на экране при различной толщине фотоматериала.

Функции перспективного инверсора выполняются электромеханическим устройством. Счетно-решающее устройство вычисляет углы наклона плоскости негатива по формулам

$$\varphi_{P_x} = \frac{\varphi_{E_x}}{k_t} \quad \text{и} \quad \varphi_{P_y} = \frac{\varphi_{E_y}}{k_t}$$

Вычисленные углы наклона снимаются потенциометрами и передаются на плоскость негатива. Наклоны плоскости негатива производятся сервомоторами.

Наклоны экрана в двух направлениях осуществляются двумя ручными штурвалами. Предусмотрена также возможность наклонять экран в одном диагональном направлении.

Выравнивание и прижим фотобумаги к экрану производятся с помощью вакуумного устройства. Дополнительно могут быть использованы магнитные линейки, которые кладутся по периметру фотобумаги.

Рукоятки децентраций кассеты размещены вблизи ручных штурвалов экрана, что удобно для работы. Перемещения кассеты осуществляются сервомоторами.

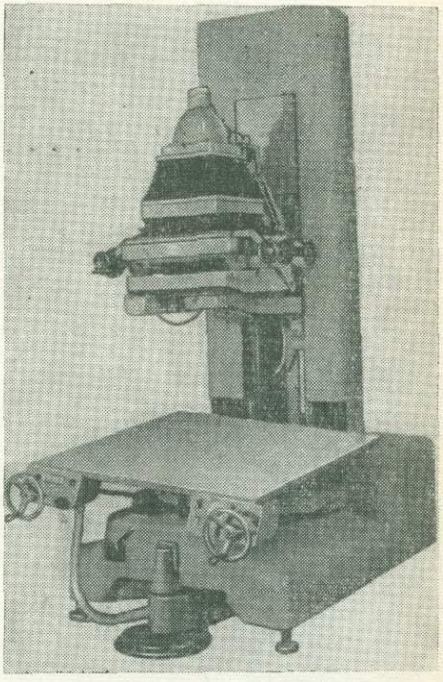


Рис. 154

Осветительное устройство состоит из ртутной лампы и конденсора, состоящего из четырех линз Френеля. Предусмотрено предохранение аэронегатива от нагрева с помощью вентилятора, охлаждающего лампу, и защитного стеклянного фильтра, расположенного между кассетой и лампой. Имеются также сменные фильтры для выравнивания неодинаковой плотности аэронегатива и набор фильтров, абсорбирующих (равномерно ослабляющих) освещенность изображения на экране. Использование абсорбирующих фильтров способствует получению трансформированных снимков одного тона. Для всех этих фильтров имеется специальная рамка.

Держатель, несущий ртутную лампу, при изменении масштаба изображения на экране автоматически перемещается вдоль конструктивной оси так, что источник света всегда фокусируется в зрачке объектива, через который поступают в объектив световые лучи. Этим сохраняется равномерность освещения на экране при изменении масштаба изображения.

Объектив снабжен затвором и фотоэлементами для определения выдержки.

Прибор имеет счетчик для отсчета тангенсов углов наклона экрана с точностью до 0,0001, коэффициента трансформирования с точностью до 0,0001 и децентраций с точностью до 0,01 мм.

Наличие точных шкал позволяет использовать прибор при трансформировании по установочным элементам.

Основные характеристики фототрансформатора Е-4:

формат снимков	до 24×24 см
объектив «Репрогон»	$f_{об}$ = 15 см; 1 : 5,6
дисторсия	не более ±0,05 мм
разрешающая способность:	
в центре поля изображения	*100 л/мм*
по краям	60 л/мм
коэффициент трансформирования	от 0,8 до 7,0
размер экрана	106×106 см
наклон экрана	±15°
поворот кассеты	0°
продольная и поперечная децентрации	±40 мм
размеры прибора	1,2×1,9×2,8 м

§ 75. ФОТОТРАНСФОРМАТОР «РЕКТИМАТ»

Фототрансформатор «Ректимат» (Rectimat) — трансформатор второго рода *предназначенный для трансформирования плановых аэроснимков (рис. 155)* разработан фирмой Цейсса.

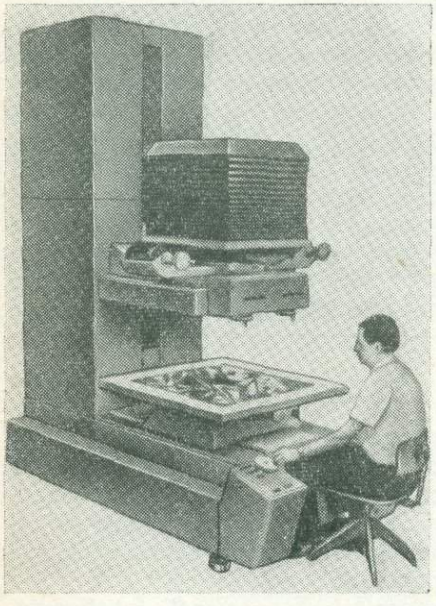


Рис. 155

Система установочных движений такая же, как у трансформатора Seg-V. Имеется масштабный лекальный инверсор. Функции перспективного инверсора выполняются электромеханическим устройством.

Изменение масштаба изображения на экране осуществляется с помощью ножного штурвала. Наклоны экрана вокруг двух осей производятся ручными штурвалами. Продольную и поперечную децентрации можно вводить вручную и автоматически, включив электромеханическое устройство.

Выравнивание аэронегатива и фотобумаги осуществляется с помощью вакуумного устройства.

Во всех ранее рассмотренных фототрансформаторах пленочный аэронегатив *помещается в кассете между двумя плоскопараллельными* стеклянными пластинами. Нижняя стеклянная пластина, расположенная между аэронегативом и объективом, порождает дисторсию изображения. Эту дисторсию нельзя учесть при расчете объектива, так как она не постоянна, а изменяется при наклоне кассеты и изменении расстояния от кассеты до объектива.

При трансформировании по ориентирующим точкам дисторсия, возникающая от нижней стеклянной пластины, не выходит за пределы точности трансформирования, а потому не имеет существенного значения. Но при трансформировании по установочным элементам, в принципе являющемся более точным, чем трансформирование по ориентирующим точкам, дисторсия изображения

от нижней стеклянной пластины недопустима. Поэтому в данном фототрансформаторе нижней стеклянной пластины в кассете нет. Аэронегатив выравнивается в плоскость с помощью вакуумного устройства путем присоса к верхней стеклянной пластине.

Отсчетные устройства позволяют произвести все необходимые установки при трансформировании по установочным элементам с высокой точностью.

Осветительное устройство состоит из ртутной лампы и конденсора с линзами Френеля.

Основные характеристики фототрансформатора «Ректимат»:

формат снимков	до 24×24 см
объектив «Трансформар»	$f_{об}=125$ мм; 1 : 8
коэффициент трансформирования	от 0,7 до 7,0
размер экрана	106×106 см
наклон экрана	до 9^g
поворот кассеты	0 °
продольная и поперечная децентрации	± 20 мм
вертикальное перемещение экрана	20 мм
размеры прибора	1,2×2,4×2,8 м

§ 76. ФОТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ПО ОРИЕНТИРУЮЩИМ ТОЧКАМ

1. *Расчет толщины картонной подложки, компенсирующей влияние равномерной деформации фотобумаги на результаты фототрансформирования.* При фототрансформировании необходимо предусмотреть деформацию фотобумаги. Обычно размеры фотобумаги после проявления и сушки уменьшаются. Поэтому после совмещения оптических изображений точек аэронегатива с ориентирующими точками планшетика следует увеличить масштаб изображения на экране настолько, чтобы после деформации получить трансформированный аэроснимок в заданном масштабе.

Увеличения изображения можно достигнуть следующим образом.

Перед совмещением точек под планшетик подкладывают картонную подложку определенной толщины. После совмещения точек планшетик с подложкой снимают и фотобумагу кладут на экран, что и приводит к увеличению изображения.

Рассчитаем толщину картонной подложки, полагая, что коэффициент систематической деформации фотобумаги $k_д$ известен

$$k_д = \frac{l}{l_0}, \tag{11.33}$$

где l_0 и l — соответственно отрезки на фотобумаге до и после деформации.

На рис. 156 показаны:

a — толщина картонной подложки;

t — проекция некоторого отрезка аэронегатива P на планшетик, наложенный на картон;

t_0 — проекция того же отрезка аэронегатива на экран E;

l_2 и l'_2 — расстояния по конструктивной оси от точки S объектива соответственно до экрана и планшетика.

Толщина картонной подложки должна быть подобрана так, чтобы отрезок фотобумаги размером t_0 после деформации принял требуемый размер t, т. е.

$$\frac{t}{t_0} = k_д.$$

Но из рис. 156 следует, что

$$\frac{t}{t_0} = \frac{l_2'}{l_2},$$

поэтому

$$\frac{l_2'}{l_2} = k_\partial,$$

или

$$\frac{l_2 - l_2'}{l_2} = 1 - k_\partial,$$

или

$$\frac{a}{l_2 \cos\psi} = 1 - k_\partial,$$

откуда

$$a = l_2 (1 - k_\partial) \cos\psi. \qquad (11.34)$$

Здесь l_2 — расстояние по конструктивной оси от точки S объектива до экрана, ψ — угол наклона экрана.

Полученной формулой пользуются для расчета толщины картона при трансформировании перспективных аэроснимков.

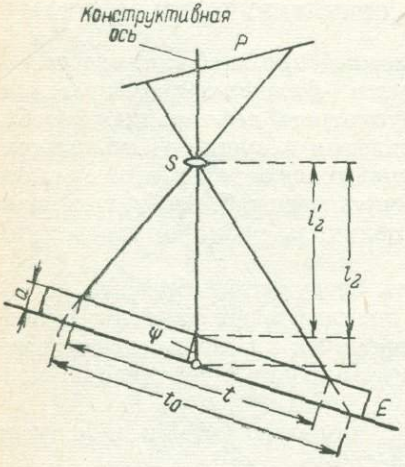


Рис. 156

При трансформировании плановых аэроснимков можно принять

$$\cos\psi = 1 \quad \text{и} \quad l_2 = f_{об}(1 + k_t^0).$$

Формула (11.34) при этом примет вид

$$a = f_{об}(1 + k_t^0)(1 - k_\partial), \qquad (11.35)$$

где

$$k_t^0 = \frac{m}{M},$$

m и M — соответственно знаменатели масштаба аэроснимка и трансформирования.

Для определения коэффициента систематической деформации данной партии фотобумаги изготовляют несколько контактных отпечатков с контрольной сеткой. На контактных отпечатках измеряют отрезки, образующие стороны квадрата и его диагонали.

Среднее значение коэффициента систематической деформации определяют по формуле

$$k_\partial = \frac{\sum l}{\sum l_0},$$

где $\Sigma\, l$ — сумма длин отрезков, измеренных на контактных отпечатках, $\Sigma\, l_0$ — сумма длин соответствующих отрезков на контрольной сетке.

Для повышения точности определения k_∂ следует измерять отрезки возможно большей длины, однако не ближе 1 см к краям отпечатка.

2. *Фототрансформирование плановых аэроснимков.* Известно, что для трансформирования аэроснимка по ориентирующим точкам необходимо иметь на аэроснимке четыре контурные точки, плановое положение которых известно. В случае необходимости (см. § 58) в плановое положение точек вводятся по-

правки за рельеф. Контурные точки выбираются примерно в углах четырехугольника, образованного прямыми, проходящими по середине продольного и поперечного перекрытий аэроснимков. При таком расположении точек смежные аэроснимки будут иметь две общие точки, что удобно для работы (уменьшается число всех ориентирующих точек).

Техника фототрансформирования по ориентирующим точкам зависит от конструкции фототрансформатора. Если децентрации вводятся вручную (ФТБ, ФТМ), то нет необходимости аэронегатив тщательно центрировать в кассете. После установки аэронегатива в кассете, перемещая кассету, совмещают изображение главной точки с центром экрана, т. е. в начале работы устанавливают нулевую децентрацию.

Экран приводят примерно в горизонтальное положение. Кладут на него картонную подложку требуемой толщины, а на картон помещают планшетик с ориентирующими точками, прижимая его к картону покровным стеклом.

Затем приступают к совмещению оптических изображений четырех контурных точек аэронегатива с соответствующими точками планшетика. При этом используются установочные движения фототрансформатора. В ФТБ — масштабное движение, наклон экрана, поворот кассеты, децентрации. В ФТМ — масштабное движение, наклоны экрана вокруг двух осей, децентрации. Конечно, планшетик во время работы приходится перемещать по экрану.

Чтобы быстрее достигнуть цели, применяется та или другая методика работы [16].

Заметим, что трансформирование по четырем точкам еще не гарантирует правильности трансформации, если децентрации вводятся самим оператором. Чрезмерное использование децентраций и наклонов экрана позволяет зачастую достигнуть совмещения точек при наличии ошибок в их положении на планшетике или неточного прокола контурных точек на аэронегативе.

Поэтому при трансформировании на фототрансформаторах ФТБ и ФТМ желательно иметь пятую контрольную точку. Совмещение оптических изображений пяти * контурных точек аэронегатива с ориентирующими точками планшетика будет свидетельствовать о правильности трансформации.

После совмещения точек объектив диафрагмируют и закрывают красным, или, оранжевым, светофильтром. Планшетик и картонную подложку убирают. на экран кладут фотобумагу и прижимают ее к экрану покровным стеклом, Далее следует экспонирование и проявление.

При этом принимаются меры для хорошей проработки фотоизображения в пределах той площади, которая будет использована при монтаже фотоплана, и получения всех отпечатков в одном тоне.

Отметим особенности трансформирования аэроснимков по ориентирующим точкам на фототрансформаторах, в которых децентрации вводятся автоматически (Seg-V, E-4, «Ректимат»).

В этом случае необходима тщательная центрировка аэронегатива в кассете. Для совмещения точек используются масштабное движение и наклоны экрана. При этом совмещение четырех точек будет достигнуто только при наличии правильной основы и правильного прокола контурных точек на аэронегативе. Таким образом, необходимость в пятой точке в данном случае отпадает.

Заметим, что автоматическое введение децентраций не применимо при аффинном трансформировании (см. § 79), когда формула децентрации принимает

---

* Контрольная пятая точка не должна находиться на пересечении диагоналей четырехугольника, вершины которого — ориентирующие точки.

особый вид, отличающийся от (11.31). В этом случае децентрации вводятся самим оператором.

3. *Фототрансформирование перспективных аэроснимков по ориентирующим точкам.* Фототрансформирование перспективных аэроснимков с значительными углами наклона возможно на большом фототрансформаторе.

Методика работы отличается от трансформирования плановых аэроснимков тем, что по заданным значениям элементов внешнего ориентирования α_0 и H предварительно рассчитывают по формулам (11.10) и (11.14) угол наклона φ_E и продольную децентрацию δ. Эти величины устанавливаются на соответствующих шкалах прибора. Кассету поворачивают так, чтобы проекция главной вертикали * аэронегатива была примерно перпендикулярна оси вращения экрана после чего переходят к совмещению точек.

§ 77. ФОТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ПО УСТАНОВОЧНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ

Установочными элементами называются угловые и линейные величины, определяющие такое взаимное положение плоскости негатива P, объектива S и экрана E, а также положение кассеты с аэронегативом в плоскости P, при котором выполняются геометрические и оптические условия фототрансформирования.

Из рассмотренных фототрансформаторов для трансформирования по установочным элементам могут быть использованы фототрансформаторы «Ректимат», Seg-V, E-4. Все эти приборы имеют шкалы для точной установки вычисленных элементов трансформирования.

При автоматическом введении децентрации установочными элементами являются: углы наклона экрана φ_{E_x}, φ_{E_y} и коэффициент трансформирования k_t.

Учитывая, что указанные фототрансформаторы предназначены для трансформирования плановых аэроснимков, можно принять

$$\left.\begin{aligned} \varphi_{E_x} &= \frac{f_{об}}{f}\,\alpha \\ \varphi_{E_y} &= \frac{f_{об}}{f}\,\omega \end{aligned}\right\}, \tag{11.36}$$

где α и ω — продольный и поперечный углы наклона аэроснимка (см. § 44).

Коэффициент трансформирования k_t вычисляется по направлению конструктивной оси прибора.

Очевидно,

$$k_t = \frac{\operatorname{tg}\varphi_E}{\operatorname{tg}\varphi_P}.$$

Преобразуем эту формулу, имея в виду малость углов φ_E и φ_P.

Запишем

$$k_t = \frac{\sin\varphi_E}{\sin\varphi_P}\,\frac{\cos\varphi_P}{\sin\varphi_E},$$

---

* Главную вертикаль на перспективном аэроснимке (аэронегативе) можно определить несколькими способами: по заданному значению угла $\varkappa$, по изображению вертикальных линий и др.

или

$$k_t = \frac{\varphi_E}{\varphi_P} \frac{1 - \frac{\varphi_P^2}{2}}{1 - \frac{\varphi_E^2}{2}},$$

или

$$k_t = \frac{\varphi_E}{\varphi_P}\left(1 - \frac{\varphi_P^2}{2} + \frac{\varphi_E^2}{2}\right).$$

Но, согласно (11.09) и (11.10),

$$\varphi_P = \frac{\varphi_E}{k_t^0}.$$

Поэтому

$$k_t k = {}^0_t + \frac{\varphi_E^2}{2}\left(k_t^0 - \frac{1}{k_t^0}\right), \tag{11.37}$$

где

$$k_t^0 = \frac{H}{fM}, \quad \varphi_E = \sqrt{\varphi_{E_x}^2 + \varphi_{E_y}^2}.$$

При трансформировании по установочным элементам аэронегатив устанавливают в кассете по координатным меткам. На соответствующих шкалах устанавливают значения тангенсов углов φ_{E_x} и φ_{E_y}, вычисленных по формуле (11.36), и коэффициент трансформирования, вычисленный по формуле (11.37).

Точность фототрансформирования по установочным элементам существенно зависит от точности, с которой известны элементы внешнего ориентирования.

В настоящее время наиболее точно они определяются в результате аналитической пространственной фототриангуляции.

Заметим, что для высокоточного фототрансформирования наиболее пригоден фототрансформатор «Ректимат», в котором выравнивание аэронегатива осуществляется вакуумным способом, а потому отсутствует прижимное стекло кассеты.

При фототрансформировании по установочным элементам требуется весьма тщательная юстировка инверсоров и определение мест нулей шкал. Нужно иметь в виду, что погрешности работы инверсоров могут вызвать недопустимое искажение трансформированного изображения, не повлияв практически на резкость изображения. При фототрансформировании по ориентирующим точкам эти искажения компенсируются изменением установок, при фототрансформировании по установочным элементам их учесть нельзя.

§ 78. ФОТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ПО ЗОНАМ

Если смещения точек, обусловленные рельефом местности, на трансформированном аэроснимке будут превышать допустимую величину, то их можно уменьшить, трансформируя аэроснимок по зонам.

Рассмотрим сущность этого способа трансформирования.

Пусть кроме аэронегатива имеем карту или контактный отпечаток, на котором рельеф изображен горизонталями. Рассчитаем по формуле (11.3) предельные превышения $h_{\text{пред}}$, для которых смещения точек, обусловленные рельефом при трансформировании, не превышают допустимой величины.

Произведем многократное трансформирование аэроснимка так, чтобы при первом трансформировании в заданном масштабе $1/M$ изобразились контуры, расположенные на местности в горизонтальной плоскости, с отметкой $A_1 = A^*_{\min} + h_{\text{пред}}$, при втором трансформировании — контуры, расположенные на местности в горизонтальной плоскости, с отметкой $A_2 = A_1 + 2h_{\text{пред}}$, при третьем трансформировании — контуры, расположенные на местности в горизонтальной плоскости, с отметкой $A_3 = A_2 + 2h_{\text{пред}}$ и т. д.

Очевидно, что в результате первого трансформирования данного аэроснимка в качестве плана можно использовать зону, ограниченную горизонталями с отметками **

$$A_1 - h_{\text{пред}} \quad \text{и} \quad A_1 + h_{\text{пред}}.$$

В результате второго трансформирования того же аэроснимка в качестве плана можно использовать зону, ограниченную горизонталями с отметками

$$A_2 - h_{\text{пред}} \quad \text{и} \quad A_2 + h_{\text{пред}}.$$

В результате третьего трансформирования можно использовать зону, ограниченную горизонталями с отметками

$$A_3 - h_{\text{пред}} \text{ и } A_3 + h_{\text{пред}} \text{ и т. д.}$$

Действительно, в пределах этих зон смещения точек, обусловленные рельефом, не будут превышать допустимой величины $\delta'_{h\,\max}$.

Взаимные превышения точек местности в пределах зоны не превышают $2h_{\text{пред}}$. Эта величина определяет высоту зоны на местности. Обозначим ее через $h_{\text{зоны}}$. Учитывая (11.3), имеем:

$$h_{\text{зоны}} = 2\frac{fM}{r}\delta'_{h\,\max}. \tag{11.38}$$

При фототрансформировании аэроснимка по зонам получают столько отпечатков, сколько зон было выделено на аэроснимке.

Если смонтировать все эти трансформированные отпечатки [16], оставив на каждом только нужную зону, то получим мозаичный трансформированный аэроснимок, у которого смещения точек, обусловленные рельефом, не будут превышать допустимой величины $\delta'_{h\,\max}$.

Фототрансформирование по зонам производится по ориентирующим точкам. Обычно эти точки определяют для каждой зоны и на одном опорном планшетике. Превышения точек, которые необходимо знать для расчета поправок за рельеф, определяют относительно средней горизонтальной плоскости каждой зоны.

Возможен и другой способ трансформирования по зонам, при котором достаточно иметь на опорном планшетике ориентирующие точки для трансформирования только одной, обычно средней, зоны, которую принимают за начальную.

В этом случае для трансформирования последующих зон рассчитывают, насколько должна измениться проекция какого-либо отрезка аэронегатива,

---

* $A_{\min}$ — наименьшая отметка горизонтали.

** Эти горизонтали переносят на трансформированный аэроснимок с карты или контактного отпечатка.

например заключенного между координатными метками, при переходе к следующей зоне, и в соответствии с этим изменяют масштаб изображения на экране.

Пусть при трансформировании начальной зоны проекция какого-либо отрезка аэронегатива равна l', а при трансформировании смежной зоны $l' \pm \Delta l'$ (здесь знак плюс, если отметка средней горизонтальной плоскости смежной зоны меньше, знак минус, если эта отметка больше отметки средней горизонтальной плоскости начальной зоны).

Очевидно, что

$$\frac{l' \pm \Delta l'}{l'} = \frac{H_2}{H_1},$$

где H_1 и H_2 — соответственно высоты фотографирования относительно средних горизонтальных плоскостей начальной и смежной зон.

Вычитая из обеих частей равенства по единице, получаем

$$\frac{\Delta l'}{l'} = \frac{|H_2 - H_1|}{H_1},$$

но

$$|H_2 - H_1| = 2h_{\text{пред}} = h_{\text{зоны}},$$

поэтому

$$\Delta l' = l' \frac{h_{\text{зоны}}}{H_1}, \qquad (11.39)$$

По этой формуле и рассчитывается, насколько должна измениться проекция отрезка аэронегатива при трансформировании следующей зоны. Длина отрезка l' измеряется на экране после совмещения проекций соответственных точек аэронегатива с ориентирующими точками опорного планшетика.

При фототрансформировании по зонам весьма осложняется процесс монтажа фотоплана. На производстве этот способ фототрансформирования обычно применяют, если число зон не превышает трех. При бо́льшем числе используют другие способы трансформирования, например оптико-графический, фототрансформирование с применением макета обратного рельефа местности [1] и, наконец, дифференциальное фототрансформирование (см. § 133), наилучшим образом решающее задачу трансформирования с одновременным устранением смещений контурных точек, обусловленных рельефом местности.

§ 79. АФФИННОЕ ФОТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ

При изучении теории коллинеарного трансформирования имелось в виду такое геометрическое преобразование центральной проекции плоского объекта, которое позволяет получить изображение, подобное оригиналу. Условимся называть такое трансформирование нормальным.

При аффинном трансформировании изображение не подобно тому, которое получено при нормальном трансформировании, а находится в аффинном соответствии с ним. Другими словами, аффинное трансформирование вызывает однородную деформацию изображения.

Пусть, например, дана перспектива квадрата с одной или двумя точками схода. При нормальном трансформировании она преобразуется в квадрат, при аффинном трансформировании — в ромб, прямоугольник или параллелограмм.

Выясним, какие геометрические условия необходимо выполнить при аффинном трансформировании.

При этом будем исходить из геометрических условий нормального трансформирования. Введем названия «старый» и «новый» центры проекции. При старом центре проекции был получен снимок, при новом центре — ведется трансформирование.

Если не задаваться масштабом трансформирования, то геометрические условия нормального трансформирования в соответствии с § 60 можно сформулировать так:

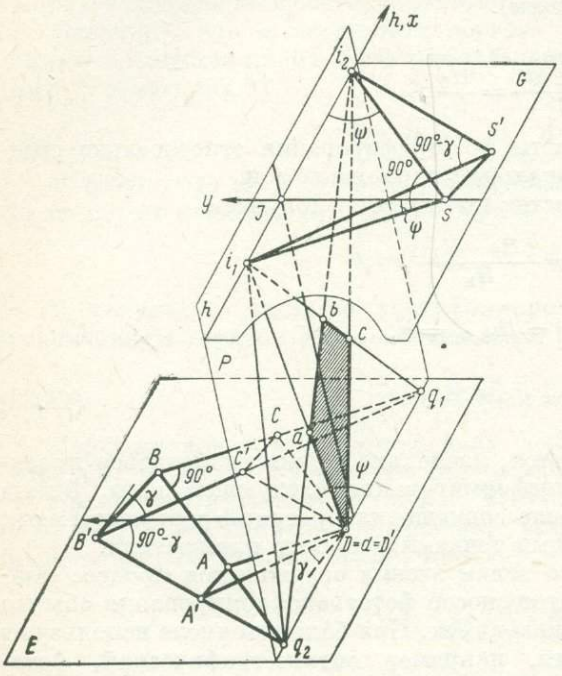


Рис. 157

1. Главная вертикаль снимка должна лежать в плоскости, проходящей через новый центр проекции перпендикулярно к экрану и плоскости снимка.

2. Линия горизонта снимка должна лежать в плоскости, проходящей через новый центр проекции параллельно экрану.

3. Расстояния от нового и старого центров проекции до линии горизонта должны быть равны между собой.

Аффинное трансформирование возникает при нарушении 1-го или 3-го условий нормального трансформирования; 2-е условие должно быть сохранено.

В самом деле, если нарушить 2-е условие, то точки схода перспектив параллельных прямых, расположенные на линии горизонта снимка, при трансформировании не будут лежать в плоскости горизонта, проходящей через новый центр проекции параллельно экрану. Поэтому проекция перспектив взаимно параллельных прямых на экране получится в виде сходящихся прямых, т. е. нарушится аффинное соответствие между полученным и нормальным трансформированными изображениями.

Выполнение 2-го условия вполне обеспечивает сохранение параллельности между прямыми на трансформированном изображении. Таким образом, это условие является единственным при аффинном трансформировании.

Рассмотрим, как влияет на трансформированное изображение нарушение 1-го и 3-го условий нормального трансформирования.

Пусть на предметной плоскости E (рис. 157) имеем квадрат $ABCD$. Для упрощения рисунка положим, что точка D лежит на линии основания. Построим перспективу квадрата в картинной плоскости P, приняв за центр проектирования точку S. При этом воспользуемся следами сторон и точками схода. Следы сторон BC и BA находятся соответственно в точках q_1 и q_2 линии основания, следы сторон AD и CD совпадают с точкой D.

Точка схода перспектив сторон DA и CB находится на линии горизонта в точке i_1, а точка схода перспектив сторон AB и DC — в точке i_2.

$$Si_1 \parallel DA \quad \text{и} \quad Si_2 \parallel AB.$$

Соединив точку схода i_1 прямыми со следами q_1 и D и точку схода i_2 со следами q_2 и D, в пересечении прямых получим перспективу квадрата $abcd$ (точка d совпадает с D).

Воспользуемся новым центром проектирования S', лежащим на плоскости горизонта G, и спроектируем обратно перспективу квадрата на предметную плоскость. Другими словами, произведем трансформирование, нарушив 1-е и 3-е условия нормального трансформирования.

Сделаем следующие построения: через следы q_1 и D проведем прямые, параллельные $S'i_1$, и через следы q_2 и D — прямые, параллельные $S'i_2$. В пересечении этих прямых в общем случае получаем параллелограмм $A'B'C'D'$ (точки D' и D совпадают).

Как видим, произошло аффинное преобразование нормального трансформированного изображения.

Из построений следует, что прямые, соединяющие соответственные точки квадрата и параллелограмма, например AA', BB', CC', параллельны SS'. Учитывая, кроме того, что соответственные стороны этих фигур пересекаются на линии основания, приходим к выводу, что в данном аффинном преобразовании о с ь ю р о д с т в а является линия основания, а н а п р а в л е н и е р о д с т в а параллельно линии перемещения центра проекции.

С изменением положения нового центра проекции на плоскости горизонта будет изменяться и форма параллелограмма, в который преобразуется перспектива квадрата.

Форму параллелограмма будем характеризовать двумя величинами: углом отклонения боковых сторон от нормали к основанию γ и отношением высоты к основанию n (рис. 158).

$$n = \frac{h}{a}.$$

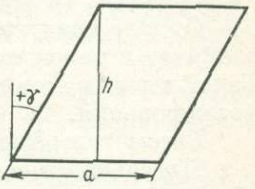


Рис. 158

Условимся за основание параллелограмма принимать сторону, соответствующую стороне квадрата, расположенной под острым углом ψ к линии основания (отсчитывается от линии основания против хода часовой стрелки).

Угол γ будем считать положительным при отклонении боковых сторон параллелограмма вправо от нормали к его основанию и отрицательным — при отклонении боковых сторон влево.

На рис. 157 основанием параллелограмма служит сторона $D'C'$, угол γ положительный.

Положение нового центра проекции S' на плоскости горизонта будем определять в прямоугольной системе координат, приняв за начало главную точку схода I, за ось x — линию горизонта, за ось y — прямую, проходящую через SI. Положительные направления координатных осей показаны на рис. 157 стрелками.

Координаты x, y нового центра проекции S' зависят от величин f', n, γ и ψ и определяются по формулам

$$\left.\begin{aligned} x &= f' \frac{\frac{1}{2}\sin 2\psi\left(\frac{n^2}{\cos^2\gamma}-1\right)-n\,\mathrm{tg}\,\gamma\cos 2\psi}{1-n\sin 2\psi\,\mathrm{tg}\,\gamma+\sin^2\psi\left(\frac{n^2}{\cos^2\gamma}-1\right)} \\ y &= -f' \frac{n}{1-n\sin 2\psi\,\mathrm{tg}\,\gamma+\sin^2\psi\left(\frac{n^2}{\cos^2\gamma}-1\right)} \end{aligned}\right\}. \qquad (11.40)$$

Вывод этих формул дан в [3]. Напомним, что ψ — угол, определяющий ориентировку квадрата на предметной плоскости; f' — расстояние от линии горизонта до центра проекции, при котором получена перспектива квадрата; n и γ — величины, характеризующие форму параллелограмма.

Если рассматривать параллелограмм как деформированное изображение перспективы квадрата, то n будет определять линейную деформацию, т. е. растяжение ($n > 1$) или сжатие ($n < 1$) трансформированного изображения; γ — угловую деформацию, т. е. скос прямого угла (угол сдвига); ψ — можно рассматривать как угол, определяющий направление растяжения или сжатия правильного трансформированного изображения. Он отсчитывается от проекции главной вертикали против хода часовой стрелки.

При $\psi = 0$, т. е. когда направление сжатия или растяжения совпадает с проекцией главной вертикали, формулы принимают вид

$$\left.\begin{aligned} x &= -nf' \operatorname{tg} \gamma \\ y &= -nf' \end{aligned}\right\}. \tag{11.41}$$

Исходя из формул (11.40), можно определить координаты центра проекции, при котором трансформированное изображение не деформировано.

Положив $\gamma = 0$ и $n = 1$, находим

$$x = 0, \quad y = -f'.$$

Отсюда следует, что при правильном трансформировании центр проекции занимает в плоскости горизонта такое же положение, какое было при съемке. Такой вывод находится в согласии с 1-ым и 3-им условиями правильного трансформирования.

Рассмотрим еще некоторые частные случаи аффинного трансформирования.

Преобразование перспективы квадрата в ромб. В формулах (11.40) через n обозначено отношение h/a (см. рис. 158). В ромбе $h = a \cos \gamma$, следовательно, $n = \cos \gamma$. Подставляя это значение n в формулы, получаем

$$\left.\begin{aligned} x &= -f' \frac{\sin \gamma \cos 2\psi}{1 - \sin 2\psi \sin \gamma} \\ y &= -f' \frac{\cos \gamma}{1 - \sin 2\psi \sin \gamma} \end{aligned}\right\}. \tag{11.42}$$

Преобразование перспективы квадрата в прямоугольник. В этом случае в формулах (11.40) следует положить $\gamma = 0$, тогда

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} f' \frac{\sin 2\psi\,(n^2 - 1)}{1 + \sin^2 \psi\,(n^2 - 1)} \\ y &= -f' \frac{n}{1 + \sin^2 \psi\,(n^2 - 1)} \end{aligned}\right\}. \tag{11.43}$$

Применяя метод аффинного трансформирования, можно по деформированному перспективному изображению получить неискаженное трансформированное изображение. Для этого плоскость P (см. рис. 157) следует принять за предметную плоскость, а плоскость E — за картинную плоскость. Квадрат $ABCD$ на плоскости E будем рассматривать как контур недеформированного перспективного изображения, а параллелограмм $A'B'C'D'$ — как контур деформированного перспективного изображения.

При трансформировании квадрата на плоскость P из точки S получаем фигуру $abcd$. Та же фигура будет получена при трансформировании параллелограмма из точки S'.

Таким образом, изменяя положение центра проектирования на плоскости G, можно по деформированному трансформированному изображению получить неискаженное трансформированное изображение.

Плоскость G в данном случае будет являться плоскостью картинного горизонта, а линия hh — линией картинного горизонта.

Итак, метод аффинного трансформирования позволяет решить две задачи:

1) по недеформированному перспективному изображению плоской фигуры путем трансформирования получить деформированное изображение оригинала;

2) по деформированному перспективному изображению плоской фигуры путем трансформирования получить недеформированное изображение оригинала.

Назовем первую задачу прямой и вторую обратной.

При решении прямой задачи изменяется положение центра проекции на плоскости горизонта, при решении обратной задачи изменяется положение центра проекции на плоскости картинного горизонта.

Пусть прямая и обратная задача решаются путем трансформирования с сохранением угла α_0 аэроснимка.

Тогда при решении прямой задачи с изменением положения центра проекции на плоскости горизонта изменяется в общем случае величина главного расстояния f и возникает децентрация — главная точка аэроснимка будет смещена относительно основания перпендикуляра, опущенного из центра проекции на картинную плоскость. Высота центра проекции относительно экрана не изменится.

При решении обратной задачи с изменением положения центра проекции на плоскости картинного горизонта главное расстояние f не изменяется, но децентрация возникает и изменяется высота центра проекции.

Метод аффинного трансформирования расширяет возможности трансформирования. Его можно использовать для аффинного преобразования сеток, плоских фигур и т. д. В фотограмметрии путем аффинного трансформирования аэроснимка можно:

а) по аэроснимку плоской наклонной местности получить изображение, подобное ортогональной проекции [3];

б) при наличии систематической деформации аэронегатива получить неискаженное трансформированное изображение (см. § 80);

в) определить условия, при которых практически возможно трансформирование без введения децентрации [3].

§ 80. ФОТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО АЭРОСНИМКА

На рис. 159 $abcd$ контур квадрата на недеформированном аэроснимке ориентированного по главной вертикали Iv. hh — линия горизонта, tt — горизонталь, масштаб по которой равен масштабу трансформирования $1/M$.

Покажем положение этих элементов после деформации аэроснимка. Обозначим линейную деформацию по направлению, перпендикулярному к линии горизонта, через n и угловую деформацию через γ (по направлению, параллельному линии горизонта, будем считать, что деформации нет.)

Пусть $n > 1$ и $\gamma \neq 0$, тогда квадрат деформируется в параллелограмм $a'b'c'd'$, вытянутый по направлению главной вертикали. Линия горизонта и горизонталь с заданным масштабом займут положение $h'h'$ и $t't'$, а главная вертикаль — $I'v'$.

Продолжим главную вертикаль Iv недеформированного аэроснимка до пересечения с линиями $h'h'$ и $t't'$ и обозначим полученные точки через I'' и v''.

Заметим, что

$$\angle\, IoI' = \gamma,\quad oI'' = oI \cdot n,\quad \text{но}\quad oI = f \operatorname{ctg} \alpha_0,$$

поэтому

$$\left.\begin{aligned} oI'' &= nf \operatorname{ctg} \alpha_0 \\ ov'' &= ov \cdot n \\ I''v'' &= Iv \cdot n,\quad \text{но}\quad Iv = \frac{H}{M \sin \alpha_0} \end{aligned}\right\}, \tag{а}$$

а

$$I''v'' = n \frac{H}{M \sin \alpha_0}. \tag{б}$$

Примем S_0 за совмещенное положение центра проекции с картинной плоскостью до деформации картинной плоскости. Определим, каково должно быть совмещенное положение центра проекции S_0' с деформированной картинной плоскостью при условии, чтобы трансформированное изображение было правильным.

Очевидно, точка S_0' должна находиться на прямой, проходящей через точку I', перпендикулярной к линии $h'h'$; только в этом случае проекция $I'v'$ на плоскость трансформации будет перпендикулярна к линии основания $t't'$. Расстояние от точки S_0' до линии горизонта $h'h'$ должно быть равно S_0I, так как углы при точках S_0 и S_0', образованные лучами, идущими к одноименным

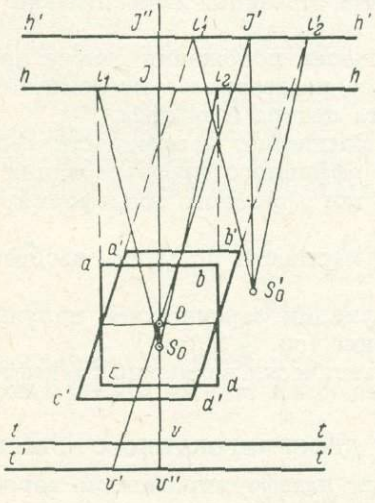


Рис. 159

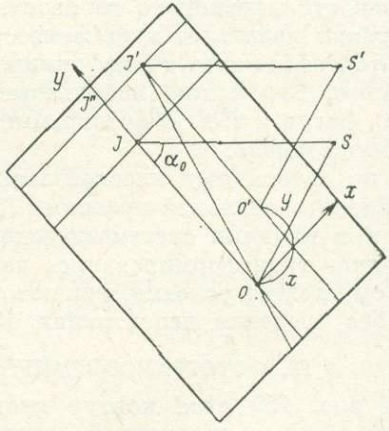


Рис. 160

точкам схода линий hh и $h'h'$, должны быть равны. Например, $\angle\, IS_0i_1 = \angle\, I'S_0'i'_1$.

Пусть трансформирование деформированного аэроснимка производится при том же угле α_0, который был при съемке.

Определим положение центра проекции S' относительно плоскости аэроснимка (рис. 160). Примем главную точку o за начало координат, главную вертикаль — за ось y, горизонталь, проходящую через точку o, — за ось x.

Опустим из точки S' перпендикуляр $S'o'$ на картинную плоскость.

Очевидно, $S'o' = f$.

Координаты x и y точки o' будут равны

$$x = ol'' \operatorname{tg} \gamma;$$

$$y = ol'' - oI,$$

или, учитывая (а),

$$\left.\begin{aligned} x &= nf \operatorname{ctg} \alpha_0 \operatorname{tg} \gamma \\ y &= f(n-1) \operatorname{ctg} \alpha_0 \end{aligned}\right\}. \tag{11.44}$$

Высота центра проекции

$$S'n' = I''v'' \sin \alpha_0$$

или, учитывая (в),

$$S'n' = \frac{H}{M} n. \tag{11.45}$$

В заключение сравним условия трансформирования недеформированного и деформированного аэроснимков, полагая, что трансформирование ведется при том же угле α_0, который был при съемке.

В обоих случаях центр проекции должен находиться на расстоянии f от плоскости аэроснимка. При трансформировании недеформированного аэроснимка основание перпендикуляра, опущенного из центра проекции, совпадает с главной точкой аэроснимка, при трансформировании деформированного аэроснимка — смещено относительно главной точки на величины x и y, определяемые формулами (11.44).

Высота центра проекции в первом случае равна H/M, во втором случае — nH/M.

Эти выводы полностью согласуются с теми, которые были сделаны при рассмотрении обратной задачи, решаемой методом аффинного трансформирования (см. § 79).

При выводе формул (11.44) предполагалось, что линейная деформация имеет место только по направлению, перпендикулярному к горизонталям. В действительности она будет как по направлению, перпендикулярному к горизонталям, так и по направлению, параллельному горизонталям.

Обозначим коэффициенты этих деформаций соответственно через k_y и k_x. Тогда $n = k_y - k_x$. При этом для устранения влияния деформации k_x на результаты трансформирования достаточно в формулы (11.44) вместо f подставить значение fk_x.

§ 81. ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ФОТОТРАНСФОРМИРОВАНИЯ

Кроме дисторсии объектива фототрансформатора, вызывающей искажение трансформированного изображения, искажения возникают также вследствие преломления световых лучей в прижимном стекле кассеты, несовершенного выравнивания аэронегатива и фотобумаги в плоскость, деформации аэронегатива и фотобумаги.

1. Искажение изображения, вносимое прижимным стеклом кассеты, можно полностью или частично компенсировать при помощи покровного стекла, которым прижимается фотобумага к экрану. Полное устранение искажений возможно при горизонтальном положении экрана, частичное устранение искажений, т. е. уменьшение их, — при наклонном положении экрана.

Рассчитаем толщину покровного стекла, при которой полностью устраняются искажения, вносимые прижимным стеклом кассеты.

На рис. 161 показано:

P — верхняя поверхность прижимной стеклянной пластины кассеты, к которой прижимается эмульсионный слой аэронегатива;

a' — центральная проекция точки a аэронегатива на экране;

a'' — оптическое изображение точки a аэронегатива.

Отрезок $a'a''$ представляет собой смещение оптического изображения точки вследствие влияния прижимного стекла кассеты.

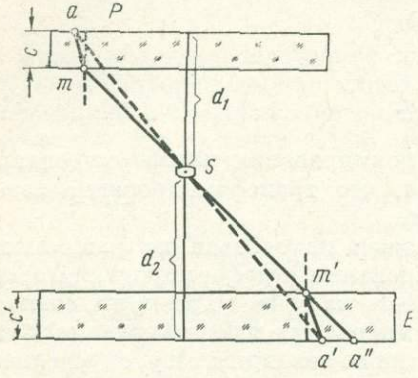


Рис. 161

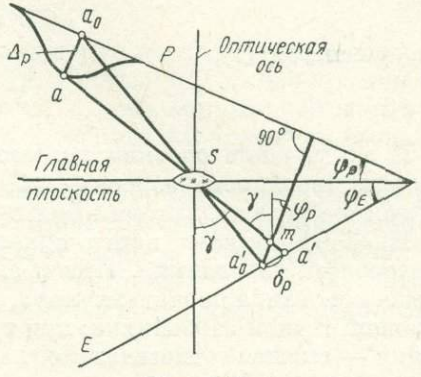


Рис. 162

Чтобы совместить оптическое изображение точки с ее центральной проекцией, *поместим на экране* E *стеклянную пластину определенной толщины*. Для определения положения верхней поверхности этой пластины проведем *из точки* a' *прямую, параллельную отрезку* am, *до пересечения с лучом* Sa'' и из полученной точки m' — прямую, параллельную экрану. Очевидно, что эта прямая и определит положение верхней поверхности покровного стекла экрана, показатель преломления которого равен показателю преломления прижимного стекла кассеты.

Теперь световой луч, идущий от точки a аэронегатива через точку S к экрану, представляет ломаную линию $amm'a'$ и, следовательно, оптическое изображение точки a совпадает с центральной проекцией a'.

Обозначим толщину покровного стекла экрана через c', а толщину прижимного стекла кассеты через c.

Имеем:

$$\frac{c'}{c} = \frac{d_2}{d_1} = k_t,$$

откуда

$$c' = ck_t. \tag{11.46}$$

По этой формуле и определяется толщина покровного стекла экрана компенсирующего искажения, вносимые прижимным стеклом кассеты.

Полученная формула применима и при трансформировании плановых аэроснимков. Но в этом случае искажения, вносимые прижимным стеклом кассеты, полностью не погашаются покровным стеклом экрана из-за его наклона. Искажения лишь уменьшаются настолько, что ими можно пренебречь при трансформировании по ориентирующим точкам.

Из формулы (11.46) следует, что при коэффициенте трансформирования $k_t = 1$ нужно применять покровное стекло для прижима фотобумаги к экрану той же толщины, что и прижимное стекло кассеты, конечно, при условии, что показатели преломления стекол одинаковы.

2. Несовершенное выравнивание аэронегатива влечет за собой смещение изображений тех контурных точек, которые уклоняются от плоскости P (рис. 162). Рассмотрим точку a_0. Проекция этой точки на экране E находится в точке a_0'. Допустим, что в области точки a_0 аэронегатив не прижат к плоскости P, и точка a_0 заняла положение a. Проекция этой точки находится в точке a'.

Отрезок $a'a_0'$ представляет смещение изображения точки аэронегатива вследствие того, что аэронегатив в области данной точки не прижат к плоскости P.

Введем обозначения $\delta_P = a'a_0'$, $\Delta_P = aa_0$ и примем, что отрезок Δ_P перпендикулярен к плоскости P.

Опустим из точки a_0' перпендикуляр на плоскость P, пересекающий луч Sa' в точке m.

Рассмотрим треугольник $ma_0'a'$. Нетрудно видеть, что

$$\angle\, a_0'ma' = \gamma + \varphi_P;$$

$$\angle\, ma'a_0' = 90 - \gamma + \varphi_E,$$

где γ — угол между проектирующим лучом и оптической осью объектива.

По теореме синусов находим

$$\delta_P = \frac{\sin(\gamma+\varphi_P)}{\cos(\gamma-\varphi_E)}\, a_0'm,$$

но

$$a_0'm = \frac{Sa_0'}{Sa_0}\Delta_P.$$

Отношение $\frac{Sa_0'}{Sa_0}$ представляет коэффициент трансформирования k_t для горизонтали, проходящей через точку a_0.

Поэтому

$$\delta_P = \frac{\sin(\gamma+\varphi_P)}{\cos(\gamma-\varphi_E)}\, k_t\Delta_P. \tag{11.47}$$

По этой формуле и определяется смещение точки на трансформированном изображении вследствие несовершенного выравнивания аэронегатива.

При трансформировании плановых аэроснимков расчеты можно производить по упрощенной формуле, приняв $\varphi_P = \varphi_E = 0$.

Тогда

$$\delta_P = k_t\Delta_P \operatorname{tg}\gamma. \tag{11.48}$$

Определим, каково может быть местное уклонение Δ_P аэронегатива от плоскости при трансформировании плановых аэроснимков при условии, что смещение точки на трансформированном изображении не превышает допустимой величины δ_P

$$\Delta_P \leqslant \frac{\delta_P}{k_t}\operatorname{ctg}\gamma. \tag{11.49}$$

Пусть

$$\delta_P = 0{,}2 \text{ мм}, \quad k_t = 2, \quad \gamma = 25°,$$

тогда

$$\Delta_P \leqslant 0{,}21 \text{ мм}.$$

Более тщательное выравнивание аэронегативов требуется при трансформировании перспективных аэроснимков, в чем можно убедиться, произведя расчеты по формуле (11.47).

3. Смещение изображения точки вследствие несовершенного выравнивания фотобумаги показано на рис. 163.

Здесь a_0' — истинное положение на экране E проекции точки a аэронегатива; a' — изображение той же точки аэронегатива на фотобумаге, имеющей местное неприлегание к плоской поверхности экрана.

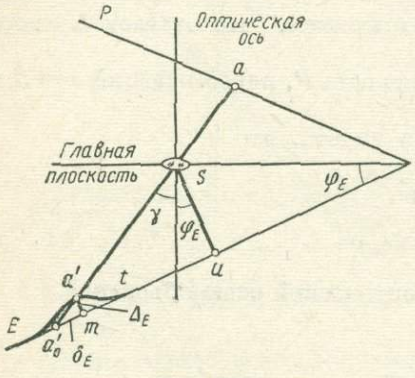


Рис. 163

Примем по малости перпендикуляра $a'm$ расстояние на фотобумаге ta' равным отрезку tm; тогда отрезок $a_0'm$ можно рассматривать как смещение изображения точки на экране, обусловленное погрешностью выравнивания фотобумаги.

Введем *обозначения:*

$$\delta_E = a_0'm;$$

$$\Delta_E = a'm.$$

Из треугольника $a'a_0'm$ находим

$$\delta_E = \Delta_E \operatorname{tg} \angle\, a_0'a'm.$$

Для определения угла, входящего в это равенство, опустим из точки S перпендикуляр Su на плоскость экрана, составляющий с оптической осью угол φ_E. Угол *между проектирующим лучом* Sa_0' *и оптической осью обозначим* буквой γ.

Очевидно, что

$$\angle\, a_0'a'm = \gamma + \varphi_E.$$

Таким образом,

$$\delta_E = \Delta_E \operatorname{tg}(\gamma + \varphi_E). \tag{11.50}$$

Применительно к трансформированию плановых аэроснимков подсчеты δ можно производить по упрощенной формуле, положив $\varphi_E = 0$. Тогда

$$\delta_E = \Delta_E \operatorname{tg} \gamma. \tag{11.51}$$

Если задаться допустимой величиной δ_E, то можно подсчитать, с какой точностью следует выравнивать фотобумагу.

Очевидно, что

$$\Delta_E \leqslant \delta_E \operatorname{ctg} \gamma. \tag{11.52}$$

Пусть

$$\gamma = 25°, \quad \delta_E \leqslant 0{,}2 \text{ мм},$$

тогда

$$\Delta_E \leqslant 0{,}42 \text{ мм}.$$

Такова при данных условиях необходимая точность выравнивания фотобумаги при трансформировании плановых аэроснимков.

Как видим, требования к точности выравнивания фотобумаги менее строгие, чем для аэропленки.

4. Равномерная деформация аэропленки не искажает изображения на аэронегативе (не нарушает подобия изображения), а потому не влияет на результаты трансформирования по ориентирующим точкам.

Неравномерная деформация аэропленки хотя и искажает изображение на аэронегативе, однако эти искажения при трансформировании можно нейтрализовать. Этот случай был особо рассмотрен в § 80. Таким образом, при трансформировании по ориентирующим точкам наличие неравномерной деформации аэронегатива не препятствует совмещению ориентирующих точек основы с изображениями соответственных точек аэронегатива, что и гарантирует правильность трансформированного изображения.

5. Равномерная деформация фотобумаги приводит к изменению масштаба трансформированного аэроснимка. Как известно, при трансформировании ее влияние в нашей практике учитывается при помощи картонной подложки, толщина которой рассчитывается в соответствии с коэффициентом k_∂ равномерной деформации фотобумаги.

k_∂ принимают равным среднему арифметическому из коэффициентов продольной и поперечной деформации фотобумаги

$$k_\partial = \frac{1}{2}(k_x + k_y).$$

Неравномерная деформация фотобумаги вызывает искажение трансформированного изображения.

Искажение отрезка L на трансформированном изображении вследствие неравномерной деформации

$$\Delta L = L\frac{k_x - k_y}{2},$$

но

$$L = lk_t,$$

где l — длина отрезка на аэронегативе.

Поэтому

$$\Delta L = lk_t\frac{k_x - k_y}{2}.$$

По этой формуле и определяется искажение отрезка на трансформированном изображении вследствие неравномерной деформации фотобумаги.

Определим максимальное значение коэффициента трансформирования при условии, что искажение отрезка ΔL не превышает допустимой величины δ.

Из предшествующего равенства находим

$$k_{t\,\max} \leqslant \frac{2\delta}{l\,(k_x - k_y)}. \qquad (11.53)$$

Известно, что неравномерная деформация фотобумаги значительно больше неравномерной деформации аэропленки. Для некоторых сортов фотобумаги $k_x - k_y = 2 \cdot 10^{-3}$. Подсчитаем для этого случая $k_{t\,\max}$, приняв $\delta = 0{,}2$ мм и $l = 100$ мм.

Подставляя эти значения в формулу (11.53), получаем

$$k_{t\,\max} \leqslant 2.$$

Если расчеты показывают, что неравномерная деформация фотобумаги приводит к недопустимым искажениям, то принимают меры к уменьшению неравномерной деформации. Это можно сделать, наклеив неэкспонированную фотобумагу водоупорным клеем на стеклянную пластинку. Имеется также практически недеформирующаяся фотобумага с металлической прослойкой в подложке.

Формула (11.53) применима при трансформировании плановых и перспективных аэроснимков. В последнем случае $k_{t\,\max}$ относится к горизонтали, имеющей наименьший масштаб.

§ 82. ФОТОПЛАНЫ

Фотоплан — фотографическое изображение местности, по точности удовлетворяющее требованиям плана.

Фотопланы обычно монтируют из трансформированных аэроснимков по ориентирующим точкам. Однако, если при аэрофотосъемке применялась гиростабилизация аэрофотоаппарата и углы наклона α_0 аэроснимков не превышают допустимой величины, то трансформирование заменяется простым приведением аэроснимков к заданному масштабу $1/M$. Определим, при каких углах наклона аэроснимков это возможно.

Воспользуемся формулой максимального смещения контурной точки вследствие угла наклона аэроснимка (§ 51), которую перепишем в следующем виде:

$$\delta_{\alpha\,\max} = \frac{r^2_{\max}}{f}\,\frac{\alpha_0}{\rho}.$$

После приведения аэроснимка к заданному масштабу, т. е. увеличения в k раз, соответственно изменится в k раз величина смещения.

Потребуем, чтобы $\delta_{\alpha\,\max} k \leqslant 0{,}3$ мм, что примерно соответствует точности трансформирования. Тогда

$$\alpha_0 \leqslant \rho\,\frac{0{,}3f}{kr^2_{\max}}.$$

Пусть, например, $f = 100$ мм, масштаб аэроснимка 1/20 000, масштаб плана $1/M = 1/10\,000$, т. е. $k = 2$; примем $r_{max} = 70$ мм, $\rho' = 3438'$, тогда $\alpha_0 \leqslant 10'$.

Таково при заданных условиях значение предельного угла наклона аэроснимков, когда возможен монтаж фотоплана из аэроснимков, приведенных к одному масштабу, без трансформирования.

Заметим, что для приведения аэроснимков к одному масштабу необходимо либо знать высоту фотографирования, либо иметь по крайней мере по две ориентирующие точки на аэроснимок. Если при этом приведение к одному масштабу потребуется осуществлять по зонам, то, кроме того, нужно иметь карту или контактные отпечатки с зарисованными горизонталями. Целесообразно в качестве ориентирующих использовать контурные точки, расположенные вблизи главных точек аэроснимков. Тогда при 60-процентном перекрытии каждый аэроснимок будет обеспечен не двумя, а тремя точками (одна контрольная), расположенными по осевой линии маршрута. Плановое положение этих точек определяется по способу фототриангуляции или другими способами. При наличии ориентирующих точек монтаж аэроснимков, приведенных к одному масштабу, ведется так же, как и монтаж трансформированных аэроснимков. Если же приведение аэроснимков к одному масштабу осуществлялось

по высоте фотографирования, а геодезические и ориентирующие точки отсутствуют, то монтаж аэроснимков осуществляется по начальным направлениям. Конечно, точность такого фотоплана будет снижена за счет ошибок монтажа, накапливающихся в процессе этой работы. Фотопланы, не привязанные к геодезической основе, принято называть неориентированными фотопланами.

Основные источники ошибок фотоплана: погрешность трансформирования (или приведения к заданному масштабу, если трансформирования не требовалось), влияние рельефа местности, погрешности монтирования и погрешности в положении ориентирующих точек на основе.

Для оценки точности фотоплана в камеральных условиях можно использовать величины смещений δ_1 контурных точек (ориентирующих и опознаков) относительно соответственных точек основы, величины расхождений δ_2 одноименных контурных точек на стыковых линиях аэроснимков данного фотоплана и величины расхождений δ_3 одноименных контурных точек по рамке трапеции для смежных фотопланов.

В наставлении по топографической съемке [31] установлены допуски: $\delta_1 \leqslant 0{,}5$ мм, $\delta_2 \leqslant 0{,}7$ мм, $\delta_3 \leqslant 1$ мм.

Величина допуска δ_1 рассчитана с учетом точности трансформирования по ориентирующим точкам, влияния неравномерной деформации фотобумаги, влияния рельефа и погрешности монтажа данного аэроснимка.

Допуск δ_2 принят равным $\delta_1 \sqrt{2}$, учитывая, что расхождения в контурах на стыковых линиях порождаются ошибками на двух смежных снимках, которые принимаются за независимые.

Допуск δ_3 принят равным $\delta_2 \sqrt{2}$. При трансформировании по зонам допуски увеличиваются в 1,5 раза.

По величинам δ можно определить среднюю квадратическую ошибку m в положении контурной точки относительно ближайших точек основы.

При определении значения m по величинам δ_1 применяют формулу

$$m = \sqrt{\frac{[\delta_1^2]}{n}}$$

При использовании величин δ_2 и δ_3 применяют формулу для определения средней квадратической ошибки по разностям двойных измерений

$$m = \sqrt{\frac{[\delta_2^2]}{2n}} \quad \text{и} \quad m = \sqrt{\frac{[\delta_3^2]}{2n}}.$$

Техника изготовления фотопланов и оценки точности подробно изложены в [16].

§ 83. ОПТИКО-ГРАФИЧЕСКОЕ ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ

При оптико-графических способах трансформированное изображение аэроснимка закрепляется не на фотобумаге, а вычерчивается на планшете карандашом. В связи с этим можно использовать не только действительное оптическое изображение, но и мнимое.

Приборы, предназначенные для оптико-графического трансформирования и дающие мнимое оптическое изображение аэроснимка, принято называть рисовальными приборами. Приборы, дающие действительное оптическое изображение аэроснимка, называются оптическими проекторами.

В настоящее время при оптико-графическом трансформировании применяются исключительно оптические проекторы, которые более удобны в работе, чем рисовальные приборы *.

Оптические проекторы можно разделить на проекторы с постоянной фокусировкой объектива и с переменной.

В оптическом проекторе с постоянной фокусировкой объектива (рис. 164) в качестве проектирующей камеры используется одна из камер стереофотограмметрического прибора — мультиплекса. Вместе с камерой используется держатель, состоящий из каретки, несущей суппорты с карданным устройством, в котором и крепится проектирующая камера.

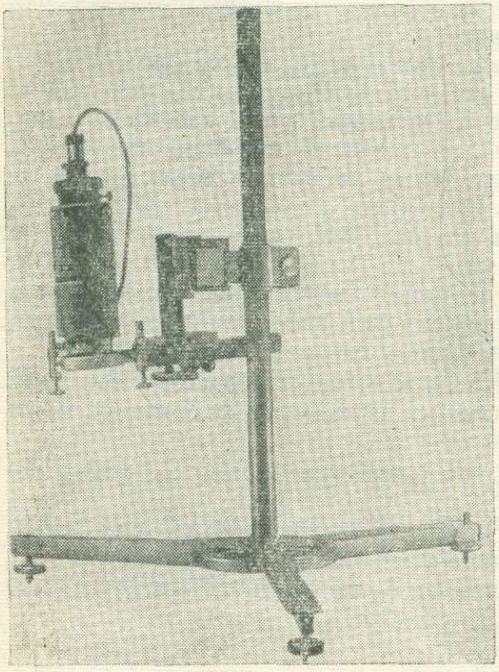


Рис. 164

При помощи каретки и суппортов проектирующая камера может перемещаться в трех взаимно перпендикулярных направлениях x, y, z, а при помощи карданного устройства она поворачивается (продольный и поперечный наклоны камеры) вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, проходящих через зрачок объектива, из которого выходят световые лучи. Кроме того, проектирующая камера вращается вокруг оптической оси.

Плавные движения осуществляются микрометренными винтами. Держатель крепится на небольшой подставке, которая при работе устанавливается на столе.

Оптическая схема проектирующей камеры показана на рис. 165. Электролампа и двухлинзовый конденсор помещены в корпусе, который надевается сверху на камеру. Объектив S и стеклянная плоскопараллельная пластинка P расположены в камере и жестко укреплены в ней. Формат пластинки около 50×40 мм **. На эту пластинку кладут уменьшенный аэроснимок, изготовленный на фотопластинке, и прижимают.

Главная точка обозначена на пластинке зачерненной точкой $o_п$. Главное расстояние проектирующей камеры, т. е. расстояние от верхней плоскости прижимной пластинки до зрачка *** (узловой точки), больше фокусного расстояния объектива. Поэтому верхняя плоскость прижимной пластинки оптически сопряжена с экраном, находящимся на конечном расстоянии от объектива, обычно равном 300 мм.

---

* Сведения о рисовальных приборах можно получить в книгах Н. М. Алексапольского [1] и А. Бухгольца [59].

** Описывается проектирующая камера нормальноугольного мультиплекса.

*** В который поступают световые лучи.

Благодаря малому действующему отверстию объектива, диаметр которого около 2 мм, высоту Z проектирующей камеры можно изменять в довольно широких пределах без ощутимой потери резкости изображения на экране. Практически не нарушает резкости изображения и небольшой наклон камеры.

Действительно, пусть высота Z камеры увеличилась на ΔZ и она наклонилась на небольшой угол φ. Для упрощения чертежа будем считать камеру неподвижной и перенесем движения на экран (рис. 166). При новом положении экрана E' на нем появятся эллипсы рассеяния, которые при малом угле наклона можно принять за кружки.

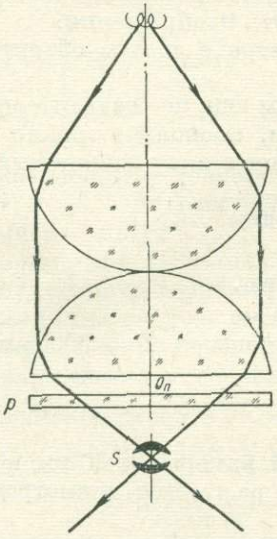


Рис. 165

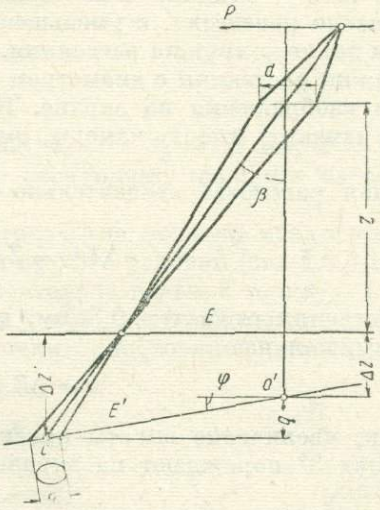


Рис. 166

Наибольший кружок получится на краю поля изображения. Опустим из точки c перпендикуляр $\Delta Z'$ на экран E. Обозначим диаметр кружка рассеяния через τ, а диаметр выходного зрачка объектива через d.

Напишем следующее приближенное равенство, учитывая малость угла φ,

$$\frac{\tau}{d} \approx \frac{\Delta Z'}{Z}.$$

Но

$$\Delta Z' = \Delta Z + q,$$

где

$$q = co' \sin \varphi.$$

Для кружка рассеяния, находящегося на краю поля изображения, можно считать, что

$$co' \approx (Z + \Delta Z) \operatorname{tg} \beta,$$

где β — половина угла поля зрения объектива.

Перепишем исходное равенство в виде

$$\tau \approx d \frac{\Delta Z + (Z + \Delta Z) \operatorname{tg} \beta \sin \varphi}{Z}$$

или

$$\tau d \approx \frac{\Delta Z}{Z} + d \operatorname{tg} \beta \sin \varphi + \frac{\Delta Z}{Z} d \operatorname{tg} \beta \sin \varphi.$$

Последним членом равенства можно пренебречь, как малой величиной по сравнению с первыми двумя членами. Окончательно получим

$$\tau \approx d \frac{\Delta Z}{Z} + d \operatorname{tg} \beta \sin \varphi. \tag{11.54}$$

Первый член этого равенства выражает влияние изменения высоты камеры, а второй член — влияние ее наклона на резкость изображения.

Согласно равенству, с уменьшением диаметра d зрачка объектива уменьшается и диаметр кружка рассеяния.

Кружки рассеяния с диаметром $\tau = 0{,}3$ мм еще не создают ощущения нерезкости изображения на экране. Подсчитаем, насколько можно при таком условии изменять высоту камеры, имея при этом в виду возможный ее наклон до 3°.

Решая равенство относительно ΔZ, находим

$$\Delta Z \approx \frac{\tau}{d} Z - Z \operatorname{tg} \beta \sin \varphi. \tag{11.55}$$

Подставляя сюда $\tau = 0{,}3$ мм, $\varphi = 3°$ и полагая $Z = 300$ мм, $\beta = 45°$, $d = 2$ мм, получаем

$$\Delta Z = 30 \text{ мм}.$$

Итак, увеличение высоты проектирующей камеры на 30 мм и ее наклон в пределах 3° порождают на экране кружки рассеяния диаметром не более 0,3 мм.

Можно считать, что кружки рассеяния примерно тех же размеров появятся на экране и при уменьшении высоты проектирующей камеры на 30 мм, при том же угле наклона 3°.

Отсюда приходим к выводу, что перемещение проектирующей камеры вверх — вниз на 30 мм от исходного положения, при котором получается наилучшая резкость изображения на экране, а также небольшие наклоны камеры в пределах до 3°, не должны заметно нарушать резкость изображения.

Как видим, оптические условия трансформирования в том виде, как они изложены в § 61, в данном случае не выполняются. Резкость изображения на экране практически сохраняется благодаря малому действующему отверстию объектива и небольшим перемещениям проектирующей камеры относительно своего начального положения, при котором достигается полная резкость изображения на экране.

В связи с этим возникает необходимость соразмерить коэффициент уменьшения аэроснимка так, чтобы резкое изображение на экране получалось в масштабе трансформирования $1/M$.

Рассчитаем коэффициент уменьшения v.

Можем написать

$$\frac{\frac{1}{m'}}{\frac{1}{M}} = \frac{f_{\text{п}}}{Z},$$

откуда

$$m' = M\frac{Z}{f_п},$$

где m' — знаменатель масштаба уменьшенного аэроснимка, Z — высота проектирующей камеры, при которой получается изображение на экране.

Так как

$$v = \frac{m'}{m},$$

то

$$v = \frac{Z}{f_п}\frac{M}{m}.$$

Но $M/m = 1/k_t$, а потому

$$v = \frac{Z}{f_п k_t}. \qquad (11.56)$$

Пусть коэффициент трансформирования $k_t = 2$, $f_п = 22$ мм, $Z = 300$ мм, тогда $v \approx 7$, т. е. в оптический проектор необходимо заложить аэроснимок, уменьшенный в семь раз.

Рассмотрим, как выполняются геометрические условия трансформирования (рис. 167). Для выполнения первого и второго условий (см. § 60) главную точку o аэроснимка следует сместить относительно главной точки $o_п$ проектирующей камеры (ввести децентрацию), так чтобы эта точка лежала на главной вертикали аэроснимка и расстояние от точки S до точки I равнялось величине $\frac{f}{\sin\alpha_0}$, уменьшенной в то же число раз, что и аэроснимок, заложенный в камеру, т. е.

$$SI = \frac{f}{v\sin\alpha_0}.$$

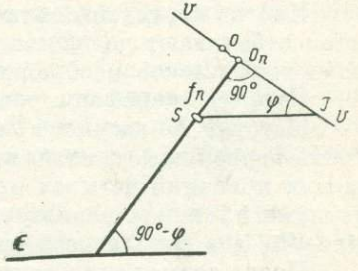


Рис. 167

Проектирующую камеру следует наклонить по направлению главной вертикали на угол φ, расположив луч SI параллельно экрану.

Изменяя высоту проектирующей камеры, можно получить на экране трансформированное изображение в требуемом масштабе.

Запишем формулы для децентрации аэроснимка и угла наклона проектирующей камеры.

Так как децентрация главной точки аэроснимка производится относительно главной точки $o_п$ проектирующей камеры, лежащей на перпендикуляре, опущенном из точки S на плоскость негатива, то, очевидно, применима формула децентрации (11.17) для малого фототрансформатора. Но величину децентрации следует уменьшить в v раз, т. е.

$$\delta = \frac{f}{v\sin\alpha_0}(\cos\varphi - \cos\alpha_0).$$

Угол наклона φ определяется по формуле

$$\sin\varphi = \frac{vf_п}{f}\sin\alpha_0.$$

В общем случае $\varphi \neq \alpha_0$. Поэтому оптический проектор относится к трансформаторам второго рода.

В частном случае может оказаться, что коэффициент уменьшения аэроснимка v, определенный по формуле (11.56), будет равен $f/f_п$. Тогда $\varphi = \alpha_0$ и $\delta = 0$, т. е. оптический проектор обращается в трансформатор первого рода.

В оптическом проекторе с переменной фокусировкой объектив укреплен в оправе, позволяющей перемещать его вдоль оптической оси. Это движение дает возможность отфокусировать объектив при различной высоте проектирующей камеры, т. е. получить на планшете резкое изображение аэроснимка при различных значениях Z. Проектирующая камера имеет такие же линейные и угловые движения, как и в оптическом проекторе с постоянной фокусировкой объектива. Формат кассеты камеры проектора 6×6 см. Фокусное расстояние объектива $f_{об} = 52{,}2$ мм. Коэффициент увеличения при проектировании можно изменять в пределах 1,7 — 7,3. Поэтому нет надобности пользоваться формулой (11.56) для расчета коэффициента уменьшения аэроснимка. Он всегда уменьшается в соответствии с форматом кассеты.

Уменьшенный снимок изготовляют путем фотографирования контактного отпечатка с аэронегатива.

Для фотографирования можно использовать репродукционную камеру, фототрансформатор или приспособить оптический проектор.

На контактном отпечатке должны быть нанесены горизонтали, вычерчены в условных знаках контуры, введены поправки за рельеф в контурные точки, по которым будет трансформироваться снимок *.

Кроме того, обозначают главную точку и концы отрезка, делящегося главной точкой пополам. По этому отрезку при трансформировании контролируется правильность изменения высоты проектирующей камеры при переходе от одной зоны трансформирования к другой.

Иногда контактный отпечаток после указанной подготовки перед уменьшением отбеливают до исчезновения фотоизображения, так что на нем остается одно графическое изображение, вычерченное тушью.

Процесс трансформирования заключается в следующем.

Негатив помещают в камере оптического проектора так, чтобы главная точка аэроснимка совпадала с главной точкой камеры проектора. Для совмещения проекций четырех ориентирующих точек негатива с соответствующими точками планшета используют угловые и линейные движения проектирующей камеры, а в случае необходимости децентрацию.

После совмещения точек на планшете отмечают проекцию главной точки и концов контрольной прямой, затем карандашом обводят оптическое изображение горизонталей и контуров, входящих в начальную зону.

Чтобы перейти к трансформированию смежной зоны, высоту проектирующей камеры следует изменить на величину ΔZ. По аналогии с формулой (11.39) можем написать

$$\Delta Z = Z \frac{h_{зоны}}{H_1}.$$

При расчете ΔZ расстояние Z измеряют миллиметровой линейкой от зрачка объектива, практически от плоскости диафрагмы, до планшета. $h_{зоны}$ рассчитывают по формуле (11.38), H определяют относительно средней горизонтальной плоскости начальной зоны.

Если отметка A_u средней горизонтальной плоскости смежной зоны больше отметки A_{u_0} средней горизонтальной плоскости начальной зоны, то при пере-

* При использовании контактных отпечатков более удобно вводить поправки за рельеф на отпечатках, чем на планшете, где будет строиться план.

ходе к трансформированию смежной зоны масштаб изображения нужно уменьшить, т. е. проектирующую камеру опустить, и, наоборот, поднять, если $A_u < < A_{u_0}$.

Отсчет ΔZ производят по вертикальной шкале держателя.

Правильность изменения высоты проектирующей камеры можно проверить по изменению длины проекции контрольного отрезка; она должна увеличиться или уменьшиться в соответствии с формулой (11.39) на величину

$$\Delta l' = l' \frac{h_{\text{зоны}}}{H_1}.$$

Отрезок l' измеряют на планшете миллиметровой линейкой или подсчитывают по формуле

$$l' = lk_t,$$

где l — длина контрольного отрезка на аэроснимке,

$$k_t = \frac{H_1}{fM}$$

Изменив высоту проектирующей камеры, необходимо проверить, совпадает ли проекция главной точки с соответствующей точкой, зафиксированной на планшете при трансформировании начальной зоны, и лежит ли проекция контрольного отрезка на соответствующей прямой, прочерченной на планшете.

Небольшие смещения в десятые доли миллиметра устраняют движениями x и y проектора и поворотом планшета. Значительные смещения свидетельствуют об ошибке, допущенной во время работы, которую следует устранить (возможно, что изменились углы наклона проектирующей камеры).

После вычерчивания на планшете оптических изображений горизонталей и контуров, входящих во вторую зону, переходят к последовательному трансформированию следующих зон, изменяя каждый раз высоту проектирующей камеры на величину ΔZ и проверяя это действие по изменению длины контрольной прямой.

В результате трансформирования всех аэроснимков получают графический план с горизонталями на целый планшет. На плане по стыковым линиям делают сводку горизонталей и контуров.

Глава 12

РАДИАЛЬНАЯ ПЛАНОВАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

§ 84. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Плановое положение контурных точек, по которым ведется трансформирование, определяется путем фотограмметрического сгущения сети опорных точек. Простейший способ планового сгущения — графическая радиальная фототриангуляция.

Идея этого способа заключается в развитии геометрических сетей по углам, определенным по аэроснимкам. При этом используются углы, искажением которых вследствие угла наклона аэроснимка и рельефа местности можно пренебречь. Вершина таких практически неискаженных углов находится на

плановом аэроснимке в области точек c и n, т. е. вблизи главной точки, поэтому указанные углы называют центральными.

Графическая радиальная плановая фототриангуляция, являясь наиболее простым способом планового сгущения опорной сети, что является его достоинством, в то же время имеет существенный недостаток — невысокую точность. Сейчас графическая фототриангуляция применяется только в отдельных случаях. Точность радиальной плановой фототриангуляции можно значительно повысить, применяя аналитический способ работы.

§ 85. ЗОНА ДОПУСТИМЫХ ИСКАЖЕНИЙ НАПРАВЛЕНИЙ НА ПЛАНОВОМ АЭРОСНИМКЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НАКЛОНОМ АЭРОСНИМКА

При графической фототриангуляции за вершину направлений на плановом аэроснимке зачастую выбирают не главную точку, а контурную, расположенную вблизи главной, при условии, чтобы направления, проведенные из выбранной контурной точки на *другие точки аэроснимка, имели искажения за* наклон аэроснимка, не выходящие за пределы точности прочерчивания направлений.

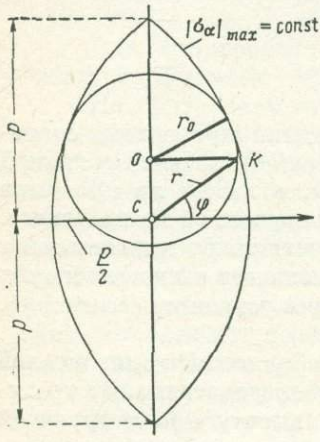


Рис. 168

Контурная точка, принятая за вершину направлений, называется центральной точкой или рабочим центром, а область, в пределах которой может находиться рабочий центр, — *зоной допустимых угловых искажений.*

Для определения границ этой зоны решим (9.35) относительно r

$$r = \frac{2f' \frac{|\sigma_\alpha|_{max}}{\rho}}{1 + |\cos\varphi|}.$$

Здесь $f' = \frac{f}{\sin\alpha_0}$ — величина постоянная для данного аэроснимка. Полагая $|\delta_\alpha|_{max} = \text{const}$, получаем уравнение с двумя переменными r и φ, которое и определяет геометрическое место точек, ограничивающих искомую зону.

Обозначим постоянную величину

$$2\frac{f}{\sin\alpha_0}\frac{|\sigma_\alpha|_{max}}{\rho} = p, \qquad (а)$$

тогда

$$r = \frac{p}{1 + |\cos\varphi|}. \qquad (12.1)$$

Это уравнение изображает замкнутую кривую, образованную двумя симметричными параболами, пересекающимися на главной вертикали (рис. 168).

Фокусы парабол находятся в точке нулевых искажений c. Расстояния от точки c до вершин парабол равны $p/2$, а расстояния до точек пересечения парабол с главной вертикалью равны p — параметру парабол.

Эта *кривая теоретически и выделяет на плановом аэроснимке зону* допустимых искажений направлений при заданной величине $|\sigma_\alpha|_{max}$.

Практически же построить кривую нельзя, так как положение точки c и главной вертикали на аэроснимке обычно неизвестно.

Поэтому впишем в кривую окружность с центром в главной точке. Эту окружность всегда можно построить, зная ее радиус r_0, который достаточно рассчитать с графической точностью. При таком условии можно принять

$$r_0 \approx x,$$

где x — абсцисса точки k кривой, у которой ордината $y = co$. Для определения x заменим в равенстве (12.1) полярные координаты r, φ прямоугольными x, y, тогда

$$\sqrt{x^2+y^2} = \frac{p}{1+\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}}$$

Откуда, учитывая, что $x \approx r_0$, находим

$$r_0 = \frac{1}{2}\left(p - \frac{y^2}{p}\right), \tag{12.2}$$

где

$$y = f \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}$$

и p определяется равенством (а).

По формуле (12.2) и рассчитывается радиус окружности, ограничивающей на плановом аэроснимке зону допустимых искажений направлений, обусловленных наклоном аэроснимка.

Таблица 5

α_0	$\lvert\sigma_\alpha\rvert_{max}$	
	3′	5′
2°	0,02f	0,04f
3°	0,006f	0,02f

На практике расчеты r_0 производят при условии, чтобы $|\sigma_\alpha|_{max}$ не выходило за пределы графической точности построения направлений на аэроснимке. $|\sigma_\alpha|_{max}$ принимают равным 3 и 5′. Для угла α_0 берут значение 2—3° (имеются в виду плановые аэроснимки, полученные без применения гиростабилизации аэрофотоаппарата).

Подставляя указанные значения величин $|\sigma_\alpha|_{max}$ и α_0 в формулу (12.2), получаем рабочие формулы для расчета r_0, приведенные в табл. 5.

Так, например, при $\alpha_0 = 2°$ $|\sigma_\alpha|_{max} = 3'$, $f = 200$ м, $r = 4$ мм, т. е. за центральную точку в данном случае можно принять любую контурную точку, расположенную внутри окружности радиуса $r_0 = 4$ мм с центром в главной точке.

§ 86. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕВЫШЕНИЙ, ПРИ КОТОРЫХ МОЖНО ПРИНЯТЬ ЗА ВЕРШИНУ НАПРАВЛЕНИЙ ГЛАВНУЮ ТОЧКУ И ЦЕНТРАЛЬНЫЕ ТОЧКИ

Пусть вершиной направлений служит произвольная точка планового аэроснимка. Тогда, согласно формуле (9.38), максимальное искажение направления вследствие рельефа получим при $\sin(\varphi - \gamma) = 1$, причем

$$|\sigma_h|_{max} = \rho \frac{rh}{Hd}.$$

Откуда, задаваясь величиной $|\sigma_h|_{max}$, находим

$$h \leqslant H \frac{d|\sigma_h|_{max}}{\rho r}. \tag{12.3}$$

Примем за вершину направлений главную точку аэроснимка. Тогда

$$r = on = f \operatorname{tg} \alpha_0$$

и

$$h \leqslant \frac{H}{f} \frac{d\,|\sigma_h|_{\max}}{\rho \operatorname{tg} \alpha_0}$$

или

$$h \leqslant \frac{dm}{\rho \operatorname{tg} \alpha_0} |\sigma_h|_{\max}, \qquad (12.4)$$

где m — знаменатель масштаба аэроснимка, d — длина прямой, проведенной из главной точки.

Положим $\alpha_0 = 2°$, $\operatorname{tg} \alpha_0 = 0{,}03$, $d = 70$ мм, $|\sigma_h|_{max} = 3'$, $\rho' = 3438'$, тогда

$$h_м \leqslant 2 \cdot 10^{-3} m. \qquad (12.5)$$

Так, например, при масштабе аэроснимка $\frac{1}{m} = \frac{1}{20\,000}$ превышение контурной точки, на которую проведено направление из главной точки, не должно быть более 40 м.

Если вершиной направления служит центральная точка, то в формулу (12.3) следует подставить $r = f \operatorname{tg} \alpha_0 + r_0$.

Из табл. 5 находим, что при $\alpha = 2°$, $r_0 = 0{,}02f$, а потому $r = 0{,}05f$.

Принимая $|\sigma_h|_{\max} = 3'$ и $r = 70$ мм, получаем

$$h_м \leqslant 10^{-3} m. \qquad (12.6)$$

По этой формуле и определяется максимальное превышение контурной точки на которую проводится направление из центральной точки аэроснимка.

§ 87. ГРАФИЧЕСКАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ. ПОСТРОЕНИЕ РОМБИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Ромбическая цепь строится по плановым аэроснимкам (аэронегативам), принадлежащим к одному маршруту, с тройным продольным перекрытием, т. е. с продольным перекрытием смежных аэроснимков более 50%.

Для построения собственно ромбической цепи достаточно на аэроснимках выбрать вершины направлений и так называемые связующие контурные точки, являющиеся боковыми точками ромбической цепи. Но помимо этих точек, образующих ромбическую цепь, в нее включают геодезические точки (опознаки), необходимые для редуцирования (см. § 88) и ориентирующие точки для трансформирования аэроснимков (если связующие точки не удовлетворяют условиям трансформирования). Рассмотрим простейший случай построения ромбической цепи, когда вершинами направлений служат центральные точки.

За центральную точку на каждом аэронегативе принимают *контурную точку, находящуюся внутри окружности радиуса* r_0 * *с центром* в главной точке. Контурную точку целесообразно выбрать в непосредственной близости к главной точке. Центральную точку каждого аэронегатива опознают на смежных аэронегативах и фиксируют наколами. На рис. 169 центральные точки обозначены цифрами *I*, *II* и т.д., а опознанные центральные точки — теми же цифрами со штрихами.

---

* Обычно r_0 рассчитывают, приняв $\alpha_0 = 2°$ и $|\sigma_\alpha|_{\max} = 3'$, т. е. $r_0 = 0{,}02f$.

Связующие точки выбирают примерно по средней линии зоны тройного перекрытия (эти зоны выделены пунктиром) по обе стороны от начального направления приблизительно на расстоянии, равном расстоянию между центральными точками.

Каждую связующую точку опознают на смежных аэронегативах. Так, например, точки *1* и *2* ,выбранные на втором аэронегативе, опознают на первом и третьем аэронегативах и на всех трех накалывают; аналогично поступают с точками *3*, *4*, *5*, *6* и т. д.

Геодезические точки накалывают, руководствуясь материалами полевой привязки аэроснимков; на рис. 169 эти точки не обозначены.

При выборе ориентирующих точек следует учитывать условия трансформирования.

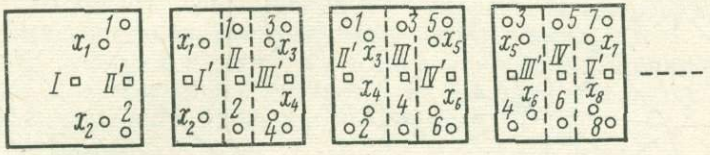


Рис. 169

Если трансформирование ведется не по зонам, то контурные точки, по которым будет производиться трансформирование, выбирают примерно по углам четырехугольника, образованного средними линиями продольного и поперечного перекрытий.

Обычно ориентирующие точки являются общими для смежных маршрутов. Если же общими их сделать нельзя вследствие значительного смещения аэроснимков одного маршрута относительно другого, то для каждого маршрута ориентирующие точки выбирают независимо, однако обязательно опознают их и накалывают на аэронегативах смежного маршрута. Этим достигается связь между смежными ромбическими цепями.

При трансформировании по зонам вполне удовлетворяют связующие точки, так как аэронегативы в маршруте трансформируются через один. Для установления связи между смежными ромбическими цепями некоторые связующие точки опознают и накалывают на аэронегативы смежного маршрута или выбирают несколько других контурных точек.

Затем изготовляют для каждого аэронегатива восковку направлений [16] и переходят к построению ромбической цепи.

Восковки направлений первого и второго аэронегативов взаимно ориентируют по начальным направлениям и закрепляют на монтажном столе грузиками (на рис. 170 контуры восковок не показаны). Расстояние между вершинами направлений соразмеряют с желаемым масштабом построений.

По направлениям, выходящим из центральных точек *I* и *II* к связующим *1* и *2*, прямой засечкой определяют плановое положение 1_0 и 2_0 этих точек. Кроме того, прямой засечкой будут определены ориентирующие точки x_1 и x_2. Засечки ориентирующих точек на рисунке не показаны, чтобы не загружать чертежа.

Положение центральной точки третьего аэроснимка на начальном направлении *II—III* определится боковой засечкой по связующим точкам *1* и *2*, одна из которых контрольная. Для этого восковку направлений третьего

аэроснимка накладывают на восковку направлений второго, совмещая соответственные начальные направления (это положение показано пунктиром), после чего третью восковку двигают вдоль начального направления, пока направление на связующую точку *1* не пройдет через плановое положение этой точки 1_0. В то же время направление на вторую связующую точку должно пройти через точку 2_0, что является контролем правильности определения положения центральной точки *III*.

Закрепляя восковку направлений грузиками, таким же путем определяют положение центральных точек последующих аэроснимков, используя боковые засечки по связующим точкам.

Одновременно с развитием ромбической цепи прямыми засечками определяют кроме ориентирующих и геодезические точки.

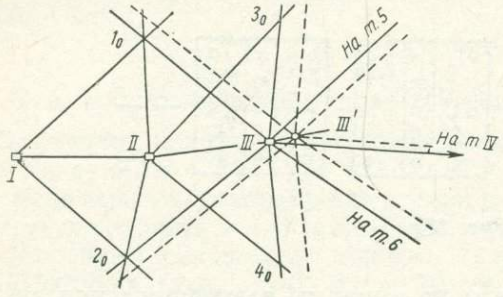


Рис. 170

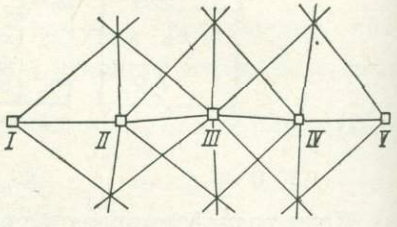


Рис. 171

Из рис. 171 следует, что звенья цепи имеют форму, близкую к ромбу.

Особенно отчетливо ромбическая форма цепи выражена при использовании в качестве вершин направлений главных точек и точек надира.

Правильное размещение связующих точек еще больше подчеркивает геометрически правильную форму цепи. Как отмечалось, связующие точки желательно выбирать так, чтобы расстояние от связующей до центральной точки соответственного аэроснимка примерно равнялось расстоянию между центральными точками. Это улучшает засечки точек ромбической цепи.

Закончив построение ромбической цепи, центральные точки аэронегативов, а также геодезические и ориентирующие точки, определенные прямыми засечками с центральных точек, перекалывают на лист восковки. В результате чего получаем плановое положение контурных точек местности в произвольном масштабе.

Аналогично строится ромбическая цепь, когда вершинами направлений являются главные точки или точки надира. Подробные сведения о технике построения и увязке ромбической цепи приведены в [16].

Если продольное перекрытие недостаточно для построения ромбической цепи, то фототриангуляцию развивают в виде цепи четырехугольников [17]. Однако такой случай является редким исключением.

§ 88. СУЩНОСТЬ И СПОСОБЫ РЕДУЦИРОВАНИЯ

Под редуцированием понимают приведение фототриангуляционных цепей к одному масштабу. Масштаб может быть произвольным и заданным. В последнем случае необходимо иметь геодезические точки (опознаки).

В результате редуцирования фототриангуляционные цепи объединяются в единую сеть. При отсутствии геодезических точек сеть называется неориентированной или свободной, при наличии геодезических точек сеть ориентируется или иначе вставляется между геодезическими точками.

Редуцирование можно осуществлять различными способами: графическим, графоаналитическим, механическим и оптико-механическим.

Сущность графического способа редуцирования заключается в том, что точки цепи переносят на планшет прямыми засечками с геодезических точек, расстояние между которыми принимают за базис. Если засечки оказываются ненадежными, то пользуются другим базисом. При этом один конец базиса — геодезическая точка, а другой — вспомогательная точка, которую определяют на планшете прямой засечкой с геодезических точек.

Производительность этого способа редуцирования небольшая; он находит применение в тех случаях, когда можно воспользоваться только чертежными принадлежностями (например, в экспедиционных условиях.)

Сущность графоаналитического способа редуцирования заключается в том, что точки цепи переносят на планшет полярным способом, вычислив коэффициент редуцирования по формуле

$$k = \frac{l}{l'},$$

где l и l' — соответственно расстояние между геодезическими точками на планшете и на цепи фототриангуляции.

За полюс принимают одну из геодезических точек, а за полярную ось — прямую, проходящую через вторую геодезическую точку.

При наличии нескольких геодезических точек для k берут среднее значение.

Этот способ редуцирования используется иногда при редуцировании длинных цепей.

При графомеханическом редуцировании применяют пантограф [1]. Способ не получил широкого применения ввиду малой производительности по сравнению с оптическим и другого весьма важного недостатка, свойственного всем трем рассмотренным способам редуцирования. Этот недостаток заключается в следующем. При наличии избыточного числа геодезических точек возникает необходимость в ориентировании цепи, что наиболее просто сделать, ведя наблюдение за невязками на всех геодезических точках одновременно, а также за невязками на общих точках смежных цепей.

Очевидно, что рассмотренные способы редуцирования такой возможности не дают.

При оптико-механическом редуцировании применяются приборы, называемые оптическими редукторами.

Этот способ редуцирования — наиболее производительный и точный, он широко применяется на производстве.

§ 89. ОПТИЧЕСКИЙ РЕДУКТОР Н. А. ПОПОВА

Прибор предназначен для редуцирования фототриангуляционных цепей и сетей, охватывающих несколько смежных маршрутов. Проекционная камера прибора занимает вертикальное положение, экран — горизонтальное.

Прибор оснащен масштабным ромбическим инверсором. Осветительное устройство состоит из 16 электроламп общей мощностью до 800 Вт, смонтированных в прямоугольном кожухе, и матового стекла.

Принципиальная схема прибора показана на рис. 172, где *1* — трубчатая станина; *3* — экран, изготовленный из выдержанного дерева или мраморной плиты; *2* — юстировочные винты для приведения экрана в горизонтальное положение; *5*, *8* — соответственно каретки объектива и негатива проекционной камеры; *4* — проекционный объектив; *6* — направляющие кареток; *7* — светонепроницаемая штора; *9* — кассета, представляющая собой раму с укрепленной стеклянной пластиной, которая выполняет функции прижимной пластины; на нее положено покровное стекло; *10* — юстировочные винты для приведения плоскости кассеты (плоскости прижимной пластины) в горизонтальное положение; *11* — матовое стекло осветительного устройства.

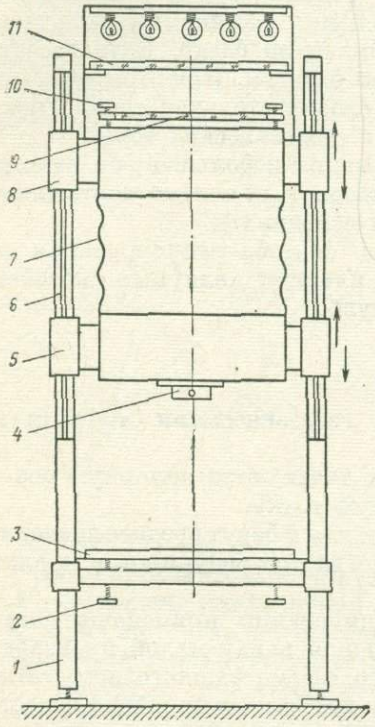


Рис. 172

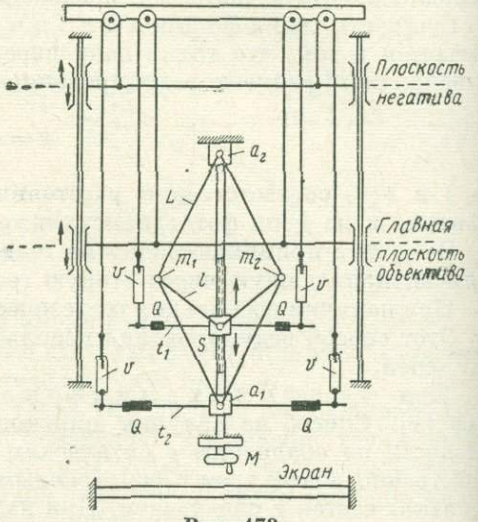


Рис. 173

Теория и принципиальная схема ромбического масштабного инверсора рассмотрены в § 72.

В оптическом редукторе Попова перемещения муфт S и a_1 передаются соответственно кареткам объектива и негатива тросом (рис. 173). При этом неподвижный шарнир ромба a_2 находится вверху, а подвижный a_1 — внизу, т. е. имеет обратное по сравнению со схемой, показанной на рис. 155, расположение шарниров *. Это необходимо для того, чтобы при вытягивании шарнирного ромба по направлению оптической оси каретки объектива и негатива поднимались, а при сжатии шарнирного ромба опускались. Именно в таких направлениях и должны двигаться каретки, согласно теории ромбического инверсора.

Масштабный инверсор приводится в действие ручным штурвалом M. Стержни t_1 и t_2, скрепленные соответственно с муфтами S и a_1, несут на себе

* На обоих рисунках имеем одинаковое обозначение элементов ромбического инверсора.

противовесы Q кареток объектива и негатива. К стержням присоединены концы тросов.

Стержни l ромбического инверсора конструктивно оформлены так, что их длины можно в небольших пределах изменять. Это необходимо для юстировки инверсоров. Напомним, что длина стержня l, согласно (11.30), должна удовлетворять условию

$$l = \sqrt{L^2 - f_{об}^2}.$$

Кроме того, при юстировке инверсора приходится укорачивать или удлинять тросы. Делается это путем вращения винтовых растяжек v. Если инверсор отъюстирован, то при $k = 1$ стержни l лежат на одной прямой и занимают горизонтальное положение, а расстояния от точки S объектива до плоскости кассеты и экрана равны $2f_{об}$.

Особое внимание при юстировке прибора обращается на то, чтобы изображение на экране было подобно оригиналу. Для этого используются юстировочные винты экрана и кассеты.

Основные характеристики оптического редуктора Н. А. Попова:

репродукционный объектив	$f_{об} = 500$ мм
коэффициент увеличения	от 0,5 до 2
размер экрана	100×100 см
размер кассеты	70×70 см
размеры прибора	1,4×1,4×3 м

§ 90. ОПТИЧЕСКИЙ РЕДУКТОР Ф. В. ДРОБЫШЕВА

Этот прибор предназначен для редуцирования фототриангуляционных цепей, предварительно уменьшенных в три раза при помощи специального пантографа. Прибор оснащен масштабным лекальным инверсором. Для освещения использованы люминесцентные лампы, значительно уменьшающие нагрев камеры.

На трубчатой станине (рис. 174) расположены проектирующая камера *4* и горизонтальный экран *1*, представляющий собой массивное зеркальное стекло. Проектирующая камера перемещается вдоль вертикальной направляющей *13* при помощи электромотора *14* прямого и обратного действия, вращающего ходовой винт *12*. Для включения мотора служат педали *15*. Кроме того, перемещение камеры можно производить ножным штурвалом (на рисунке не показан).

В проектирующей камере находятся объектив *5*, плоское зеркало *3*, вертикальная кассета *6*, люминесцентные лампы *7* и плоскопараллельная стеклянная пластинка *2*, защищающая камеру от попадания в нее пыли.

Кассета расположена на каретке *9*, перемещающейся вдоль горизонтальной направляющей при помощи масштабного лекального инверсора.

Лекало *11* неподвижно укреплено на станине. К лекалу прижимается ролик стержня *10*, скрепленного с кареткой *9*.

При перемещении проектирующей камеры ролик катится по лекалу и заставляет каретку двигаться вдоль горизонтальной направляющей *8*. Это движение согласовано с движением проектирующей камеры так, что расстояния по оптической оси $d_1 = Sp$ и $d_2 = Sk + kp'$ всегда удовлетворяют основному уравнению оптики

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f_{об}}.$$

Благодаря действию масштабного инверсора резкость изображения на экране в процессе работы не нарушается.

Для правильного редуцирования изображение на экране должно быть подобным оригиналу. Для выполнения поверки проектируем на экран прямоугольник, вычерченный на бумаге, которую закладывают в кассету. На экран помещают бумагу с вычерченным на ней подобным прямоугольником, увеличенным примерно в 3—4 раза. Изменяя масштаб изображения и перемещая бумагу по экрану, пробуют совместить оптическое изображение прямоугольника с прямоугольником, построенным на бумаге. Если это сделать не удается, то действуют подъемными винтами экрана, пока оптическое изображение не будет подобным.

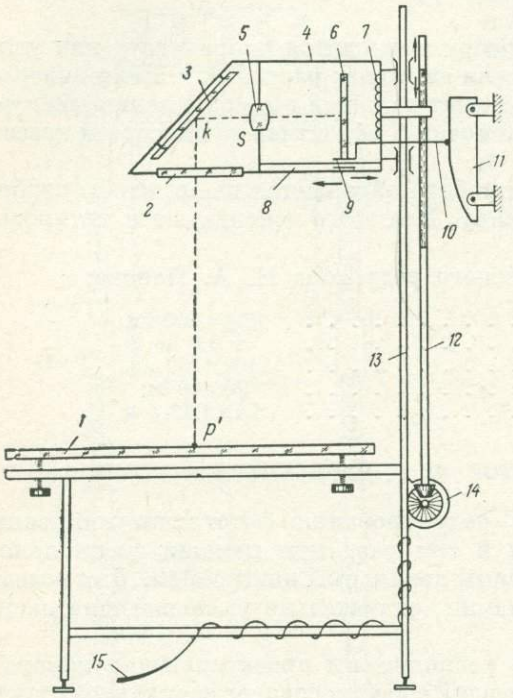


Рис. 174

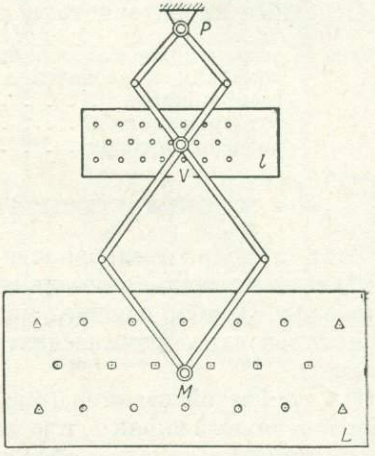


Рис. 175

К прибору прилагается пантограф (рис. 175) для изготовления уменьшенной копии с фототриангуляционной цепи, так как размеры кассеты меньше размеров самой цепи.

Шарнир P пантографа неподвижен и является его полюсом. В шарнире M помещена стеклянная пластинка с визирной маркой. В шарнир V вставлена трубка с иглой. При пантографировании визирную марку последовательно устанавливают над всеми точками фототриангуляции L. Нажатием иглы отмечают проколами положение точек на полоске бумаги l, которая при редуцировании и закладывается в кассету оптического редуктора.

Основные характеристики прибора:

объектив	$f_{об} = 300$ мм
размер экрана	80×60 см
размер кассеты	36×18 см
размеры прибора	100×120× ×210 см

§ 91. РЕДУЦИРОВАНИЕ РОМБИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ТОЧКАМ НА ОПТИЧЕСКИХ РЕДУКТОРАХ Н. А. ПОПОВА И Ф. В. ДРОБЫШЕВА

Фототриангуляционные цепи, входящие в данную трапецию, редуцируют на один планшет, на который предварительно координатографом наносят по координатам плановые геодезические точки (опознаки) в масштабе редуцирования.

Редуцирование целесообразно начинать с ромбических цепей, имеющих наибольшее количество плановых геодезических точек.

При работе на оптическом редукторе Н. А. Попова в кассету закладывают восковку фототриангуляции, при работе на оптическом проекторе Ф. В. Дробышева ее предварительно уменьшают при помощи пантографа. Спроектировав фототриангуляционные точки на планшет, помещенный на экран, совмещают оптическое изображение геодезических точек, включенных в фототриангуляцию, с соответственными точками на планшете.

При наличии избыточного числа геодезических точек достичь полного совмещения проекции всех геодезических точек, включенных в фототриангуляцию, с одноименными точками на планшете не удается из-за погрешностей построения фототриангуляции. Если несовмещения (невязки) не носят систематического характера, то их распределяют между всеми геодезическими точками при условии, что после этого невязки не будут превышать допустимой величины, которую принимают равной 0,4 мм. В противном случае фототриангуляционную цепь переделывают. Если обнаружен систематический характер невязок, то при наличии геодезических точек в середине цепи результаты редуцирования можно улучшить, редуцируя цепь по частям.

Достигнув необходимой точности совмещения проекций геодезических точек на фототриангуляции с одноименными точками на планшете, отмечают жестким карандашом проекции остальных фототриангуляционных точек.

После редуцирования всех ромбических цепей просматривают невязки на ориентирующих точках, общих для двух смежных цепей. Если в каждом ряде точек не замечают закономерного характера в невязках и величины невязок не превышают допустимой величины, которую принимают равной 0,7 мм, то производят увязку сети одним из способов, описанных в [16].

В случае если установлен закономерный характер невязок, необходимо выяснить причину их возникновения и устранить.

§ 92. ЧЕТЫРЕХПРОЕКТОРНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ РЕДУКТОР Н. П. КОЖЕВНИКОВА

Прибор (рис. 176) предназначен для совместного редуцирования четырех смежных цепей. Цепи предварительно уменьшаются на специальном фотоуменьшителе.

Полученные фотопластинки закладываются в кассеты проекторов оптического редуктора и одновременно проектируются на экран, на котором находится планшет с опорными точками.

Одновременное проектирование четырех цепей на один экран дает возможность наблюдать невязки на общих точках цепей и опознаках, выявить закономерные искажения и наилучшим образом осуществить взаимную увязку цепей.

Проекторы расположены на суппортах (рис. 177). Суппорты позволяют перемещать проекторы в горизонтальной плоскости и по высоте. Каждый

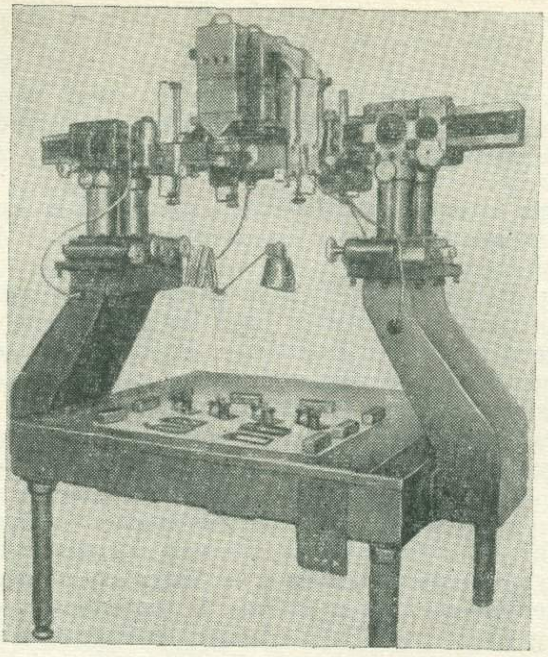


Рис. 176

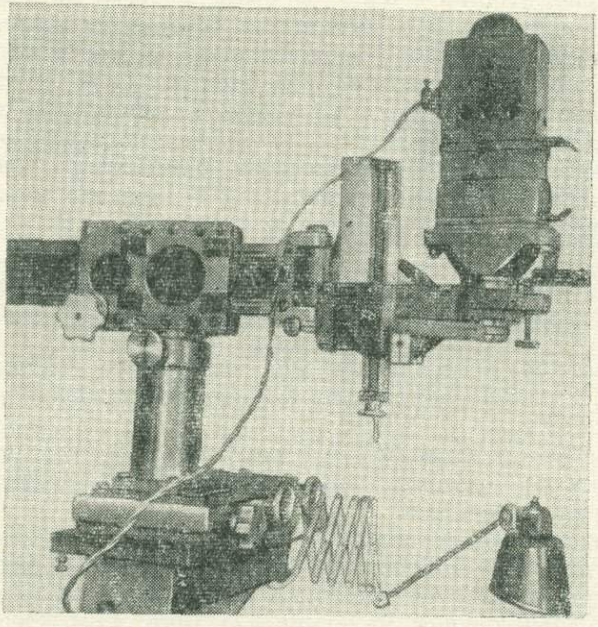


Рис. 177

проектор, кроме того, имеет самостоятельные движения по направлениям осей X, Y, Z, а также вокруг оптической оси (вращение $\varkappa$).

Сохранение резкости изображения на экране при изменении высоты проектора осуществляется лекальным инверсором, вызывающим перемещение оправы объектива относительно прикладной рамки (кассеты). Прикладная рамка занимает всегда горизонтальное положение, т. е. параллельна экрану.

Осветитель проектора состоит из конденсора, электролампы и зеркального сферического рефлектора. Между лампой и конденсором имеется место для цветного фильтра (красного или зеленого), так что две смежные цепи окрашиваются в различные цвета, что удобно для работы.

Стеклянный экран имеет юстировочные винты для горизонтирования и устранения его прогиба.

Основные характеристики прибора:

объективы проекторов	$f_{об} = 115$ мм; 1 : 6,8
размер прикладной рамки (кассеты)	121×61 мм
размер проектора	22×8,5×46 см
размер экрана	120×100 см

§ 93. ТОЧНОСТЬ ГРАФИЧЕСКОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

Графические фототриангуляционные цепи строятся путем соединения восковок направлений, поэтому точность цепи зависит от точности направлений на восковках и точности соединения восковок.

Точность направлений на восковках зависит от искажений направлений на аэронегативах и ошибок графического определения направлений.

Искажение направлений на аэронегативах зависит от углов наклона аэроснимков, рельефа местности (если вершиной не является точка надира) и деформации аэронегативов. Влияние кривизны Земли и рефракции на искажение центральных направлений практически неощутимо.

Ошибки графического определения направлений возникают при опознавании и наколе контурных точек на аэронегативах, копировании точек на восковки и прочерчивании на восковках направлений.

Если вершина направлений — главная точка аэроснимка и превышения удовлетворяют (12.5), то на искажение направлений в основном влияют ошибки графического определения направлений.

Экспериментально установлено, что при расстоянии между точками, равном 70 мм, средняя квадратическая ошибка направления $\mu = \pm 4$—$5'$.

Точность графической фототриангуляции (ромбической цепи) обстоятельно исследована Г. П. Жуковым и Н. П. Кожевниковым. Ими предложены формулы, позволяющие предвычислить ожидаемые ошибки в середине цепи после редуцирования. По этим формулам рассчитывают допустимое расстояние между опорными геодезическими точками вдоль маршрута.

Ожидаемая средняя квадратическая ошибка m положения ориентирующей точки в середине цепи относительно опорных геодезических точек, по которым редуцировалась цепь, рассчитывается по формуле

$$m = 0{,}35 \frac{\mu}{\rho} b k_R \sqrt{n^3 + 11{,}3n + 35}. \qquad (12.7)$$

При $n \geqslant 6$ можно пользоваться упрощенной формулой

$$m = 0{,}35 \frac{\mu}{\rho} b k_R \sqrt{n^3}. \qquad (12.8)$$

В этих формулах μ — средняя квадратическая ошибка направления, $\rho' = 3438'$; b — длина базисной стороны в масштабе аэроснимков; k_R — отношение знаменателя масштаба аэроснимков к знаменателю масштаба редуцирования; n — число базисных сторон в цепи.

Пусть $\mu = 4'$, $b = 70$ мм, $k_R = 1{,}5$, $n = 4$, тогда по формуле (12.7) получаем $m = 0{,}51$ мм.

Такова при данных условиях ожидаемая средняя квадратическая ошибка в положении ориентирующей точки в середине цепи относительно опорных геодезических точек, по которым редуцировалась цепь. При этом предполагается, что редуцирование велось по точкам, расположенным на концах цепи.

Если задаться допустимой величиной m, то можно рассчитать, через сколько базисных сторон следует размещать опорные геодезические точки.

В этом — практическое значение приведенных формул.

§ 94. АНАЛИТИЧЕСКАЯ РАДИАЛЬНАЯ ПЛАНОВАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

1. Точность радиальной плановой фототриангуляции может быть значительно повышена, если заменить графический способ построения цепи аналитическим. При этом на аэроснимках измеряют углы или координаты точек. В первом случае применяются угломерные приборы, называемые радиалтриангуляторами [17], во втором случае приборы для линейных измерений — стереокомпараторы и компараторы.

Стереокомпараторы получили в нашей стране широкое распространение. Учитывая это, рассмотрим построение ромбических цепей по измеренным координатам точек.

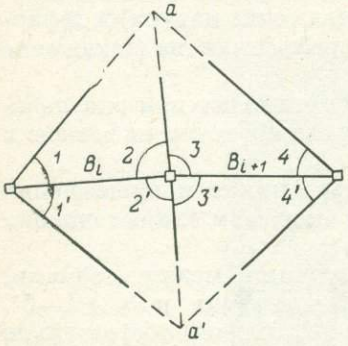


Рис. 178

Возьмем звено ромбической цепи (рис. 178) и выразим правую базисную сторону через левую и центральные углы.

Из верхних двух треугольников, применяя теорему синусов, находим

$$B_{i+1} = B_i \frac{\dfrac{\sin(3+4)}{\sin 4}}{\dfrac{\sin(1+2)}{\sin 1}},$$

или

$$B_{i+1} = B_i \frac{\sin 3 \operatorname{ctg} 4 + \cos 3}{\cos 2 + \operatorname{ctg} 1 \sin 2}.$$

Выражая синусы и косинусы углов через тангенсы, после простых преобразований получаем

$$B_{i+1} = B_i \frac{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2 2}\,(\operatorname{tg} 3 \operatorname{ctg} 4 + 1)}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2 3}\,(1 + \operatorname{tg} 2 \operatorname{ctg} 1)}, \qquad \text{(а)}$$

но согласно рис. 179

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{ctg} 1 &= \frac{x_1}{y_1}; \quad \operatorname{tg} 2 = -\frac{y_2}{x_2} \\ \operatorname{tg} 3 &= \frac{y_1'}{x_1'}; \quad \operatorname{ctg} 4 = -\frac{x_2'}{y_2'} \end{aligned}\right\}, \qquad \text{(б)}$$

где x_1 и y_1, x_2 и y_2 — координаты верхней связующей точки a на левом и правом аэроснимках, составляющих первую стереопару; x_1' и y_1', x_2' и y_2' — координаты той же связующей точки на левом и правом аэроснимках, составляющих вторую стереопару.

При этом осью x являются начальные направления и начала координат на каждом аэроснимке находятся в рабочем центре аэроснимка.

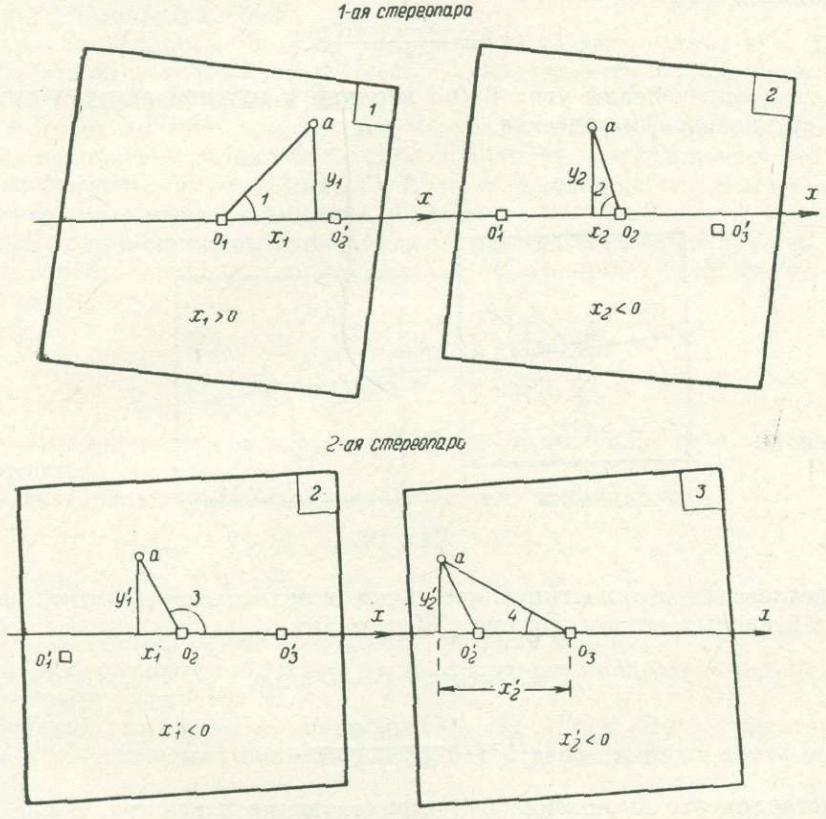


Рис. 179

Подставляя в равенство (а) выражения (б), после простых преобразований получаем

$$B_{i+1} = B_i \frac{(x_1'y_2' - x_2'y_1')\, y_1}{(x_1y_2 - x_2y_1)\, y_2'}. \qquad (12.9)$$

По этой формуле и определяется правая базисная сторона звена по левой и координатам связующей точки, измеренным на двух смежных стереопарах, образующих звено ромбической цепи *.

Из двух определений правой базисной стороны по верхней и нижней связующим точкам берется среднее арифметическое, учитывая, что форма ромбических цепей *близка к схематической* и, *следовательно*, *точность определения* правой базисной стороны по верхней и нижней связующим точкам одинаково.

---

* Для начальной, первой базисной стороны берется приближенное округленное значение.

Выразим теперь угол β между базисными сторонами через координаты связующей точки.

Из рис. 178 видим, что $\beta = 2+3$ и, следовательно,

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\operatorname{tg}2+\operatorname{tg}3}{1-\operatorname{tg}2\operatorname{tg}3},$$

или, учитывая (б),

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{x_2y_1'-x_1'y_2}{x_2x_1'+y_2y_1'}. \qquad (12.10)$$

Из двух определений угла β (по верхней и нижней связующим точкам) берется среднее арифметическое.

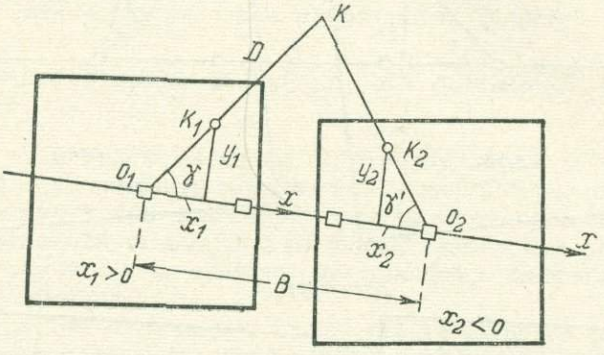


Рис. 180

Геодезические и ориентирующие точки определяются прямыми засечками с концов базисных сторон. Из рис. 180 находим

$$X = D\cos\gamma; \quad Y = D\sin\gamma,$$

где

$$D = B\frac{\sin\gamma'}{\sin(\gamma+\gamma')}.$$

Подставляя это выражение в предшествующие равенства, после простых преобразований получаем

$$X = B\frac{\operatorname{ctg}\gamma}{\operatorname{ctg}\gamma'+\operatorname{ctg}\gamma};$$

$$Y = B\frac{1}{\operatorname{ctg}\gamma''+\operatorname{ctg}\gamma}.$$

Заменяя котангенсы углов через координаты точки K, измеренные на данной стереопаре, получаем

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{By_2}{x_1y_2-y_1x_2}x_1 \\ Y &= \frac{By_2}{x_1y_2-y_1x_2}y_1 \end{aligned}\right\}. \qquad (12.11)$$

Здесь X, Y — координаты определяемой точки в системе координат данной стереопары.

2. Координаты рабочих центров вычисляют по формулам геодезии, применяемым при вычислении полигонометрического хода. Вычисления проводятся в условной системе координат. При этом используется, как и в геодезии, левая *система координат. За начало координат принимают обычно первый рабочий* центр и за ось ординат — направление, проходящее через первую базисную сторону.

В этой же условной системе координат вычисляют координаты ориентирующих и геодезических точек.

Переход от условной системы координат к геодезической, т. е. вставка фототриангуляции в геодезическую сеть, осуществляется путем конформного линейного преобразования координат.

Для этого по способу наименьших квадратов находят вероятнейшие значения угла поворота θ условной системы координат, коэффициента редуцирования k_R *и геодезических координат* X_0, Y_0 *начала условной системы координат.*

Решается эта задача следующим образом.

Сначала по приближенным значениям указанных элементов θ', k'_R и X'_0, Y'_0 вычисляют преобразованные координаты $X'_{\text{оп}}$, $Y'_{\text{оп}}$ опорных точек фототриангуляции по формулам

$$X'_{\text{оп}} = X'_0 + (X\cos\theta' - Y\sin\theta')\,k'_R;$$

$$Y'_{\text{оп}} = Y'_0 + (X\sin\theta' + Y\cos\theta')\,k'_R,$$

где X, Y — координаты опорных точек на фототриангуляции в условной системе координат.

Затем составляют уравнения погрешностей, имеющие вид

$$dX_0 + (X'_{\text{оп}} - X'_0)\,dk_R - (Y'_{\text{оп}} - Y'_0)\,d\theta + X'_{\text{оп}} - X_{\text{оп}} = v';$$

$$dY_0 + (Y'_{\text{оп}} - Y'_0)\,dk_R + (X'_{\text{оп}} - X'_0)\,d\theta + Y'_{\text{оп}} - Y_{\text{оп}} + v'',$$

где $X_{\text{оп}}$, $Y_{\text{оп}}$ — геодезические координаты опорной точки.

Уравнения решаются по способу наименьших квадратов под условием минимума суммы квадратов величин v' и v''.

В результате этого находят поправки dX_0, dY_0, dk_R и $d\theta$ к соответствующим элементам преобразования системы координат и вероятнейшие значения этих элементов

$$X_0 = X'_0 + dX_0;$$

$$Y_0 = Y'_0 = dY_0;$$

$$k_R = k_R + dk_R;$$

$$\theta = \theta' + \frac{d\theta}{\rho}.$$

Определив вероятнейшее значение элементов преобразования, находят геодезические координаты всех точек фототриангуляции по формулам

$$X = X_0 + (X\cos\theta - v\sin\theta)\,k_R;$$

$$Y = Y_0 + (X\sin\theta + Y\cos\theta)\,k_R.$$

Заметим, что если по этим формулам вычислить координаты опорных точек, то они будут отличаться от геодезических координат, но расхождения между

координатами на всех опорных точках будут удовлетворять требованиям способа наименьших квадратов.

3. Сравним точность аналитического метода и графического. Для этого выразим ошибку угла через ошибки измерения координат.

Имеем:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{y}{x}.$$

Дифференцируя по переменным y и x и переходя к средним квадратическим ошибкам, получаем

$$m_\psi = \sqrt{\left(\frac{y}{x^2+y^2}\right)^2 m_x^2 + \left(\frac{x^2}{x^2+y^2}\right)^2 m_y^2},$$

где m_ψ — средняя квадратическая ошибка определения центрального угла ψ по измеренным координатам точек, m_x и m_y — средние квадратические ошибки измерения координат точек.

Будем рассматривать ошибки измерения координат совместно с искажением координат, обусловленным случайной деформацией аэропленки, и положим $m_x = m_y = \pm 0{,}03$ мм. Учитывая, что

$$x^2 + y^2 = r^2,$$

где r — радиус-вектор точки, окончательно запишем

$$m_\psi = \rho' \frac{m_{x,y}}{r}.$$

Подставляя сюда $m_{x,y} = \pm 0{,}03$ мм, $\rho' = 3438'$ и полагая $r = 70$ мм, получим

$$m_\psi = \pm 1{,}5'.$$

Такова при данных условиях средняя квадратическая ошибка определения угла.

Очевидно, что средняя квадратическая ошибка направления, обусловленная погрешностями измерения координат точек и влиянием случайной деформации аэропленки, будет равна

$$\mu_{изм} = \frac{m_\psi}{\sqrt{2}}, \quad \mu_{изм} = \pm 1'.$$

4. При аналитическом методе целесообразно использовать плановые аэроснимки, полученные с применением гидростабилизации, и за рабочие центры принять главные точки аэроснимков. Тогда, как это будет видно из последующего анализа, искажением направлений за угол наклона аэроснимка и рельеф местности (исключая горные районы) можно пренебречь. Что же касается влияния неравномерной деформации аэропленки на искажение направлений, то ее легко учесть введением поправок в измеренные координаты точек.

Определим среднюю квадратическую величину m_α искажения направления вследствие угла наклона аэроснимка.

Воспользуемся формулой (9.33)

$$\sigma_\alpha = -\rho \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} \sin 2\gamma.$$

На данном аэроснимке δ_α — функция угла γ.

Очевидно,

$$\mu_\alpha = \int_0^{2\pi} \frac{\sigma_\alpha^2 d\gamma}{2\pi},$$

или

$$\mu_\alpha = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\rho^2 \sin^4\frac{\alpha_0}{2}\int_0^{2\pi} \sin^2 2\gamma\, d\gamma},$$

но

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 2\gamma\, d\gamma = \pi,$$

поэтому

$$\mu_\alpha = \frac{\rho}{\sqrt{2}} \sin^2\frac{\alpha_0}{2}.$$

Возьмем для α_0 среднее значение угла наклона аэроснимков. В случае применения гиростабилизации $\alpha_0 = 10'$ и, следовательно,

$$\mu_\alpha = \pm 0{,}1'.$$

Очевидно, что этой величиной можно пренебречь.

Для определения средней квадратической величины искажения направления вследствие рельефа местности следует воспользоваться формулой (9.39)

$$\sigma_h = \rho \frac{h}{dm} \operatorname{tg}\alpha_0 \cos\gamma.$$

Выполнив преобразования, аналогичные предшествующим, получаем

$$\mu_h = \frac{\rho}{\sqrt{2}} \frac{h}{dm} \operatorname{tg}\alpha_0.$$

Полагая $\alpha_0 = 10'$, $d = 70$ мм и выражая h в метрах, запишем формулу в виде

$$\mu_h = \pm 100\frac{h_м}{m}. \qquad (12.12)$$

Напомним, что m в правой части равенства — знаменатель масштаба аэроснимка.

Напишем теперь выражение для суммарной средней квадратической ошибки направления

$$\mu = \sqrt{\mu_{изм}^2 + \mu_h^2}.$$

Числовое значение $\mu_{изм} = \pm 1'$, числовое значение μ_h определяется по формуле (12.12).

Определим условия, при которых величиной μ_h можно пренебречь.

Согласно теории ошибок это можно сделать, если $\mu_h \leqslant \mu_{изм}/3$ или $\mu_h \leqslant 0{,}3'$.

Подставляя это значение μ_h в (12.12), находим

$$h_м \leqslant 0{,}003m. \qquad (12.13)$$

Итак, если превышения точек местности удовлетворяют этому неравенству, то среднюю квадратическую ошибку направления μ следует принять равной $\mu_{изм}$, т. е. $\mu = \pm 1'$.

Пусть масштаб аэроснимков $1/m = 1/20\,000$, тогда $h \leqslant 60$ м, т. е. влиянием рельефа местности на искажение направлений в данном случае можно пренебречь, *если на аэроснимке выбраны контурные точки, превышения которых* относительно рабочего центра не более 60 м. Это условие вполне выполнимо при съемке всхолмленных районов.

Сравнивая между собой средние квадратические ошибки направлений при аналитическом ($\mu_{ан} = \pm 1'$) и графическом ($\mu_{гр} = \pm 4'$) методах радиальной плановой фототриангуляции, приходим к выводу, что точность аналитического метода в четыре раза выше точности графического метода. При этом имеется в виду, что превышения удовлетворяют условию (12.13) и углы наклона аэроснимков в среднем около 10′.

Глава 13

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ КАРТ

§ 95. ПОНЯТИЕ О КОМБИНИРОВАННОМ МЕТОДЕ

Сущность *комбинированного метода заключается в следующем: по аэро*снимкам составляются фотопланы, а съемка рельефа на аэросъемочном материале (фотоплане, фотосхемах, аэроснимках) производится в полевых условиях при помощи мензулы, нивелира или тахеометра.

Комбинированный метод был разработан проф. Н. М. Алексапольским в 1924 г. В то время основным методом топографической съемки была мензульная съемка. Являясь более производительным, комбинированный метод постепенно *стал вытеснять мензульную съемку и нашел широкое применение при* картографировании равнинных и всхолмленных районов в средних масштабах в период 1930—1935 гг.

По мере развития методов стереотопографической съемки комбинированный метод стал утрачивать свое первоначальное значение и в настоящее время находит применение главным образом в тех случаях, когда использование стереотопографической съемки вызывает затруднения, например при съемке равнинных залесенных районов в крупных масштабах.

Комбинированный метод съемки представляет комплекс трех видов работ: *аэрофотосъемочных, геодезических и фотограмметрических.*

Масштаб залета обычно делают в 2-3 раза мельче масштаба создаваемой карты. Продольное перекрытие аэроснимков 60% и поперечное 30%.

Заметим, что уменьшение масштаба залета способствует сокращению объема аэрофотосъемочных фотограмметрических и геодезических работ. Однако нужно учитывать, что чрезмерное уменьшение масштаба залета может вызвать потерю резкости изображения при трансформировании и затруднить дешифрирование.

Аэрофотосъемку целесообразно производить нормальноугольным или узкоугольным *аэрофотоаппаратом. Это позволяет во многих случаях избежать* трансформирования по зонам, а если оно потребуется, то уменьшить число зон трансформирования в сравнении с использованием широкоугольных аэрофотоаппаратов.

Так, например, из формулы (11.38) следует, что, применяя нормальноугольный аэрофотоаппарат с фокусным расстоянием 200 мм, мы увеличим высоту

зоны трансформирования (при прочих равных условиях) в два раза по сравнению с использованием широкоугольного аэрофотоаппарата с фокусным расстоянием 100 мм, т. е. число зон сократим в два раза.

§ 96. РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОПОЗНАКАМИ

Геодезические работы при комбинированном методе состоят из плановой привязки аэроснимков, съемки рельефа и дешифрирования.

Плановая привязка аэроснимков предназначена для определения планового положения контурных точек, опознанных на аэроснимке и на местности. Эти опорные точки (плановые опознаки) необходимы для ориентирования фототриангуляции.

Плановые опознаки размещаются по середине поперечного перекрытия аэроснимков двух смежных маршрутов. Расстояние между опознаками вдоль маршрута должно быть согласовано с точностью того метода сгущения плановой сети, который будет применен при фотограмметрических работах.

В частности, если использовать метод графической или аналитической радиальной фототриангуляции, то задача решается на основании формулы (12.7).

В табл. 6 приведены значения ожидаемой средней квадратической ошибки в середине цепи после редуцирования, вычисленные по формуле (12.7) при $k_R = 1$, $b = 70$ мм, $\mu = 5'$ (графический метод) и $\mu = 1'$ (аналитический метод).

При коэффициентах редуцирования $k_R \neq 1$ значения m следует соответственно изменить.

Воспользуемся табл. 6 и определим допустимое расстояние между опознаками в базисах. При этом потребуем, чтобы средняя квадратическая ошибка положения ориентирующей точки в середине цепи не превышала 0,4 мм. Тогда после увязки смежных ромбических цепей ошибка уменьшится в $\sqrt{2}$ раза, т. е. будет равна 0,3 мм, что и требуется по Наставлению [31]. Напомним, что за вероятнейшее положение ориентирующих точек при увязке принимают среднее из двух определений.

Из табл. 6 следует, что при $k_R = 1$ опознаки следует размещать через четыре базиса при графическом методе и через 14 базисов при аналитическом методе.

Таблица 6

Количество базисов в цепи	Ожидаемая средняя квадратическая ошибка m в середине цепи, мм	
	графический метод	аналитический метод *
2	0,23	0,06
4	0,34	0,09
6	0,51	0,13
8	0,72	0,18
10	0,98	0,29
12	1,25	0,31
14	1,56	0,39

* При аналитическом методе предусмотрено использование аэроснимков, полученных с применением гиростабилизации.

Но коэффициенты редуцирования $k_R = 1$ применяются редко. Обычно $k_R = 2$. Увеличивая значения m, приведенные в табл. 6, в два раза, приходим к выводу, что графический метод в этом случае неприменим, а при аналитическом методе опознаки следует размещать через восемь базисов.

При съемке малоконтурных районов (лесных, песчаных пустынь и др.) нельзя рассчитывать на размещение опознаков на естественных контурных точках. В этом случае на местности до производства аэрофотосъемки создаются замаркированные искусственные знаки, отчетливо изображающиеся на аэроснимках. Рабочий проект расположения искусственных знаков составляется по аэроснимкам предварительного залета или по имеющимся топографическим картам.

§ 97. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ РАБОТ

Съемку рельефа при комбинированном методе, как правило, производят на фотоплане, используя при этом не мозаичный фотоплан, а светокопию (репродукцию) фотоплана, изготовленную на полуматовой или матовой фотобумаге. Во избежание деформации фотобумага предварительно наклеивается на лист алюминия.

При съемке рельефа на фотопланах полевые работы выполняются в два полевых сезона: в первый — производится плановая привязка аэроснимков, во второй — съемка рельефа на фотопланах и дешифрирование.

Если полевые работы необходимо выполнить в один полевой сезон, съемку рельефа и дешифрирование производят на фотосхемах или отдельных аэроснимках. Но съемка рельефа при этом осложняется: приходится определять масштаб отдельных аэроснимков, пользоваться клиновым масштабом или пропорциональным циркулем для откладывания на аэроснимках измеренных расстояний до пикетных точек, кроме того, нужно производить сводку горизонталей по границам площадей смежных аэроснимков.

Съемка рельефа на фотопланах более производительна, чем при мензульной съемке. Проведение горизонталей упрощается благодаря изображению на фотопланах таких форм рельефа, как овраги, обрывы, промоины, а также благодаря изображению гидрографической сети. Сокращается и количество пикетных точек, необходимых для проведения горизонталей. Предварительный стереоскопический просмотр аэроснимков * позволяет заранее наметить скелет рельефа и точки, высоты которых нужно определить. Так как точки основных высотных и съемочных ходов размещаются, как правило, на контурных точках местности, отпадает необходимость в применении геодезических способов определения положения точки стояния мензулы на фотоплане; она определяется простым опознаванием контурной точки, на которой расположена мензула. Горизонтали на светокопии фотоплана вычерчивают карандашом.

Попутно со съемкой рельефа производят полевое дешифрирование. Результаты дешифрирования в условных знаках вычерчивают в поле на светокопиях фотопланов карандашом.

В зависимости от метода съемки рельефа местности (на фотопланах, на фотосхемах или отдельных аэроснимках) имеем две технологические схемы комбинированной съемки.

Первая технологическая схема предусматривает выполнение работ в следующей последовательности: аэрофотосъемка, плановая привязка аэроснимков, плановое сгущение опорной сети способами радиальной фототриангуляции или другими способами (см. гл. 21), фототрансформирование, изготовление мозаичного фотоплана и светокопий (репродукций), съемка рельефа на светокопиях и дешифрирование, подготовка оригинала карты.

По второй схеме съемку рельефа и дешифрирование производят на фотосхемах или отдельных аэроснимках, поэтому все полевые работы (плановая и высотная привязки, съемка рельефа и дешифрирование) выполняются в один полевой сезон.

Фотограмметрические работы дополняются новым процессом — перенесением горизонталей и результатов дешифрирования с фотосхем или отдельных аэроснимков на светокопии фотопланов. Делается это или визуально, если местность богата контурами, или с помощью стереоскопов.

---

* Топограф располагает комплектом контактных отпечатков и топографическим стереоскопом.

Глава 14

АНАЛИЗ ПАРЫ СНИМКОВ

§ 98. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

На рис. 181 изображена пара снимков $P_1 - P_2$ в положении, которое она занимала во время фотографирования. A — точка объекта, изобразившаяся на этих снимках.

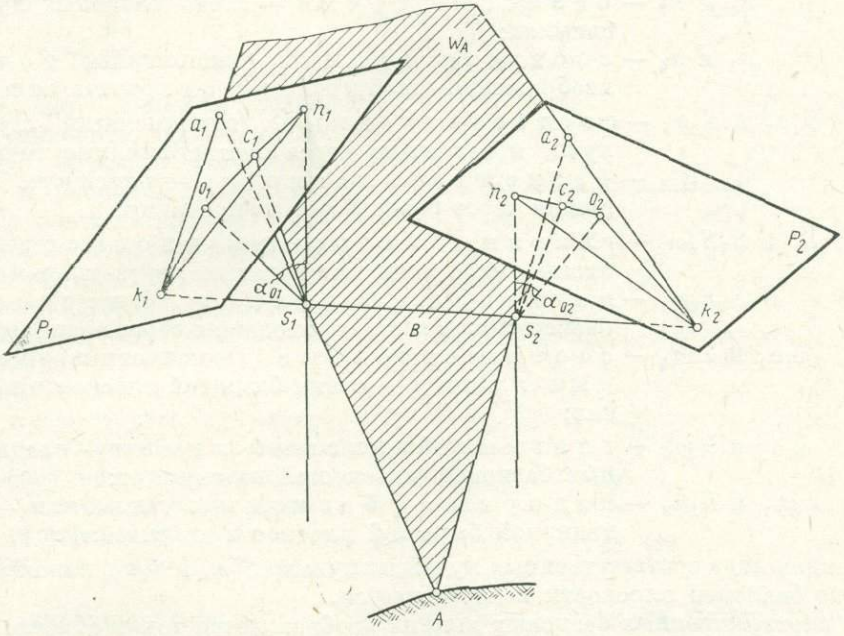


Рис. 181

На рисунке представлены элементы стереопары:

S_1 и S_2 — точки фотографирования — точки пространства, в которых находились центры проекции во время фотографирования объекта;

$B = S_1S_2$ — базис фотографирования — расстояние между точками фотографирования;

$S_1o_1a_1 \ldots$ и $S_2o_2a_2$ — связки — совокупность проектирующих лучей, проходящих через центры проекции;

S_1o_1 и S_2o_2 — главные лучи — лучи связок, перпендикулярные к снимкам;

S_1n_1 и S_2n_2 — надирные лучи — отвесные лучи;

S_1S_2 и S_2S_1 — базисные лучи — лучи, совпадающие с базисом фотографирования;

f — фокусное расстояние — расстояние от центра проекции до снимка;

o_1 и o_2 — главные точки — точки пересечения главных лучей со снимками;

n_1 и n_2 — точки надира — следы отвесных лучей на снимках;

α_{01} и α_{02} — углы наклона снимков — углы между надирными и главными лучами;

c_1 и c_2 — точки нулевых искажений — следы на снимках, образуемые биссектрисами углов наклона снимков;

k_1 и k_2 — базисные точки — следы базисных лучей на снимках;

a_1 и a_2 — соответственные (одноименные) точки — изображения одной и той же точки объекта на снимках;

S_1a_1 и S_2a_2 — соответственные (одноименные) лучи — лучи, проходящие через соответственные точки;

W_A — базисная плоскость — плоскость, проходящая через базис фотографирования;

$S_1S_2o_1$ и $S_1S_2o_2$ — главные базисные плоскости — базисные плоскости, проходящие через главные лучи;

$S_1S_2n_1n_2$ — надирная базисная плоскость — базисная плоскость, проходящая через надирные лучи;

k_1a_1 и k_2a_2 — соответственные (одноименные) базисные линии — следы базисной плоскости на снимках;

k_1o_1 и k_2o_2 — главные базисные линии — следы главных базисных плоскостей на снимках;

k_1n_1 и k_2n_2 — надирные базисные линии — следы надирной базисной плоскости на снимках.

Каждая пара соответственных лучей, например S_1a_1 и S_2a_2, лежит в одной и той же базисной плоскости и пересекается.

На соответственных базисных линиях изображаются точки объекта, лежащие в базисной плоскости, которая образует эти линии. Например, на соответственных базисных линиях k_1a_1 и k_2a_2 изображаются точки объекта, лежащие в базисной плоскости W_A.

На рис. 182 представлены стереопара $P_1 - P_2$ и объект. A, B, C, D — точки объекта, a_1, b_1, c_1, d_1 и a_2, b_2, c_2, d_2 — их изображения на снимках.

Пусть одна связка, например правая, вместе со своим снимком движется по направлению к левой связке. При этом центр проекции не сходит с базиса и связка перемещается параллельно самой себе. В этом случае каждый проектирующий луч подвижной связки остается параллельным своему исходному положению и находится в одной и той же базисной плоскости. Таким образом, пересечение одноименных лучей нигде не будет нарушено. Например, луч S_2A, скользя в плоскости S_1S_2A, пересекается с лучом S_1A.

Пусть движение связки прекратилось и центр проекции S_2 занял положение S_2'. Так как пересечение соответственных лучей сохранилось, то каждой точке объекта соответствует новая точка. Так, точке A соответствует точка a. Очевидно, новых точек, образованных пересечениями соответственных лучей, появится столько, сколько точек изобразилось на стереопаре.

Поверхность, образованная совокупностью точек пересечения соответственных лучей, называется стереомоделью или моделью.

Так как в результате построения модели изложенным выше способом углы между базисными плоскостями получились такими же, какими они были при фотографировании, а треугольники, образованные базисом и каждой парой лучей, подобны соответствующим треугольникам, имевшим место при фотографировании, например треугольники S_1S_2A и $S_1S_2'a$, то модель подобна объекту.

Расстояние между центрами проекции двух связок, по которым построена модель, называется базисом проектирования ($B' = S_1S_2'$).

Масштаб модели равен отношению базиса проектирования к базису фотографирования

$$\frac{1}{t} = \frac{B'}{B}. \qquad (14.1)$$

Итак, пара снимков позволяет восстановить связки, существовавшие во время фотографирования, и расположить их так, чтобы все соответственные лучи обеих связок попарно пересекались. В результате такой установки снимков и связок образуется модель объекта, изобразившегося на стереопаре.

Связки восстанавливают с помощью проектирующих камер, фокусное расстояние которых равно фокусному расстоянию снимков. Восстановление связок проектирующих лучей называется внутренним ориентированием снимков.

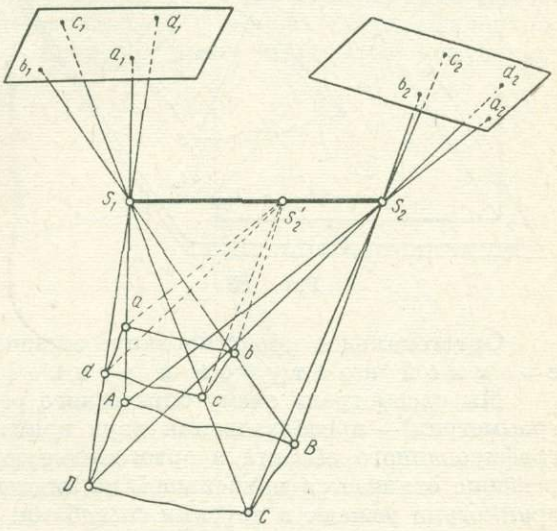


Рис. 182

Проектирующие камеры с восстановленными связками перемещают относительно друг друга, устанавливая их так, чтобы соответственные лучи пересекались. Если это условие выполнено, то снимки занимают такое взаимное положение, какое было во время съемки. Установка снимков в положение, которое они занимали относительно друг друга во время фотографирования, называется взаимным ориентированием снимков.

В результате взаимного ориентирования снимков получается модель объекта в произвольном масштабе, так как базис проектирования устанавливается обычно произвольно.

Чтобы использовать модель для создания плана или карты объекта, необходимо привести ее к заданному масштабу и ориентировать относительно планшета. Для решения этой задачи надо иметь не менее трех опорных точек. Опорные точки наносят на планшет по их координатам в масштабе составляемой карты.

На рис. 183 $X_\Gamma Y_\Gamma Z_\Gamma$ геодезическая система координат, a_0, b_0, c_0, d_0 — опорные точки, нанесенные на планшет. Над опорными точками устанавливают марки a, b, c, d так, чтобы разности высот их были равны разностям высот соответствующих точек объекта, выраженным в масштабе карты. Затем две опорные точки, например a и d, совмещают с соответствующими точками модели. Для этого изменяют масштаб модели путем параллельного смещения одной

проектирующей камеры вдоль базиса S_1S_2' и перемещают модель относительно планшета.

Если две точки модели совмещены с соответствующими опорными точками, то масштаб модели равен заданному. Для окончательного ориентирования модели относительно планшета достаточно повернуть модель вокруг прямой *ad* до совмещения опорной точки *c* с соответствующей точкой модели.

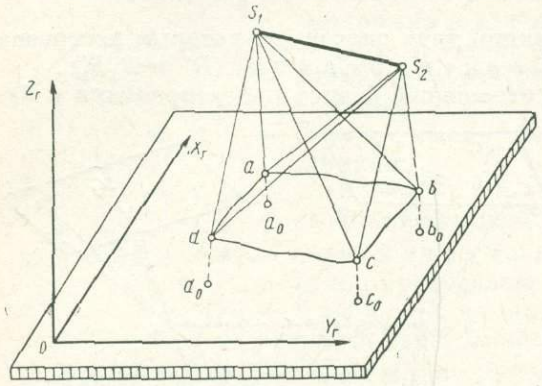


Рис. 183

Приведение модели к заданному масштабу и установка ее относительно планшета (геодезической системы координат) называется внешним ориентированием модели.

Карту составляют путем проектирования контуров и горизонталей модели на планшет. Это выполняется с помощью подвижной марки, с которой связан карандаш, вычерчивающий ортогональную проекцию элементов модели на планшете.

Ортогональное проектирование элементов модели на планшет называется съемкой контуров и рельефа.

Мы рассмотрели схему оптического решения основной задачи стереофотограмметрии — преобразования двух центральных проекций (снимков) сфотографированного объекта в ортогональную проекцию — план или карту. Это решение отличается наибольшей наглядностью. Основную задачу стереофотограмметрии решают и другими способами: аналитическим, графическим, механическим, оптико-механическим, электрическим и электронным.

§ 99. КООРДИНАТЫ И ПАРАЛЛАКСЫ ТОЧЕК СТЕРЕОПАРЫ

Положение соответственных точек на паре аэроснимков определяют в прямоугольных плоских системах координат. Эти системы обозначают через $o_1'x_1y_1$ и $o_2'x_2y_2$ (рис. 184). Начала координат o_1' и o_2' находятся в пересечении прямых, соединяющих координатные метки *1*, *2* и *3*, *4*. Ось x совмещают с прямой *1—2*.

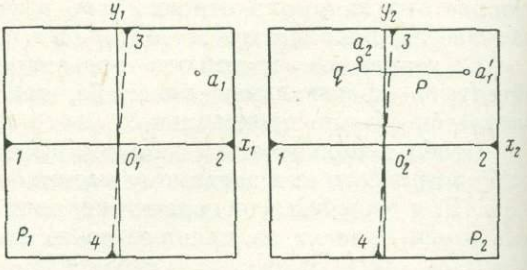


Рис. 184

Обозначим координаты соответственных точек пары снимков, например точек a_1 и a_2 через x_1, y_1 и x_2, y_2.

Разность абсцисс соответственных точек стереопары называется продольным параллаксом

$$p = x_1 - x_2, \tag{14.2}$$

а разность ординат этих точек — поперечным параллаксом

$$q = y_1 - y_2. \tag{14.3}$$

Пусть левый снимок стереопары наложен на правый так, что системы координат обоих снимков совпали. Тогда продольный параллакс представляет собой проекцию расстояния между соответственными точками a_1 и a_2 на ось x, а поперечный — проекцию этого расстояния на ось y.

§ 100. ЭЛЕМЕНТЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПАРЫ АЭРОСНИМКОВ

Элементы внутреннего ориентирования аэроснимка — фокусное расстояние фотокамеры f и координаты главной точки x_0 и y_0. Они позволяют найти положение центра проекции относительно снимка и восстановить связку лучей, существовавшую в момент фотографирования объекта. В аэрофотосъемке левый и правый снимки стереопары получаются

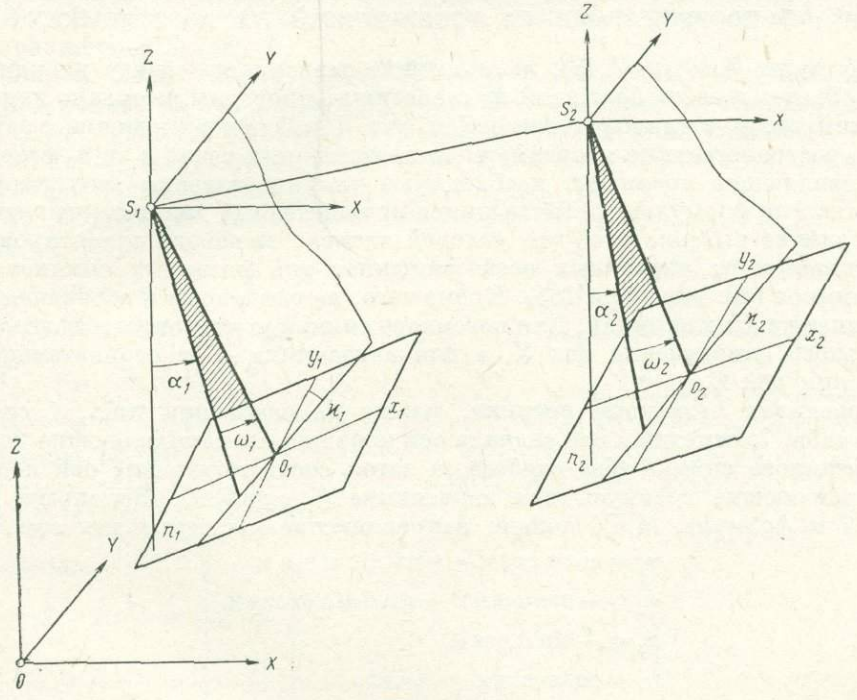


Рис. 185

обычно одним фотоаппаратом. Поэтому можно считать, что элементы внутреннего ориентирования этих снимков одинаковы.

Элементы внешнего ориентирования пары аэроснимков определяют положение левой и правой связок во время фотографирования. К ним относятся:

X_{S_1}, Y_{S_1}, Z_{S_1} — координаты левой точки фотографирования S_1 (рис. 185);

X_{S_2}, Y_{S_2}, Z_{S_2} — координаты правой точки фотографирования S_2;

α_1 — продольный угол наклона левого снимка — заключен между осью Z и проекцией главного луча на плоскость XZ;

ω_1 — поперечный угол наклона левого снимка — составлен главным лучом с плоскостью XZ;

$\varkappa_1$ — угол поворота левого снимка — находится в плоскости левого снимка и заключен между осью y и следом плоскости, проходящей через главный луч и ось Y;

α_2, ω_2, $\varkappa_2$ — продольный и поперечный углы наклона и угол поворота правого снимка.

Таким образом, пара аэроснимков имеет три элемента внутреннего ориентирования и 12 элементов внешнего ориентирования.

§ 101. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ТОЧКИ ОБЪЕКТА И КООРДИНАТАМИ ЕЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА АЭРОСНИМКАХ

Формулы (4.11) и (4.13), выражающие зависимость между координатами точки объекта и ее изображений на стереопаре, пригодны не только для наземных снимков, но и для аэроснимков (см. рис. 44). Однако входящие в равенства (4.13) пространственные координаты соответственных точек a_1 и a_2 стереопары и направляющие косинусы, необходимые для определения этих координат, вычисляют по формулам, отличающимся от выведенных для наземных снимков. Это различие вызвано тем, что угловой элемент внешнего ориентирования α отсчитывается от различных осей координат для наземных снимков и для аэроснимков (см. рис. 40 и 185). Кроме того, не одинаковы и обозначения осей координат на этих снимках. Для наземного снимка угол α отсчитывают от положительного направления оси Y, а для аэроснимка — от отрицательного направления оси Z.

Сравнивая названные рисунки, можно на основании табл. 1 составить новую табл. 7, отметив в ней сначала оси координат и направляющие косинусы для наземного снимка (без скобок), а затем соответствующие оси координат и направляющие косинусы для аэроснимка (в скобках). Используя данные табл. 7 и формулы (4.6), найдем направляющие косинусы для аэроснимка

$$\left.\begin{aligned}
a_1 &= \cos\alpha\cos\varkappa - \sin\alpha\sin\omega\sin\varkappa \\
a_2 &= -\cos\alpha\sin\varkappa - \sin\alpha\sin\omega\cos\varkappa \\
a_3 &= -\sin\alpha\cos\omega \\
b_1 &= \cos\omega\sin\varkappa \\
b_2 &= \cos\omega\cos\varkappa \\
b_3 &= -\sin\omega \\
c_1 &= \sin\alpha\cos\varkappa + \cos\alpha\sin\omega\sin\varkappa \\
c_2 &= -\sin\alpha\sin\varkappa + \cos\alpha\sin\omega\cos\varkappa \\
c_3 &= \cos\alpha\cos\omega
\end{aligned}\right\}. \qquad (14.4)$$

Таблица 7

Оси	x' (x')	y' ($-z'$)	z' (y')
X (X)	a_1 (a_1)	a_2 ($-a_3$)	a_3 (a_2)
Y ($-Z$)	b_1 ($-c_1$)	b_2 (c_3)	b_3 ($-c_2$)
Z (Y)	c_1 (b_1)	c_2 ($-b_3$)	c_3 (b_2)

Используя табл. 7 и учитывая, что координата z' точки аэроснимка равна $-f$, а координаты x' и y' равны $x - x_0$ и $y - y_0$, получим формулы для определения пространственных координат этой точки

$$\left.\begin{aligned} X' &= a_1(x-x_0)+a_2(y-y_0)-a_3 f \\ Y' &= b_1(x-x_0)+b_2(y-y_0)-b_3 f \\ Z' &= c_1(x-x_0)+c_2(y-y_0)-c_3 f \end{aligned}\right\}. \qquad (14.5)$$

Формулы (4.11) и (4.13) получены для общего случая, когда элементы внешнего ориентирования снимков могут иметь любые значения.

Перейдем к частному случаю съемки, в котором снимки горизонтальные и получены с одной и той же высоты (рис. 186). При этом оси координат x_1 и x_2 параллельны базису B.

Принимая левый конец базиса за начало фотограмметрической системы координат, совместим ось X с базисом, а ось Z — с главным лучом левой связки. В этом случае угловые элементы внешнего ориентирования снимков $\alpha = \omega = \varkappa = 0$, а координаты точки S_2 $X_0 = B$, $Y_0 = Z_0 = 0$. Полагая, что координаты главной точки снимка $x_0 = y_0 = 0$, по формулам (14.4) и (14.5) получим

$$a_1 = b_2 = c_3 = 1,$$

$$a_2 = a_3 = b_1 = b_3 = c_1 = c_2 = 0;$$

$$X_1' = x_1; \quad Y_1' = y_1; \quad Z_1' = -f;$$

$$X_2' = x_2; \quad Y_2' = y_2; \quad Z_2' = -f.$$

Согласно (4.13)

$$N = \frac{Z_0 X_2' - X_0 Z_2'}{Z_1' X_2' - X_1' Z_2'} = \frac{B}{x_1 - x_2} = \frac{B}{p},$$

следовательно,

$$\left.\begin{aligned} X &= B\frac{x_1}{p} = -Z\frac{x_1}{f} \\ Y &= B\frac{y_1}{p} = -Z\frac{y_1}{f} \\ Z &= -B\frac{f}{p} \end{aligned}\right\}. \qquad (14.6)$$

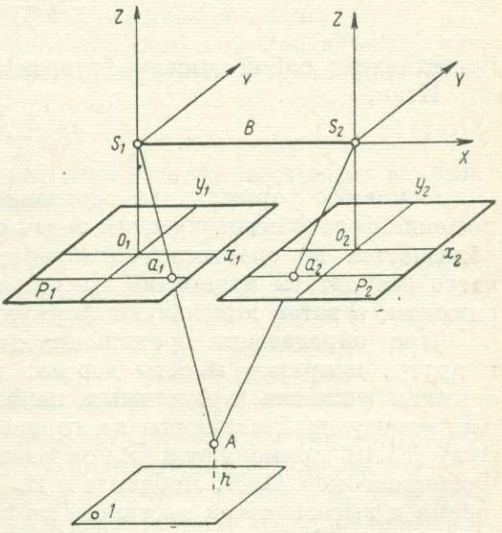


Рис. 186

В частном случае, когда объект съемки, например местность, представляет собой горизонтальную плоскость ($Z = \text{const}$), продольный параллакс на данной паре горизонтальных снимков — величина постоянная. Она равна базису фотографирования, выраженному в масштабе снимка

$$p = -\frac{f}{Z}B = \frac{f}{H}B. \qquad (14.7)$$

Пусть $Z_{\text{г}S_1}$ — геодезическая высота точки фотографирования S_1. Тогда высота точки A местности

$$Z_{\text{г}} = Z_{\text{г}S_1} + Z,$$

где Z — фотограмметрическая координата точки A, вычисленная по формуле (14.6). Если известна высота опорной точки *1*, изобразившейся на стереопаре, то высота точки A

$$Z_г = Z_{г1} + h, \tag{14.8}$$

где h — превышение точки A над опорной точкой *1*

$$h = Z - Z_1.$$

Подставим сюда значения Z и Z_1, которые найдем по формуле (14.6)

$$h = -Bf\left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p_1}\right) = -B\frac{f}{p_1}\frac{\Delta p}{p},$$

здесь

$$\Delta p = p - p_1 \tag{14.9}$$

— разность продольных параллаксов определяемой и данной точек.

Величина

$$-B\frac{f}{p_1} = Z_1 = H_1$$

представляет собой высоту фотографирования над опорной точкой *1*.

Итак,

$$h = H_1\frac{\Delta p}{p} = H_1\frac{\Delta p}{p_1 + \Delta p}. \tag{14.10}$$

Основные формулы для горизонтальных снимков очень простые. Поэтому решение фотограмметрических задач по горизонтальным снимкам значительно облегчается по сравнению с обработкой наклонных снимков. На практике часто результаты измерений наклонных снимков приводят к горизонтальным снимкам, а затем используют формулы (14.6) и (14.8).

При определении превышения двух точек, расположенных близко друг к другу, например высоты дерева, дома, обрыва, измеренная на плановых снимках разность продольных параллаксов практически не отличается от соответствующей величины на горизонтальных снимках. В этом случае формулу (14.10) применяют и для определения превышений по плановым снимкам. Фотовысотомер А. Н. Лобанова и И. И. Шелягина позволяет измерять превышения и высоты точек местности по горизонтальным и плановым снимкам без вычисления. Он состоит из двух измерительных марок, нанесенных на стеклянных пластинках и связанных с механизмом, решающим уравнения (14.10) и (14.8). Фотовысотомер устанавливается на снимки, наблюдаемые с помощью стереоскопа. Высота точки местности отсчитывается по счетчику после наведения стереоскопической марки на соответствующую точку модели.

С геометрической точки зрения горизонтальный снимок отличается от плана местности только смещениями за рельеф. Эти смещения точек снимка направлены к точке надира или от нее и определяются формулой (9.30)

$$\delta_h = \frac{h}{H_1}r_1,$$

где h — превышение точки местности над горизонтальной плоскостью, принятой за начальную, например над горизонтальной плоскостью, проходящей через опорную точку *1* (см. рис. 186); H_1 — высота фотографирования над

начальной плоскостью; r — радиус-вектор на снимке, соединяющий точку надира с определяемой точкой.

Подставим в эту формулу значение h из (14.10). Получим

$$\delta_h = \frac{\Delta p}{p} r. \tag{14.11}$$

Составляющие этого смещения по координатным осям x и y найдем по формулам

$$\left.\begin{aligned} \delta x &= \frac{\Delta p}{p} x \\ \delta y &= \frac{\Delta p}{p} y \end{aligned}\right\}. \tag{14.12}$$

Итак, по паре горизонтальных снимков можно составить план местности, если известна геодезическая высота хотя бы одной точки сфотографированного на стереопаре участка и высота фотографирования. Для решения этой задачи достаточно внести поправки за рельеф в положения точек на левом или правом снимке. Чтобы ориентировать полученный таким образом план относительно геодезической системы координат, необходимо знать геодезические координаты X и Y *двух точек местности или точек фотографирования*.

Отметим еще одну существенную особенность пары горизонтальных снимков, полученных с одной высоты: на ней нет поперечных параллаксов и согласно (14.3)

$$q = y_1 - y_2 = 0. \tag{14.13}$$

Из общих формул (4.13) можно вывести основные формулы для горизонтальных снимков, полученных с разных высот

$$\left.\begin{aligned} X = Nx_1; \quad Y = Ny_1; \quad Z = -Nf \\ N = \frac{B_X + \frac{x_2}{f} B_Z}{x_1 - x_2} \end{aligned}\right\} \tag{14.14}$$

§ 102. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОДИНОЧНОГО АЭРОСНИМКА

Из формул (14.6) можно вывести зависимости между координатами точки объекта и координатами ее изображения на одиночном аэроснимке.

Учитывая, что для точки горизонтального снимка $x = X'$, $y = Y'$ и $Z' = -f$, и опуская индекс 1, представим первые две формулы (14.6) в таком виде:

$$\left.\begin{aligned} X &= Z \frac{X'}{Z'} \\ Y &= Z \frac{Y'}{Z'} \end{aligned}\right\}. \tag{14.15}$$

Если координаты центра проекции S не равны нулю и снимок наклонный, то в эти выражения следует подставить $X - X_S$; $Y - Y_S$; $Z - Z_S$ вместо X, Y, Z и значения X', Y', Z' из равенств (14.5). Тогда основные формулы для одиночного аэроснимка примут вид

$$\left.\begin{aligned} X - X_S &= (Z - Z_S) \frac{a_1 (x - x_0) + a_2 (y - y_0) - a_3 f}{c_1 (x - x_0) + c_2 (y - y_0) - c_3 f} \\ Y - Y_S &= (Z - Z_S) \frac{b_1 (x - x_0) + b_2 (y - y_0) - b_3 f}{c_1 (x - x_0) + c_2 (y - y_0) - c_3 f} \end{aligned}\right\}. \tag{14.16}$$

Итак, один снимок позволяет составить для каждой изобразившейся на нем точки два уравнения с тремя неизвестными — координатами X, Y, Z точки объекта. Отсюда следует, что данных одного снимка недостаточно для определения положения точки объекта. Координаты точки объекта можно найти по одиночному снимку лишь в частном случае, когда высота фотографирования $H = Z_S - Z$ известна и объект съемки представляет собой горизонтальную плоскость (равнинную местность).

Приведем формулы, выражающие обратную связь, т. е. зависимость между *координатами точки снимка и координатами соответствующей точки объекта*

$$\left.\begin{aligned} x - x_0 &= -f\frac{a_1(X-X_S)+b_1(Y-Y_S)+c_1(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S)+b_3(Y-Y_S)+c_3(Z-Z_S)} \\ y - y_0 &= -f\frac{a_2(X-X_S)+b_2(Y-Y_S)+c_2(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S)+b_3(Y-Y_S)+c_3(Z-Z_S)} \end{aligned}\right\}. \qquad (14.17)$$

Эти формулы широко используются для определения элементов ориентирования снимка, в пространственной фототриангуляции и для создания макетных снимков.

§ 103. СВЯЗЬ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ТОЧЕК И ПРОДОЛЬНЫМИ ПАРАЛЛАКСАМИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ СНИМКАХ

Получить строго горизонтальные снимки в процессе аэрофотосъемки пока невозможно. Однако можно перейти от координат точки, измеренных на наклонном снимке, к координатам соответствующей точки горизонтального снимка, если известны угловые элементы внешнего ориентирования наклонного снимка. Этот процесс называется трансформированием координат.

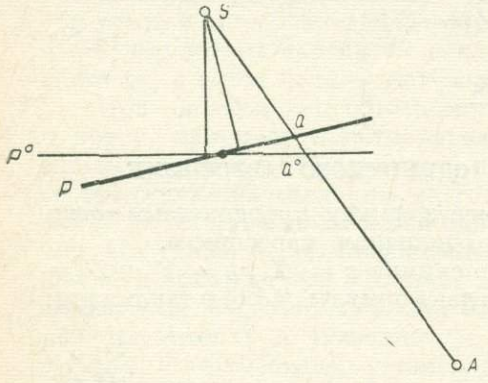


Рис. 187

Пусть x^0 и y^0 — координаты изображения точки A объекта на горизонтальном

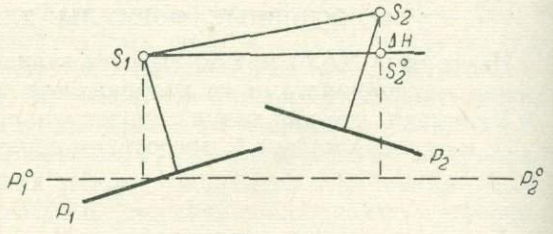


Рис. 188

снимке P^0, полученном с точки S (рис. 187), а x и y — координаты изображений той же точки на наклонном снимке, полученном с точки S.

Используя формулы (14.15), напишем

$$X = -Z\frac{x^0}{f} = Z\frac{X'}{Z'};$$

$$Y = -Z\frac{y^0}{f} = Z\frac{Y'}{Z'}.$$

Отсюда

$$\left.\begin{aligned} x^0 &= -f\frac{X'}{Z'} = -f\frac{a_1(x-x_0)+a_2(y-y_0)-a_3 f}{c_1(x-x_0)+c_2(y-y_0)-c_3 f} \\ y^0 &= -f\frac{Y'}{Z'} = -f\frac{b_1(x-x_0)+b_2(y-y_0)-b_3 f}{c_1(x-x_0)+c_2(y-y_0)-c_3 f} \end{aligned}\right\} \qquad (14.18)$$

Эти формулы пригодны при любых значениях угловых элементов внешнего ориентирования снимка.

Получим формулы трансформирования координат точек планового снимка. С этой целью сначала найдем направляющие косинусы для планового снимка. Угловые элементы внешнего ориентирования планового снимка α, ω и $\varkappa$ — величины малые. Поэтому можно разложить в ряды тригонометрические функции этих углов, входящие в формулы (14.4). Учитывая члены первого и второго порядка малости, получим

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= 1-\frac{1}{2}\alpha^2-\frac{1}{2}\varkappa^2 \\ a_2 &= -\varkappa-\alpha\omega \\ a_3 &= -\alpha \\ b_1 &= \varkappa \\ b_2 &= 1-\frac{1}{2}\omega^2-\frac{1}{2}\varkappa^2 \\ b_3 &= -\omega \\ c_1 &= \alpha+\omega\varkappa \\ c_2 &= \omega-\alpha\varkappa \\ c_3 &= 1-\frac{1}{2}\alpha^2-\frac{1}{2}\omega^2 \end{aligned}\right\}. \qquad (14.19)$$

Теперь подставим эти значения направляющих косинусов в формулы (14.18), полагая, что координаты главной точки x_0 и y_0 равны нулю. После преобразований будем иметь

$$\left.\begin{aligned} x^0 &= x+\left(f+\frac{x^2}{f}\right)\alpha+\frac{xy}{f}\omega-y\varkappa+x\left(1+\frac{x^2}{f^2}\right)\alpha^2+x\left(\frac{1}{2}+\frac{y^2}{f^2}\right)\omega^2- \\ &\quad -\frac{1}{2}x\varkappa^2+2\frac{x^2}{f^2}\alpha\omega-2\frac{xy}{f}\alpha\varkappa+\frac{x^2-y^2}{f}\omega\varkappa \\ y^0 &= y+\frac{xy}{f}\alpha+\left(f+\frac{y^2}{f}\right)\omega+x\varkappa+y\left(\frac{1}{2}+\frac{x^2}{f^2}\right)\alpha^2+y\left(1+\frac{y^2}{f^2}\right)\omega^2- \\ &\quad -\frac{1}{2}y\varkappa^2+x\left(1+\frac{2y^2}{f^2}\right)\alpha\omega+\frac{x^2-y^2}{f}\alpha\varkappa+2\frac{xy}{f}\omega\varkappa \end{aligned}\right\}. \qquad (14.20)$$

Обозначим через p продольный параллакс какой-либо точки объекта, изобразившейся на стереопаре плановых снимков P_1 и P_2 (рис. 188). Найдем продольный параллакс p^0 той же точки на горизонтальных снимках, показанных на рисунке пунктирными линиями. Центр проекции левого горизонтального снимка совпадает с центром проекции S_1 левого планового снимка. Центр проекции S_2 правого горизонтального снимка совмещен с ортогональной проекцией точки S_2 на горизонтальную плоскость, проходящую через S_1.

Как известно, продольный параллакс равен разности абсцисс соответственных точек

$$p^0 = x_1^0 - x_2^0. \tag{а}$$

Согласно (14.20)

$$x^0 = x + \left(f + \frac{x^2}{f}\right)\alpha + \frac{xy}{f}\omega - y\varkappa.$$

В правую часть этого выражения нужно ввести еще поправку за изменение высоты фотографирования. Из равенств (14.6) следует

$$x = -\frac{f}{Z}X = \frac{f}{H}X.$$

Продифференцируем это выражение по переменному H и перейдем к конечным величинам

$$\Delta x = -\frac{f}{H^2}X\,\Delta H = -x\frac{\Delta H}{H}.$$

Итак,

$$x^0 = x + \left(f + \frac{x^2}{f}\right)\alpha + \frac{xy}{f}\omega - y\varkappa + x\frac{\Delta H}{H}. \tag{14.21}$$

По этой формуле получим

$$\left.\begin{aligned} x_1^0 &= x_1 + \left(f + \frac{x_1^2}{f}\right)\alpha_1 + \frac{x_1y_1}{f}\omega_1 - y_1\varkappa_1 \\ x_2^0 &= x_2 + \left(f + \frac{x_2^2}{f}\right)\alpha_2 + \frac{x_2y_2}{f}\omega_2 - y_2\varkappa_2 + x_2\frac{\Delta H}{H} \end{aligned}\right\}. \tag{б}$$

На плановых снимках ординаты соответственных точек мало отличаются друг от друга. Поэтому при вычислении поправочных членов будем считать, что $y_1 = y_2$. Кроме того, вместо координаты x_1 подставим $x_2 + p$ в соответствии с (14.2). Тогда

$$x_1^0 = x_1 + \left(f + \frac{x_2^2}{f}\right)\alpha_1 + \frac{x_2y_2}{f}\omega_1 - y_2\varkappa_1 + 2x_2\frac{p}{f}\alpha_1 + \frac{p^2}{f}\alpha_1 + y_2\frac{p}{f}\omega_1,$$

$$x_2^0 = x_2 + \left(f + \frac{x_2^2}{f}\right)\alpha_2 + \frac{x_2y_2}{f}\omega_2 - y_2\varkappa_2 + x_2\frac{\Delta H}{H}.$$

Подставив эти величины в формулу (а), получим

$$p^0 = p - f\Delta\alpha + \frac{p^2}{f}\alpha_1 - \frac{x_2^2}{f}\Delta\alpha - \frac{x_2y_2}{f}\Delta\omega + y_2\left(\Delta\varkappa + \frac{p}{f}\omega_1\right) - x_2\left(\frac{\Delta H}{H} - 2\frac{p}{f}\alpha_1\right), \tag{14.22}$$

где

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1, \quad \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1, \quad \Delta\varkappa = \varkappa_2 - \varkappa_1.$$

Первая поправка к параллаксу p является постоянной для всех точек данной пары. Вторую поправку можно считать практически постоянной для данной пары, если рельеф небольшой. Остальные поправки переменные, величина их зависит от положения точки на снимках.

Формула (14.22) — приближенная и пригодна только для снимков с малыми углами наклона и поворота. Если эти углы значительны, то следует сначала трансформировать абсциссы соответственных точек по формуле (14.18), а затем вычислить параллакс p^0 как разность трансформированных абсцисс x_1^0 и x_2^0.

Глава 15

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ПАРАЛЛАКСОВ И СТЕРЕОРИСОВКА РЕЛЬЕФА НА СНИМКАХ

§ 104. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТЕРЕОМЕТРЕ

Основным прибором дифференцированного способа создания топографических карт, как отмечено в гл. 1, служит стереометр (рис. 189).

Стереометр изобретен Ф. В. Дробышевым для измерения исправленных разностей продольных параллаксов и проведения горизонталей на плановых снимках [11].

Идея стереометра заключается в следующем. Допустим, что в стереокомпараторе находятся горизонтальные снимки, полученные с одной и той же высоты,

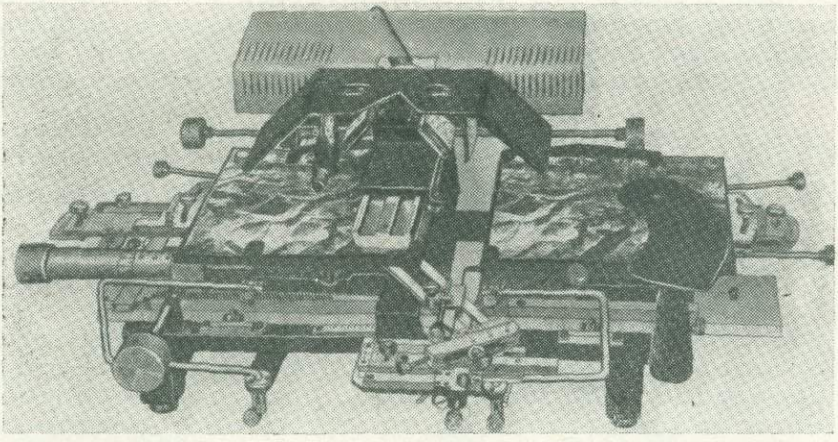


Рис. 189

т. е. снимки, соответствующие идеальному случаю съемки. Установим по шкале продольных параллаксов какой-либо отсчет. Затем, рассматривая снимки и не изменяя установленного отсчета, проведем пространственную марку по поверхности видимой модели. Если на каком-либо снимке, например на правом, зафиксировать след марки, то получим линию равных высот, т. е. горизонталь. Это следует из уравнений (14.8) и (14.10). Обозначив продольные параллаксы и разность их на горизонтальных снимках через p^0 и Δp^0, вместо (14.8) напишем

$$Z_r = Z_{r1} + H_1 \frac{\Delta p^0}{p_1^0 + \Delta p^0}. \qquad (15.1)$$

Теперь предположим, что вместо горизонтальных снимков в стереокомпаратор заложены плановые снимки и что при постоянном отсчете по шкале продольных параллаксов мы провели пространственную марку по поверхности видимой модели. В данном случае след марки на снимке не является горизонталью, так как разности продольных параллаксов на плановых снимках искажены вследствие влияния углов наклона снимков и других отличий от идеального случая съемки. Чтобы этот след был горизонталью, достаточно в процессе

проведения марки по модели перемещать один снимок относительно другого на величины, равные поправкам за искажения разности продольных параллаксов.

В стереометре эта задача решается с помощью коррекционных механизмов.

Таким образом, стереометр представляет собой стереокомпаратор с коррекционными механизмами, с помощью которых разности продольных параллаксов на плановых снимках трансформируются, т. е. приводятся к идеальному случаю съемки.

Чтобы на стереометре измерять разности продольных параллаксов, соответствующие идеальному случаю съемки, необходимо правильно установить снимки и коррекционные механизмы.

Ориентирование снимков на стереометре можно производить по установочным величинам или по опорным высотным точкам. Установочные величины вычисляются по элементам ориентирования снимков. Высоты опорных точек определяются в поле или путем построения фотограмметрических сетей.

В стереометре измерительными марками служат тонкие нити, натянутые над снимками приблизительно перпендикулярно начальным направлениям. Разности продольных параллаксов можно исправлять не только изменением относительного положения снимков, но и изменением взаимного положения нитей.

По исправленным с помощью стереометра разностям продольных параллаксов вычисляют высоты точек местности, используя формулу (15.1), предварительно определив для данной стереопары высоту фотографирования и продольный параллакс начальной точки.

Горизонталь проводят на правом снимке после установки соответствующего отсчета по шкале продольных параллаксов. С этой целью на снимке последовательно соединяют точки, которые соответствуют сечению модели стереоскопической нитью, наблюдаемому при перемещении общей каретки стереометра вдоль начального направления. Очевидно, горизонтали, как и контуры на снимке, получаются в центральной проекции. Для составления карты снимок с нанесенными на нем горизонталями трансформируют. Трансформирование выполняют по опорным точкам, с помощью проектора или фототрансформатора, позволяющих получать оптическое изображение снимка на планшете. Это изображение вычерчивают. С целью уменьшения на карте ошибок за рельеф снимок трансформируют по зонам.

Советский дифференцированный способ составления карты широко использовался при картографировании территории СССР в масштабе 1 : 100 000 и крупнее. Он имеет существенное преимущество перед американским дифференцированным способом Брокка, так как не требует высокоточного фототрансформирования снимков.

Автору стереометра Ф. В. Дробышеву присуждена Государственная премия.

§ 105. УРАВНЕНИЕ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКОВ НА СТЕРЕОМЕТРЕ

Выведем уравнение ориентирования снимков на стереометре. Это уравнение выражает зависимость между разностью продольных параллаксов на горизонтальных снимках и соответствующей разностью продольных параллаксов на плановых снимках. Оно решается коррекционными механизмами прибора.

В предыдущей главе получена зависимость (14.22) между продольными параллаксами на горизонтальных и плановых снимках.

Пусть главная точка второго снимка принята за начальную. Обозначим через p_1 продольный параллакс этой точки на плановых снимках. Тогда для продольного параллакса любой другой точки стереопары, например точки a, можно написать равенство

$$p = p_1 + \Delta p, \tag{15.2}$$

где Δp — *разность продольных параллаксов точки a и начальной точки.*

Учитывая равенство (15.2), представим зависимость (14.22) между p^0 и p в таком виде:

$$p^0 = p - f\,\Delta\alpha + \frac{p_1^2}{f}\alpha_1 + 2\frac{p_1}{f}\Delta p\alpha_1 + \frac{\Delta p^2}{f}\alpha_1 - \frac{x_2^2}{f}\Delta\alpha -$$

$$- \frac{x_2 y_2}{f}\Delta\omega - y_2\left(\Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1 - \frac{\Delta p}{f}\omega_1\right) - \frac{x_2}{f}\left(f\frac{\Delta H}{H} - 2p_1\alpha_1 - 2\Delta p\alpha_1\right). \tag{а}$$

Член $(\Delta p^2/f)\alpha_1$ в дальнейшем учитывать не будем, так как он мал. Например, при $\Delta p = 5$ мм, $f = 100$ мм и $\alpha = 1°$ величина его меньше 5 мкм.

Для начальной точки ($x_2 = y_2 = \Delta p = 0$)

$$p_1^0 = p_1 - f\,\Delta\alpha + \frac{p_1^2}{f}\alpha_1. \tag{б}$$

Вычтем равенство (б) из равенства (а), обозначив $p^0 - p_1^0$ через Δp^0,

$$\Delta p^0 = \Delta p - \frac{x_2}{f}\left(f\frac{\Delta H}{H} - 2p_1\alpha_1 - 2\Delta p\alpha_1\right) - \frac{x_2^2}{f}\Delta\alpha -$$

$$- \frac{x_2 y_2}{f}\Delta\omega - y_2\left(\Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1 - \frac{\Delta p}{f}\omega_1\right) + 2\frac{p_1}{f}\Delta p\alpha_1. \tag{15.3}$$

Это и есть уравнение ориентирования снимков на стереометре.

Из выражения (15.3) следует, что поправки к разности продольных параллаксов Δp зависят от элементов ориентирования снимков и рельефа местности, а также от положения точки на снимке. Коррекционные механизмы учитывают все поправки, входящие в выражение (15.3), за исключением последней.

Поправки, вводимые коррекционными механизмами, разделим на две группы:

а) поправки первого порядка

$$\delta p' = -\frac{x_2}{f}\left(f\frac{\Delta H}{H} - 2p_1\alpha_1\right) - \frac{x_2^2}{f}\Delta\alpha - \frac{x_2 y_2}{f}\Delta\omega - y_2\left(\Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1\right); \tag{15.4}$$

б) поправки второго порядка

$$\delta p'' = 2x_2\frac{\Delta p}{f}\alpha_1 + y_2\frac{\Delta p}{f}\omega_1. \tag{15.5}$$

При небольшом рельефе поправками второго порядка можно пренебречь.

Таким образом,

$$\Delta p^0 = \Delta p + \delta p + 2\frac{p_1}{f}\Delta p\alpha_1, \tag{15.6}$$

где

$$\delta p = \delta p' + \delta p''.$$

Поправки в измеряемую разность продольных параллаксов в стереометре вводятся с помощью механизма продольной коррекции и механизма поперечной коррекции.

§ 106. ТЕОРИЯ КОРРЕКЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Главными частями стереометра являются основание O (рис. 190), общая каретка K, левая каретка K_1, правая каретка K_2, нити m_1 и m_2, параллактический винт M_p, мостик и стереоскоп (см. рис. 189).

Общая каретка перемещается вдоль продольной оси X прибора по направляющим, прикрепленным к основанию. Левая и правая каретки находятся на общей каретке и передвигаются тоже в продольном направлении: левая — параллактическим винтом M_p, а правая — продольным коррекционным механизмом. На левой и правой каретках расположены снимкодержатели, которые можно поворачивать в их плоскостях. Нити натянуты над снимкодержателями и служат для визирования на точки снимков. Мостик прикреплен к основанию прибора. Зеркально-линзовый стереоскоп смонтирован на мостике и имеет движение в поперечном направлении.

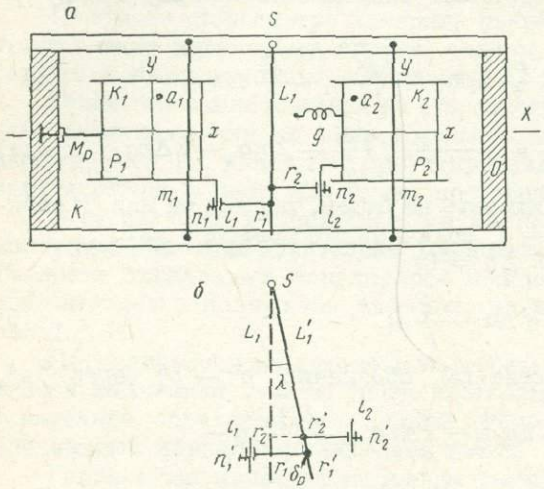


Рис. 190

Снимки в приборе устанавливают так, чтобы главные точки их совместились с соответствующими центрами вращения снимкодержателей, а начальные направления были параллельны продольной оси прибора.

Механизм продольной коррекции служит для введения в измеряемую разность продольных параллаксов поправок

$$\delta p_1 = -\frac{x_2}{f}\left(f\frac{\Delta H}{H} - 2p_1\alpha_1 - 2\Delta p\alpha_1\right) \tag{15.7}$$

и

$$\delta p_2 = -\frac{x_2^2}{f}\Delta\alpha. \tag{15.8}$$

Эти поправки вводятся путем смещения правой каретки относительно общей.

Механизм состоит из качающейся линейки L_1, направляющих линеек l_1 и l_2, ползушек n_1 и n_2 и роликов r_1 и r_2 (рис. 190, *а*). Линейка L_1 вращается вокруг оси S, прикрепленной к основанию прибора. Линейка l_1 связана с общей кареткой, а линейка l_2 — с правой кареткой. Ролики находятся на ползушках, скользящих вдоль линеек l_1 и l_2. С помощью пружины g, действующей на правую каретку, ролики неизменно соприкасаются с линейкой L_1 при любом положении общей каретки.

Качающаяся линейка перпендикулярна направляющей общей каретки, если последняя находится в начальном положении, т. е. если правая нить проходит через центр вращения правого снимкодержателя.

Если расстояния от оси вращения линейки L до центров роликов одинаковы ($Sr_1 = Sr_2$), то при передвижении общей каретки на какую-то величину

правый снимкодержатель переместится в том же направлении и на ту же величину, т. е. правый снимок не сместится относительно левого. Наоборот, если расстояния Sr_1 и Sr_2 различны, то возникнет относительное смещение снимков при движении общей каретки.

На рис. 190, *б* показано положение частей коррекционного механизма после наведения правой нити на точку a_2. Правый снимок сместится на величину r_2r_2', а левый — на величину r_1r_1'. Разность этих величин, очевидно, равна поправке к измеряемой разности продольных параллаксов.

Обозначим эту поправку через $\delta p_1'$, а расстояния Sr_2 и r_2r_1 — через F и $\Delta F'$. Из рисунка следует

$$\delta p_1' = \Delta F' \operatorname{tg} \lambda,$$

где λ — угол поворота качающейся линейки.

Положив $r_2r_2' = x_2$, получим

$$\delta p_1 = \frac{x_2}{F} \Delta F'. \tag{15.9}$$

Сравнивая (15.9) и (15.7), видим, что данный механизм решает уравнение (15.7) при условии

$$\Delta F' = \frac{F}{f}\left(f\frac{\Delta H}{H} - 2p_1\alpha_1 - 2\,\Delta p\alpha_1\right). \tag{15.10}$$

Здесь два первых члена в скобках — величины, постоянные для данной стереопары, третий — переменная величина, так как разность продольных параллаксов различна для различных точек. Следовательно, элемент $\Delta F'$ необходимо изменять в зависимости от изменения разности продольных параллаксов.

Эта задача решается путем перемещения ползушки n_1 и ролика r_1 с помощью дополнительного механизма, основной частью которого является линейка L_3 (рис. 191). Линейку L_3 можно поворачивать вокруг оси c_3, связанной с кареткой левого снимка K_1, и устанавливать под углом ν относительно оси X прибора. Если $\nu = 0$, то при передвижении параллактическим винтом каретки левого снимка ползушка n_1 и ролик r_1 не смещаются и элемент ΔF не изменяется. Если же $\nu \neq 0$, то ΔF изменяет свое значение.

Пусть стереоскопическая нить наведена на начальную точку, для которой $\Delta p = 0$. Сместим линейку L_3 относительно каретки левого снимка K_1 и установим ее так, чтобы ось c_3 находилась на оси линейки l_1. Далее скрепим линейку L_3 с кареткой K_1 и, перемещая ползушку n_2 с роликом r_2, введем величину ΔF, соответствующую начальной точке ($\Delta p = 0$). Теперь при перемещении параллактическим винтом каретки левого снимка элемент ΔF будет изменяться автоматически. Из рисунка следует, что

$$\delta F = \nu\,\Delta p.$$

Сравнивая это выражение с равенством (15.10), находим

$$\nu = 2\frac{F}{f}\alpha_1. \tag{5.11}$$

Для введения поправки за взаимный продольный угол наклона снимков механизм продольной коррекции имеет еще одну качающуюся линейку L_2, которую устанавливают под углом β относительно линейки L_1 (рис. 192).

На рис. 192, *а* представлено начальное положение общей каретки и коррекционного приспособления. Пусть ролики одинаково удалены от направляющих

общей каретки. Если $\beta = 0$, т. е. линейки L_1 и L_2 совмещены друг с другом, то смещение каждого снимка относительно основания прибора равно смещению общей каретки. Если же $\beta \neq 0$, то смещение правого снимка отличается от смещения общей каретки и левого снимка на величину, равную поправке за взаимный продольный угол наклона снимков.

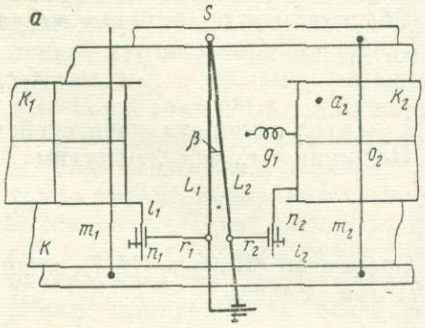
Для доказательства этого рассмотрим рис. 192, *б*, на котором пунктирными линиями показано начальное положение коррекционного механизма, а сплошными — положение его после наведения правой нити m_2 на точку a_2 правого снимка. Здесь r_1r_1' — путь, пройденный левым снимком, а r_2r_2' — путь, пройденный правым снимком. Положив $Sr_1 = F$, напишем

$$r_1r_1' = F \operatorname{tg} \lambda,$$

$$r_2r_2' = r_1r_2' - r_1r_2 =$$

$$= F \operatorname{tg}(\lambda + \beta) - F \operatorname{tg} \beta,$$

где λ — угол поворота линейки L_1 относительно начального положения.



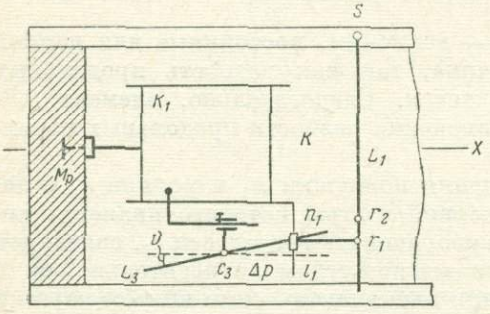


Рис. 191

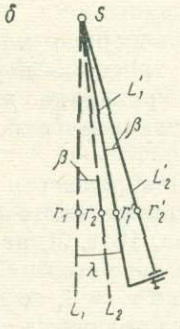


Рис. 192

Угол β мал, а отрезок r_1r_1' близок к x_2. Поэтому

$$r_2r_2' = F \operatorname{tg} \lambda + F\beta \sec^2 \lambda - F\beta = F \operatorname{tg} \lambda + F\beta \operatorname{tg}^2 \lambda = F \operatorname{tg} \lambda + \frac{x_2^2}{F} \beta.$$

Разность r_1r_1' и r_2r_2' равна поправке, которую вводит рассматриваемый коррекционный механизм

$$\delta p_2 = -\frac{x_2^2}{F} \beta. \tag{15.12}$$

Сравнивая это выражение с выражением (15.8), видим, что данный коррекционный механизм учитывает влияние взаимного продольного угла наклона снимков при условии, если

$$\beta = \frac{F}{f} \Delta\alpha. \tag{15.13}$$

Механизм поперечной коррекции служит для введения в измеряемую разность продольных параллаксов поправок

$$\delta p_3 = -\frac{x_2 y_2}{f}\Delta\omega \qquad (15.14)$$

и

$$\delta p_4 = -y_2\left(\Delta x - \frac{p_1}{f}\omega_1 - \frac{\Delta p}{f}\omega_1\right). \qquad (15.15)$$

Эти поправки учитываются поворотом правой нити.

Механизм состоит из держателя нити d рычагов r, R_1 и линейки L_4 (рис. 193, *а*). Держатель нити можно поворачивать вокруг оси c_2, прикрепленной к основанию прибора. Рычаг r скреплен с держателем d и составляет прямой угол с нитью m_2, а рычаг R_1 поворачивается вокруг оси c_2 и может быть установлен относительно рычага r под углом γ. Правый конец рычага R_1 благодаря пружине g_2 неизменно касается линейки L_4. Последняя вращается вокруг оси c_4 и устанавливается под углом θ относительно оси X прибора. Если нить m_2 проходит через центр правого снимкодержателя, то правый конец рычага R_1 находится на оси вращения линейки L_4.

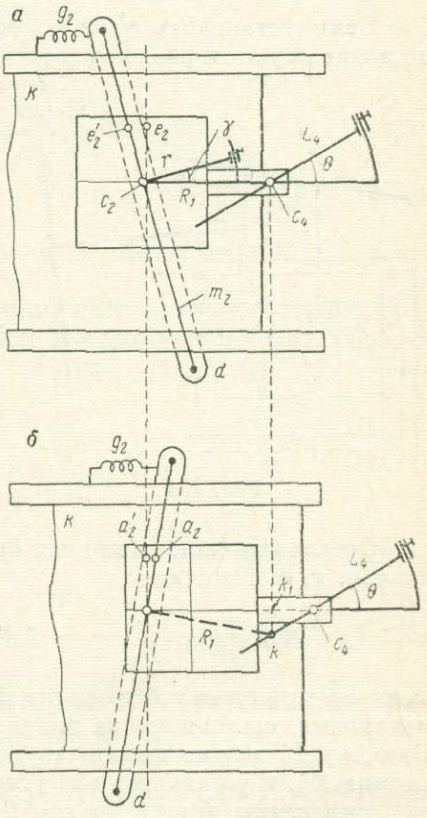


Рис. 193

Пусть $\gamma = 0$ и $\theta = 0$. Тогда рычаги r, R_2 и линейка L_4 будут параллельны, а нить m_2 будет перпендикулярна продольной оси прибора. В этом случае коррекционное приспособление не работает, т. е. не вводит никаких поправок, так как при любом положении общей каретки относительно основания прибора нить m_2 остается перпендикулярной к оси X.

Пусть $\gamma = 0$, а $\theta \neq 0$. Тогда правая нить будет перпендикулярна продольной оси прибора, если она проходит через центр правого снимкодержателя, т. е. если общая каретка находится в начальном положении. При смещении общей каретки относительно начального положения правая нить поворачивается на угол $\Delta\gamma$, величина которого зависит от угла θ и смещения общей каретки. В результате поворота правой нити в измеряемую разность продольных параллаксов вводится поправка (рис. 193, *б*)

$$\delta p_3 = a_2 a_2' = y_2 \Delta\gamma.$$

Из рисунка следует

$$\Delta\gamma = \frac{k_1 k}{R_1} \approx -\frac{x_2}{R_1}\theta,$$

где R_1 — длина рычага. Итак,

$$\delta p_3 = -\frac{x_2 y_2}{R_1}\theta. \tag{15.16}$$

Сравнивая это выражение с (15.14), получим

$$\theta = \frac{R_1}{f}\Delta\omega. \tag{15.17}$$

Если установить угол γ, то можно ввести только часть поправки δp_4, не зависящую от разности продольных параллаксов, а именно

$$\delta p_4' = -y_2\left(\Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1\right). \tag{15.18}$$

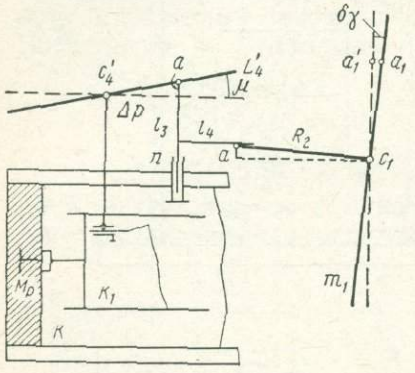


Рис. 194

Пусть $\gamma \neq 0$, а $\theta = 0$ (см. рис. 193, *а*). Тогда нить m_2 получает наклон относительно поперечной оси прибора. Этот угол сохраняется при движении общей каретки. Благодаря этому в измеряемую разность продольных параллаксов вводится поправка

$$\delta p_4' = l_2 l_2' = -y_2\gamma. \tag{15.19}$$

Сравнивая это выражение с (15.18), можно написать

$$\gamma = \Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1. \tag{15.20}$$

Остальная часть поправки δp_4, зависящая от разности продольных параллаксов, т. е. величина

$$\delta p_4'' = y_2\frac{\Delta p}{f}\omega_1, \tag{15.21}$$

учитывается путем поворота левой нити m_1 с помощью второго дополнительного механизма, состоящего из линейки L_4', линеек l_3 и l_4 и рычага R_2 (рис. 194). Линейку L_4' можно повернуть вокруг оси c_4', скрепленной с кареткой левого снимка K_1, и установить под углом μ относительно оси X прибора. Линейки l_3 и l_4 скреплены друг с другом под прямым углом. Нижняя часть линейки l_3 находится в направляющих, прикрепленных к общей каретке, а верхний ее конец неизменно касается линейки L_4'. Левая нить прикреплена к держателю, который можно поворачивать вокруг оси c_1, находящейся на основании прибора. С держателем нити скреплен рычаг R_2, конец которого соприкасается с линейкой l_4.

Если $\mu = 0$, то при передвижении каретки левого снимка параллактическим винтом линейки l_3 и l_4 остаются неподвижными, а нить m_1 — перпендикулярной к оси X прибора. Если же $\mu \neq 0$, то параллактическое движение каретки левого снимка вызывает смещение линеек l_3 и l_4, а также поворот рычага R_2 и нити m_1.

Пусть $\mu \neq 0$ и стереоскопическая нить наведена на начальную точку ($\Delta p = 0$). Сместим линейку L_4' относительно каретки K_1 и установим ее так, чтобы верхний конец линейки l_3 находился на оси c_4'. Затем скрепим линейку L_4' с кареткой K_1. В этом случае нить m_1 будет перпендикулярна оси X прибора.

В результате визирования на какую-либо точку модели каретка K_1 сместится относительно общей каретки K на величину Δp, конец линейки l_3 пройдет путь a по направляющим n, а рычаг R_2 и нить m_1 повернутся на угол

$$\delta\gamma = \frac{a}{R_2} = \frac{\Delta p_2}{R_2}\mu,$$

где R_2 — длина рычага.

Благодаря повороту нити в измеряемую разность продольных параллаксов вводится поправка

$$\delta p''_4 = a_1 a'_1 = y_1 \delta\gamma = y_1 \frac{\Delta p}{R_2}\mu. \tag{15.22}$$

Сравнив это выражение с выражением (15.21) и положив $y_1 = y_2$, можно написать

$$\mu = \frac{R_2}{f}\omega_1. \tag{15.23}$$

Дополнительные коррекционные механизмы предложены М. Д. Коншиным [21].

Выразим теперь поправки к разности продольных параллаксов через установочные величины коррекционных механизмов. Из равенств (15.13), (15.17), (15.11) и (15.23) следует

$$\left.\begin{aligned} \Delta\alpha &= \frac{f}{F}\beta; \quad \Delta\omega = \frac{f}{R_1}\theta \\ \alpha_1 &= \frac{1}{2}\frac{f}{F}\nu; \quad \omega_1 = \frac{f}{R_2}\mu \end{aligned}\right\}. \tag{15.24}$$

Учтя эти равенства, а также выражения (15.10) и (15.15), поправки (15.4) и (15.5) можно представить в виде

$$\delta p = \delta p' + \delta p'' = -\frac{x_2}{F}\Delta F - \frac{x_2^2}{F}\beta - \frac{x_2 y_2}{R_2}\theta - y_2\gamma + \frac{x_2}{F}\Delta p\nu + \frac{y_2}{R_2}\Delta p\mu. \tag{15.25}$$

Подставив это значение δp в выражение (15.6), получим уравнение ориентирования снимков на стереометре в таком виде:

$$\frac{x_2}{F}\Delta F - \frac{x_2}{F}\beta + \frac{x_2 y_2}{R_1}\theta + y_2\gamma - \frac{x_2}{F}\Delta p\nu - \frac{y_2}{R_2}\Delta p\mu - l = 0, \tag{15.26}$$

где

$$l = \Delta p - \Delta p^0 + 2\frac{p_1}{f}\Delta p\alpha_1. \tag{15.27}$$

§ 107. ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ ПО УСТАНОВОЧНЫМ ВЕЛИЧИНАМ

Процесс установки снимков и коррекционных механизмов в положение, при котором измеренные на стереометре разности продольных параллаксов соответствуют идеальному случаю съемки, называется ориентированием снимков.

Ориентировать снимки на стереометре можно двумя способами:

1) по установочным величинам;

2) по опорным высотным точкам.

Первый способ основан на предварительном определении элементов ориентирования снимков, а второй позволяет решать задачу, когда элементы ориентирования снимков неизвестны.

Пусть элементы ориентирования снимков, необходимые для определения установочных величин, нам известны. По формулам, выведенным в предыдущем параграфе, можно вычислить установочные величины коррекционных механизмов

$$\left.\begin{aligned}
\Delta F &= \frac{F}{f}\left(f\frac{\Delta H}{H} - 2p_1\alpha_1\right)\\
\beta &= \frac{F}{f}\Delta\alpha\\
\theta &= \frac{R_1}{f}\Delta\omega\\
\gamma &= \Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1\\
\nu &= 2\frac{F}{f}\alpha_1\\
\mu &= \frac{R_2}{f}\omega_1
\end{aligned}\right\}. \tag{15.28}$$

Установим снимки в стереометре по начальным направлениям. Затем введем величины (15.28) в соответствующие коррекционные механизмы. После этих действий снимки будут ориентированы, и, как следует из уравнения (15.27), мы легко найдем исправленные разности продольных параллаксов

$$\Delta p^0 = \Delta p' + 2\frac{p_1}{f}\Delta p\alpha_1, \tag{15.29}$$

где $\Delta p' = \Delta p + \delta p$ — измеренная на стереометре разность продольных параллаксов.

Подсчитывая поправку к $\Delta p'$, можно принять, что $\Delta p \approx \Delta p'$.

На практике снимки ориентируются обычно не по установочным величинам, а по опорным точкам. Это объясняется главным образом тем, что современные способы определения элементов внешнего ориентирования снимков в полете еще не обеспечивают точности, необходимой для стереофотограмметрической съемки.

§ 108. ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ ПО ШЕСТИ ТОЧКАМ

Идея ориентирования снимков на стереометре по опорным высотным точкам вытекает из анализа уравнения (15.26).

Пусть даны две опорные высотные точки. Тогда, приняв одну из них за начальную, можно составить уравнение (15.26). Величину Δp^0, входящую в свободный член l, найдем по высотам точек. Для этого воспользуемся формулой (14.10), из которой следует

$$\Delta p^0 = \frac{h}{H_1 - h}p_1^0. \tag{15.30}$$

Здесь H_1 — высота фотографирования над начальной опорной точкой; h — разность высот опорных точек.

Уравнение (15.26) содержит четыре независимых неизвестных: ΔF, β, θ и γ. Величины ν и μ зависят соответственно от ΔF и γ. Чтобы показать эту зависимость, найдем α_1 и ω_1 из первой и четвертой формул группы (15.28)

$$\alpha_1 = \frac{f}{2p_1}\left(\frac{\Delta H}{H} - \frac{\Delta F}{F}\right);$$

$$\omega_1 = \frac{f}{p_1}(\Delta\varkappa - \gamma).$$

Подставив найденные значения в последние формулы той же группы, получим

$$\left.\begin{aligned} \nu &= \frac{F}{p_1}\left(\frac{\Delta H}{H} - \frac{\Delta F}{F}\right) \\ \mu &= \frac{R_2}{p_1}(\Delta\varkappa - \gamma) \end{aligned}\right\} \qquad (15.31)$$

Входящую сюда величину ΔH можно получить, например, по показаниям статоскопа; элемент $\Delta\varkappa = 0$, так как снимки в стереометре устанавливаются по начальным направлениям.

Итак, две опорные точки позволяют составить одно уравнение (15.26) с четырьмя независимыми неизвестными. Каждая последующая опорная точка дает еще одно уравнение. Следовательно, для определения неизвестных необходимо иметь пять точек. Тогда можно составить четыре уравнения (15.26), решить их и найти неизвестные.

Если район равнинный или холмистый и влияние рельефа не превышает ошибок измерений, то при составлении уравнений (15.26) можно считать $\Delta p = 0$. В этом случае зависимые элементы ν и μ исчезают и уравнения решаются обычным путем.

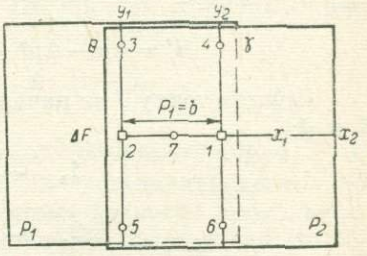


Рис. 195

Если же разности продольных параллаксов значительны, то уравнения можно решать путем последовательных приближений. Сначала решим их, положив $\Delta p = 0$. Полученные таким образом значения неизвестных будем считать первым приближением и найдем элементы ν и μ по формулам (15.31). Затем, учитывая влияние рельефа, вычислим новые значения свободных членов

$$l^* = \Delta p - \Delta p^0 + \frac{p_1}{f}\Delta p\nu + \frac{x_2}{f}\Delta p\nu + \frac{y_2}{R_2}\Delta p\mu, \qquad (15.32)$$

после чего составим новую систему уравнений. Решив эту систему, получим второе приближение независимых неизвестных и т. д. Так нужно действовать до тех пор, пока разности между двумя последними приближениями не будут равны заданным ошибкам определения неизвестных.

Опорные высотные точки необходимо выбирать так, чтобы обеспечивать:

1) возможно высокую точность ориентирования снимков;
2) простое и быстрое решение этой задачи;
3) контроль.

Исследования показывают, что этим условиям отвечает схема расположения точек, представленная на рис. 195, где пять точек являются необходимыми (*1*, *2*, *3*, *4* и *7*), а две — контрольными (*5* и *6*).

С целью сокращения количества опорных точек и облегчения ориентирования снимков элемент $\Delta\alpha$ находят по поперечным параллаксам, устанавливая в соответствии с этим элементом механизм продольной коррекции перед ориентированием снимков по опорным точкам. В этом случае в уравнении (15.26) будет только три неизвестных и для ориентирования снимков потребуется лишь четыре точки — *1—4*; точки *5* и *6* будут контрольными.

При сгущении опорной сети по снимкам каждую пару обеспечивают шестью высотными точками, которые используют для ориентирования снимков на стереометре, а также для контроля этого процесса (точки *1—6*). Кроме того, пользуются еще элементом $\Delta\alpha$.

При полевой подготовке каждой стереопары обычно определяются только четыре точки, расположенные по ее углам (точки *3*, *4*, *5* и *6*). В этом случае снимки ориентируют по четырем точкам и взаимному продольному углу их наклона $\Delta\alpha$, а контроль ориентирования осуществляют по взаимному поперечному их наклону $\Delta\omega$.

Рассмотрим ориентирование снимков по шести точкам.

Задача ориентирования снимков по опорным точкам будет решена, если мы найдем установочные элементы коррекционных механизмов стереометра.

Пусть известны высоты опорных точек *1—6* (см. рис. 195) и взаимный продольный угол наклона снимков $\Delta\alpha$. Для решения задачи воспользуемся уравнением (15.26), которое представим в виде

$$\frac{x_2}{F}\Delta F + \frac{x_2 y_2}{R_1}\theta + y_2\gamma - l' = 0, \tag{15.33}$$

где

$$l' = \Delta p - \Delta p^0 + \frac{p_1}{F}\Delta p\nu - \frac{x_2^2}{F}\beta + \frac{x_2}{F}\Delta p\nu + \frac{y_2}{R_2}\Delta p\mu. \tag{15.34}$$

Приняв точку *1* за начальную, напишем три уравнения (15.33) для точек *2*, *3* и *4*:

$$\begin{aligned}
&1. \quad -\frac{b}{F}\Delta F \qquad\qquad\qquad -l_2' = 0;\\
&2. \quad -\frac{b}{F}\Delta F - \frac{ab}{R_1}\theta + a\gamma - l_3' = 0;\\
&3. \qquad\qquad\qquad\quad a\gamma - l_4' = 0.
\end{aligned}$$

При вычислении свободных членов l' будем считать, что $\nu = \mu = 0$. Величину Δp^0 найдем по формуле (15.30).

Из уравнений 1 и 3 следует:

$$\left.\begin{aligned}
\Delta F &= -\frac{F}{b}l_2'\\
\gamma &= \frac{1}{a}l_4'
\end{aligned}\right\}. \tag{15.35}$$

Подставив найденные значения ΔF и γ в уравнение *2*, получим

$$l_2' - \frac{ab}{R_1}\theta + l_4' - l_3' = 0.$$

Отсюда

$$\theta = \frac{R_1}{ab}(l_2' - l_3' + l_4'). \tag{15.36}$$

Найденные таким путем значения установочных элементов ΔF, γ и θ являются первым приближением.

Теперь по формулам (12.31) вычислим углы ν и μ, а по формуле (12.34), учитывая найденные углы, получим новые значения свободных членов l'. Подставив новые значения свободных членов в выражения (15.35) и (15.36), найдем второе приближение установочных элементов ΔF, γ и θ. Затем можно вновь вычислить углы ν и μ, свободные члены l' и получить третье приближение величин ΔF, γ и θ и т. д.

Определив элементы ΔF, γ, θ, ν и μ, можно проконтролировать по точкам *5* и *6* решение задачи ориентирования. С этой целью подставим в равенство (15.33) *значения координат точки 5 и установочных элементов. Вследствие неизбежных* ошибок левая часть полученного таким путем равенства будет отличаться от правой. Если это расхождение не выйдет за допустимые пределы, то решение можно считать удовлетворительным. Аналогично осуществляется и контроль по точке *6*.

Изложенная здесь теория ориентирования снимков по шести точкам является обоснованием практических приемов.

Перед ориентированием снимков находят их взаимный продольный угол наклона $\Delta\alpha$ и по формуле (15.28) вычисляют установочный элемент β. Кроме того, определяют высоту фотографирования H_1 над начальной точкой и редуцированный продольный параллакс этой точки p_1. Затем вычисляют по формуле (15.30) исправленные разности продольных параллаксов Δp^0 для точек *2—6*.

Устанавливают снимки в стереометре так, чтобы их главные точки совпадали с центрами вращения соответствующих снимкодержателей, а начальные направления были параллельны оси X прибора. По шкалам коррекционных механизмов устанавливают элементы

$$\beta, \quad \Delta F = 0, \quad \theta = 0, \quad \gamma = 0, \quad \nu = 0 \quad \text{и} \quad \mu = 0,$$

учитывая места нулей этих шкал.

Затем приступают к ориентированию снимков по опорным точкам, т. е. к установке величин ΔF, γ, θ, ν и μ. При этом сначала устанавливают только три величины: ΔF, γ и θ, добиваясь, чтобы измеренные разности продольных параллаксов опорных точек были равны вычисленным. Из выражений (15.35) и (15.36) следует, что в общем случае несоответствия l между измеренными и вычисленными разностями продольных параллаксов на точке *2* зависят только от одной величины ΔF, на точке *4* — только от одной величины γ, на точке *3* — от трех величин: ΔF, γ и θ. Поэтому ориентирование снимков начинают с точек *2* и *3*, устраняя несоответствия l в этих точках установкой величин ΔF и γ. После этого несоответствие на точке *4* вызывается только одной величиной θ и легко уничтожается механизмом поперечной коррекции.

Наводят стереоскопически нить на начальную точку *1* и отсчитывают по шкале продольных параллаксов. Таким образом, получают начальный параллактический отсчет p_1'.

Вычислив параллактический отсчет для точки 2

$$p_2' = p_1' + \Delta p_2^0,$$

устанавливают его по шкале. Наблюдают точку *2*. В общем случае нить не пройдет через эту точку. Уклонение нити на точке *2* устраняют механизмом продольной коррекции, изменяя установочный элемент ΔF.

Вычисляют параллактический отсчет для точки *4*

$$p_4' = p_1' + \Delta p_4^0.$$

Устанавливают полученный отсчет по шкале и наблюдают точку *4*. Уклонение нити на точке *4* устраняют механизмом поперечной коррекции, изменяя элемент γ.

Вычислив параллактический отсчет для точки *3*

$$p'_3 = p'_1 + \Delta p^0_3,$$

устанавливают этот отсчет по шкале и наблюдают точку *3*. Уклонение нити на точке *3* устраняют механизмом поперечной коррекции, изменяя элемент θ.

Расположение опорных точек часто не соответствует стандартной схеме, представленной на рис. 195. Поэтому ориентирование снимков выполняют путем последовательных приближений: устранив уклонение нити на какой-либо точке, не сразу переходят к следующей точке, а сначала возвращаются на предыдущие и уточняют установку коррекционных механизмов, если на этих точках появились уклонения.

Первое приближение ориентирования снимков считается законченным, если параллактические отсчеты, полученные после визирования на точки *2*, *3* и *4*, отличаются от соответствующих вычисленных отсчетов не более чем на 0,1 мм.

Затем отсчитывают по шкалам прибора величины ΔF и γ, вычисляют по формулам (15.31) углы ν и μ и вводят эти углы в коррекционные механизмы.

Второе приближение ориентирования снимков выполняют в той же последовательности, что и первое. Однако во втором приближении, вычисляя параллактические отсчеты, учитывают поправку за продольный наклон первого снимка

$$\delta p'' = 2\frac{p_1}{f}\Delta p\alpha_1 = \frac{p_1}{F}\Delta p\nu, \qquad (15.37)$$

которая входит в уравнение (15.26), но не вводится коррекционными механизмами. Параллактический отсчет находят по формуле

$$p' = p'_1 + \Delta p^0 - \delta p''. \qquad (15.38)$$

Установив коррекционные механизмы по точкам *1—4*, контролируют работу по точкам *5* и *6*.

Ориентирование снимков считается выполненным, если расхождения между отсчетами, полученными после визирования на точки *1—6* и вычисленными, не превышают 0,04 мм.

Часто перед ориентированием снимков по опорным точкам в приборе устанавливают не только элемент β, но и элементы θ, γ, ν и μ, что позволяет ускорить процесс ориентирования стереопары. Для определения элемента θ, как следует из выражений (15.28), нужно знать взаимный поперечный угол наклона снимков $\Delta\omega$, а для вычисления γ, ν и μ — углы наклона первого снимка. Углы наклона снимков можно получить из результатов пространственной фототриангуляции.

Подсчитаем, в каких случаях можно не учитывать при ориентировании снимков углы ν и μ, а также поправку, вычисляемую по формуле (15.37). Очевидно, эти величины не имеют практического значения, если сумма поправочных членов, входящих в уравнение (15.26) и зависящих от разности продольных параллаксов Δp, не превышает заданного предела Δ

$$\Delta = 2\frac{x_2}{f}\Delta p\alpha_1 + \frac{y_2}{f}\Delta p\omega_1 + 2\frac{p_1}{f}\Delta p\alpha_1.$$

Пусть

$$x_2 = y_2 = p_1 = a; \quad \alpha_1 = \omega_1 = \alpha,$$

тогда

$$\Delta = 5\frac{a}{f}\Delta p\alpha. \tag{15.39}$$

Например, если $a = 70$ мм, $f = 100$ мм, $\Delta p = 1$ мм и $\alpha = 30'$, то $\Delta = 0{,}03$ мм. В этом случае нет необходимости определять углы ν и μ и поправки $\delta p''$, что значительно облегчает процесс ориентирования снимков.

§ 109. ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ ПО ЧЕТЫРЕМ ТОЧКАМ

Пусть известны высоты точек *3*, *4*, *5* и *6* (рис. 196) и взаимный продольный угол наклона снимков $\Delta\alpha$. Примем точку *4* за начальную и, определив высоту фотографирования H_1 над этой точкой, а также ее исправленный продольный параллакс p_1^0, вычислим по формуле (15.30) разности продольных параллаксов точек *3*, *5* и *6* относительно точки *4*.

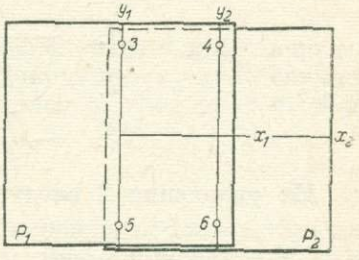


Рис. 196

Теперь найдем зависимость между вычисленной и измеренной разностями продольных параллаксов двух точек, учитывая при этом, что начальной точкой является точка *4*, а продольный параллакс какой-либо точки равен

$$p = p_1 + \Delta p.$$

Согласно равенству (14.22), можно написать

$$p^0 = p - f\Delta\alpha + \frac{p_1^2}{f}\alpha_1 + 2\frac{p_1\Delta p}{f}\alpha_1 + \frac{\Delta p^2}{f}\alpha_1 - \frac{x_2^2}{f}\Delta\alpha -$$

$$- \frac{x_2y_2}{f}\Delta\omega - y_2\left(\Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1 - \frac{\Delta p}{f}\omega_1\right) - \frac{x_2}{f}\left(f\frac{\Delta H}{H} - 2p_1\alpha_1 - 2\Delta p\alpha_1\right),$$

$$p_1^0 = p_1 - f\Delta\alpha + \frac{p_1^2}{f}\alpha_1 - a\left(\Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1\right).$$

Вычтем из первого равенства второе

$$\Delta p^0 = \Delta p - \frac{x_2^2}{f}\Delta\alpha - \frac{x_2y_2}{f}\Delta\omega - y_2\left(\Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1 - \frac{\Delta p}{f}\omega_1\right) -$$

$$- \frac{x_2}{f}\left(f\frac{\Delta H}{H} - 2p_1\alpha_1 - 2\Delta p\alpha_1\right) + 2\frac{p_1\Delta p}{f}\alpha_1 + a\left(\Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1\right) + \frac{\Delta p^2}{f}\alpha_1.$$

Пренебрегая последним членом и учитывая равенства (15.28), представим это выражение в виде

$$\frac{x_2}{F}\Delta F + \frac{x_2y_2}{R_1}\theta + y_2\gamma - l - a\left(\Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1\right) = 0, \tag{15.40}$$

где

$$l = \Delta p - \Delta p^0 - \frac{x_2^2}{f}\beta + y_2\frac{\Delta p}{R_2}\mu + x_2\frac{\Delta p}{F}\nu + \frac{p_1}{F}\Delta p\nu. \tag{15.41}$$

Таким образом, мы получили уравнение ориентирования снимков на стереометре применительно к случаю, когда начальной точкой является точка *4*.

Составим четыре уравнения (15.40) для опорных точек *3—6*

$$
\begin{aligned}
&1. && a\gamma - l_4 - \delta p_1' = 0;\\
&2. && -\frac{b}{F}\Delta F - \frac{ab}{R_1}\theta + a\gamma - l_3 - \delta p_1' = 0;\\
&3. && -a\gamma - l_6 - \delta p_1' = 0;\\
&4. && -\frac{b}{F}\Delta F + \frac{ab}{R_1}\theta - a\gamma - l_5 - \delta p_1' = 0,
\end{aligned}
$$

где

$$\delta p_1' = a\left(\Delta\varkappa - \frac{p_1}{f}\omega_1\right).$$

Найдем неизвестные ΔF, θ и γ. С целью исключения неизвестной величины $\delta p_1'$ вычтем уравнение 1 из остальных. Получим

$$
\begin{aligned}
&1. && -\frac{b}{F}\Delta F - \frac{ab}{R_1}\theta - l_3 + l_4 = 0;\\
&2. && -2a\gamma - l_6 + l_4 = 0;\\
&3. && -\frac{b}{F}\Delta F + \frac{ab}{R_1}\theta - 2a\gamma - l_5 + l_4 = 0.
\end{aligned}
$$

Из уравнения 2 следует:

$$\gamma = -\frac{1}{2a}(l_6 - l_4). \tag{15.42}$$

Подставим значение γ в уравнение 3:

$$-\frac{b}{F}\Delta F + \frac{ab}{R_1}\theta + l_6 - l_5 = 0.$$

Прибавим и вычтем это равенство из уравнения 1.

$$-2\frac{b}{F}\Delta F + l_4 - l_3 + l_6 - l_5 = 0;$$

$$-2\frac{ab}{R_1}\theta + l_4 - l_3 - l_6 + l_5 = 0.$$

Отсюда

$$
\left.
\begin{aligned}
\Delta F &= -\frac{F}{2b}[(l_3 - l_4) + (l_5 - l_6)]\\
\theta &= -\frac{R_1}{2ab}[(l_6 - l_4) - (l_5 - l_3)]
\end{aligned}
\right\}. \tag{15.43}
$$

Полученные формулы позволяют найти неизвестные γ, ΔF и θ путем последовательных приближений. Положив $\nu = \mu = 0$, вычислим свободные члены l и установочные элементы γ, ΔF и θ. По формулам (15.31) найдем углы ν и μ. Таким образом, получим первое приближение неизвестных. Затем вычислим новые значения свободных членов, учитывая углы ν и μ, а по этим значениям — второе приближение неизвестных.

Из уравнения (15.42) следует, что установочный элемент γ является функцией несоответствия l между вычисленной и измеренной разностью продольных параллаксов точек *6* и *4*. Если это несоответствие устранить, то два других элемента (ΔF и θ) будут зависеть, как видно из выражений (15.43), только от

несоответствий, наблюдаемых на точках *3* и *5*. Поэтому ориентирование снимков по четырем опорным точкам *3—6* на практике принято выполнять в такой последовательности:

1. Устанавливают снимки в стереометре так, чтобы главные точки их совпали с центрами соответствующих снимкодержателей, а начальные направления были параллельны оси x прибора. По шкалам коррекционных механизмов устанавливают элементы

$$F, \quad \beta, \quad \Delta F = 0, \quad \theta = 0, \quad \gamma = 0, \quad \nu, \quad \mu,$$

учитывая места нулей этих шкал.

2. Стереоскопически визируют на начальную точку *4* и записывают отсчет p_4' по шкале продольных параллаксов.

3. Вычисляют отсчет, который должен получиться при наведении нити на точку *6*

$$p_6' = p_4' + \Delta p_{6-4}.$$

Здесь Δp_{6-4} — разность продольных параллаксов точек *6* и *4*, вычисленная по формуле (15.30). При этом $h = Z_6 - Z_4$. Визируют на точку *6*, снимают отсчет по шкале продольных параллаксов p_6'' и устанавливают на этой шкале отсчет

$$p_6''' = \frac{1}{2}(p_6' + p_6'').$$

Изменяя установку угла γ, добиваются, чтобы визирная нить проходила через точку *6* модели. Повторяют действия, указанные в пунктах 2 и 3, до тех пор, пока разность $p_6'' - p_6'$ не будет меньше 0,06 мм.

4. Визируют на точку *3*, снимают отсчет p_3' и вычисляют отсчет для точки *5*

$$p_5' = p_3' + \Delta p_{5-3}^0.$$

Визируют на точку *5*, снимают отсчет p_5'' и устанавливают по шкале продольных параллаксов отсчет

$$p_5''' = \frac{1}{2}(p_5' + p_5'').$$

Изменяют установку угла θ так, чтобы визирная нить проходила через точку *5* модели. Добившись равенства отсчетов p_5' и p_5'' с точностью 0,06 мм, возвращаются на точки *4* и *6* и, если нужно, уточняют установку угла γ. Затем переходят к паре точек *4*, *3* или *6*, *5*.

5. Визируют на точку *4*, снимают отсчет p_4', вычисляют отсчет

$$p_3' = p_4' + \Delta p_{3-4}^0$$

и устанавливают его по шкале. Смещая общую каретку, подводят визирную нить к точке *3*. Изменением установки элемента ΔF добиваются, чтобы визирная нить прошла через точку *3*. Эти действия повторяют до тех пор, пока разность отсчетов при наведении на точки *3* и *4* не будет отличаться от Δp_{3-4}^0 больше чем на 0,06 мм. Вновь повторяют операции, описанные в пунктах 2—5.

Ориентирование снимков считают законченным, если измеренные разности продольных параллаксов любой пары опорных точек отличаются от вычисленных не больше чем на 0,04 мм.

Если предвычислены и установлены не только элементы β, ν и μ, но и элементы θ, γ, *то первое приближение ориентирования начинают с выполнения*

действия, описанного в пункте 5, опуская действия, приведенные в пунктах 2, 3 и 4. В последующих приближениях выполняют все операции, изложенные в пунктах *2—5*.

Если углы ν и μ неизвестны, то по соответствующим шкалам устанавливают $\nu = 0$ и $\mu = 0$ и, выполняя первое приближение ориентирования, добиваются, чтобы измеренные разности продольных параллаксов не отличались от вычисленных больше чем на 0,1 мм. Затем по формулам (15.31) вычисляют углы ν и μ, устанавливают их и повторяют действия, описанные в пунктах 2—5.

Для контроля ориентирования многократно (3—5 раз) наводят на начальную точку *4*, определяют средний из полученных таким образом отсчетов p'_4 и вычисляют отсчеты $p' = p'_4 + \Delta p^0$ для всех опорных точек, имеющихся на стереопаре. Затем последовательно наводят на опорные точки и снимают отсчеты p''. Если разности $\Delta = p'' - p'$ не превышают 0,06 мм, значит, ориентирование произведено правильно и можно перейти к проведению горизонталей на снимке.

§ 110. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ ТОЧЕК И ПРОВЕДЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЕЙ

После ориентирования на стереометре определяют высоты точек, которые должны подписываться на карте, и проводят горизонтали на правом снимке стереопары.

Для определения высоты точки местности визируют на соответствующую точку модели, снимают отсчет p' по параллактической шкале и находят исправленную разность продольных параллаксов

$$\Delta p^0 = p'' - p'_1 + 2\frac{p_1}{f}\Delta p\alpha_1 = \Delta p' + \delta p'', \qquad (15.44)$$

где p'_1 — параллактический отсчет, полученный при наведении нити на начальную точку.

Поправку

$$\delta p'' = 2\frac{p_1}{f}\Delta p\alpha_1$$

необходимо учитывать потому, что она входит в формулу (15.3), но не вводится коррекционными механизмами. Если при ориентировании снимков дополнительные коррекционные механизмы не использовались, то поправку $\delta p''$ не учитывают. Затем по формуле (15.1) вычисляют превышение h и высоту определяемой точки.

Для нанесения горизонталей на снимок вычисляют параллактические отсчеты p', соответствующие горизонталям, проходящим в пределах стереопары. Из уравнения (15.44) следует

$$p' = p'_1 + \Delta p^0 - \delta p'', \qquad (15.45)$$

где p'_1 — отсчет, полученный при наведении на начальную точку; Δp^0 — разность продольных параллаксов, вычисленная по формуле (15.30)

$$\Delta p^0 = \frac{h}{H_1 - h}p''_1,$$

где h — разность высот горизонтали и начальной точки

$$h = Z - Z_1. \qquad (15.46)$$

Поправку $\delta p''$ находят по формуле (15.37).

Далее изучают характерные особенности строения рельефа, рассматривая снимки стереоскопически. Определяют порядок и приемы нанесения горизонталей, обеспечивающие наиболее правильное и наглядное отображение рельефа.

Горизонталь проводят следующим образом. На шкале продольных параллаксов устанавливают отсчет, соответствующий горизонтали, которую нужно нанести на снимок. Рассматривая стереомодель и плавно перемещая общую каретку, замечают точки, в которых визирная нить сечет модель. Эти точки соединяют линией, проводя ее на правом снимке. После проведения первой горизонтали на шкале продольных параллаксов устанавливают новый отсчет и наносят следующую горизонталь в том же порядке.

В местах с высокой растительностью горизонтали проводят по верху растительного покрова. В этом случае параллактический отсчет увеличивают на величину

$$\partial p = l\,\frac{p_1^0}{H_1}, \tag{15.47}$$

где l — высота растительности.

Если высота растительности неизвестна, то поправку ∂p находят как разность отсчетов по шкале продольных параллаксов, полученных при наведении на верх растительности и на ее основание.

Нанесение горизонталей контролируют сравнением высот контрольных точек с высотами, отсчитанными по горизонталям, а также определением высот дополнительных пикетных точек.

После съемки рельефа в пределах стереопары производят сводку горизонталей со смежными снимками, причем несовпадения между горизонталями по границам рабочих площадей не должны превышать установленных допусков.

Увеличение наблюдательной системы стереометра небольшое — $2{,}5^{\times}$, а разности продольных параллаксов трансформируются по приближенным формулам. Поэтому точность съемки рельефа на стереометре ниже, чем на стереографе и других высокоточных универсальных стереоприборах. Кроме того, горизонтали на стереометре получаются не в ортогональной, а в центральной проекции, и для переноса их на план необходимо выполнять дополнительный процесс — трансформирование снимков.

§ 111. ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПАРАЛЛАКСА НАЧАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Для обработки снимков на стереометре необходимо знать трансформированный продольный параллакс начальной точки, т. е. точки *1* или *4* (см. рис. 195).

Найдем трансформированный продольный параллакс точки местности, соответствующей главной точке правого снимка.

Учитывая, что для главных точек $y = 0$ и положив $\Delta\varkappa = 0$, представим формулу (14.22) в таком виде:

$$p^0 = p - f\,\Delta\alpha + \frac{p^2}{f}\alpha_1 - \frac{x_2^2}{f}\Delta\alpha - x_2\left(\frac{\Delta H}{H} - 2\,\frac{p}{f}\alpha_1\right).$$

Подсчитаем по этой формуле параллаксы p_2^0 и p_1^0 для точек

$o_2(x_2 = 0,\quad p_2 = b_1)$ и $o_1(x_2 = -b_2,\quad p_1 = b_2)$:

$$\left.\begin{aligned} p_2^0 &= b_1 - f\,\Delta\alpha + \frac{b_1^2}{f}\alpha_1 \\ p_1^0 &= b_2 - f\,\Delta\alpha - \frac{b_2^2}{f}\alpha_1 - \frac{b_2^2}{f}\Delta\alpha + b_2\,\frac{\Delta H}{H} \end{aligned}\right\}. \tag{а}$$

Учитывая, что точка o_2 начальная, напишем

$$p_1^0 = p_2^0 + \Delta p^0$$

или согласно (15.30)

$$p_1^0 = p_2^0 + \frac{h}{H} p_2^0 \approx p_2^0 + \frac{h}{H} b_1,$$

где h — разность высот точек местности, соответствующих главным точкам левого и правого снимков.

Следовательно,

$$p_2^0 = b_2 - f\Delta\alpha + \frac{b_2^2}{f}\alpha_1 - \frac{b_2^2}{f}\Delta\alpha + b_2\frac{\Delta H}{H} - \frac{h}{H}b_1. \qquad (б)$$

Возьмем полусумму (а) и (б), положив в поправочных членах $b_1 = b_2 = b$,

$$p_2^0 = \frac{1}{2}(b_1 + b_2) - f\Delta\alpha - \frac{b_2}{2f}\Delta\alpha + b\frac{\Delta H - h}{2H} \qquad (15.48)$$

Теперь найдем трансформированный продольный параллакс точки *4*. Координаты изображения этой точки на втором снимке равны

$$x_2 = 0, \quad y_2 = a.$$

Согласно уравнению (14.22)

$$p_4^0 = p_4 - f\Delta\alpha + \frac{p_4^2}{f}\alpha_1 - a\left(\Delta\varkappa - \frac{p_4}{f}\omega_1\right). \qquad (в)$$

Возьмем еще точку *6* ($x_2 = 0$, $y_2 = -a$). По той же формуле получим

$$p_6^0 = p_6 - f\Delta\alpha + \frac{p_6^2}{f}\alpha_1 + a\left(\Delta\varkappa - \frac{p_6}{f}\omega_1\right) \qquad (г)$$

Составим полусумму равенств (в) и (г), положив, что в поправочных членах $p_4 = p_6 = p$

$$\frac{1}{2}(p_4^0 + p_6^0) = \frac{1}{2}(p_4 + p_6) - f\Delta\alpha + \frac{p^2}{f}\alpha_1.$$

Представим это выражение в виде

$$\frac{1}{2}(p_4^0 + p_4^0 + \Delta p_{6-4}^0) = \frac{1}{2}(p_4 + p_6) - f\Delta\alpha + \frac{p^2}{f}\alpha_1,$$

отсюда б

$$p_4^0 = \frac{1}{2}(p_4 + p_6) - f\Delta\alpha + \frac{p^2}{f}\alpha_1 - \frac{1}{2}\Delta p_{6-4}^0.$$

Величину Δp_{6-4}^0 подсчитаем по приближенной формуле

$$\Delta p_{6-4}^0 = \frac{h_{6-4}}{H_4}\frac{1}{2}(p_4 + p_6),$$

следовательно,

$$p_4 = \frac{1}{2}(p_4 + p_6)\left(1 - \frac{h_{6-4}}{2H_4}\right) - f\Delta\alpha + \frac{p^2}{f}\alpha_1. \qquad (15.49)$$

По этой формуле можно найти приведенный параллакс точки *4*, если продольный угол наклона первого снимка α_1 известен. Выведем вторую формулу для определения приведенного продольного параллакса точки *4* в случае, когда угол α_1 неизвестен.

Согласно выражению (14.22) и рис. 195

$$p_5^0 = p_5 - f\Delta\alpha + \frac{p_5^2}{f}\alpha_1 - \frac{b^2}{f}\Delta\alpha - \frac{ab}{f}\Delta\omega + a\left(\Delta\varkappa - \frac{p_5}{f}\Delta\omega\right) +$$

$$+ \frac{b}{f}\left(f\frac{\Delta H}{H} - 2p_5\alpha_1\right) = p_4^0 + \Delta p_{5-4}^0,$$

отсюда

$$p_4^0 = p_5 - f\Delta\alpha + \frac{p_5^2}{f}\alpha_1 - \frac{b^2}{f}\Delta\alpha - \frac{ab}{f}\Delta\omega +$$

$$+ a\left(\Delta\varkappa - \frac{p_5}{f}\Delta\omega\right) + \frac{b}{f}\left(f\frac{\Delta H}{H_4} - 2p_5\alpha_1\right) - \frac{h_{5-4}}{H_4}\frac{1}{2}(p_4 + p_5). \qquad (д)$$

Составим полусумму равенств (в) и (д), положив в поправочных членах $p_3 = p_6 = p = b$

$$p_4^0 = \frac{1}{2}(p_4 + p_5)\left(1 + \frac{\Delta H - h_{5-4}}{2H_4}\right) - \left(f + \frac{b^2}{2f}\right)\Delta\alpha - \frac{ab}{2f}\Delta\omega. \qquad (15.50)$$

§ 112. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ

Кроме трансформированного продольного параллакса начальной точки для обработки снимков на стереометре необходимо знать высоту фотографирования относительно этой точки.

Высоту фотографирования можно определить по двум опорным точкам. Пусть известны координаты точек местности C и E, изобразившихся на снимке P (рис. 197). Обозначим высоту фотографирования относительно точки C через H_C.

Продолжим луч SE до пересечения его с горизонтальной плоскостью, проходящей через точку C. Полагая, что снимок горизонтальный и прямая ce проходит через главную точку 0, из подобных треугольников SCE' и Sce найдем

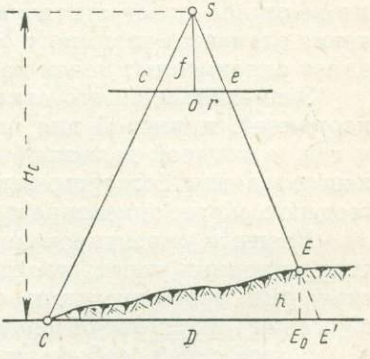


Рис. 197

$$H_C = (D + \Delta D)\frac{f}{d}, \qquad (15.51)$$

где $D = CE_0$ — горизонтальное расстояние между точками C и E, $\Delta D = E_0E'$ — поправка за превышение h точки E относительно точки C, f — фокусное расстояние снимка, $d = ce$ — расстояние между изображениями опорных точек на снимке.

Найдем поправку ΔD. Из подобия треугольников EE_0E' и Soe следует

$$\Delta D = \frac{r}{f}h, \qquad (15.52)$$

где r — расстояние на снимке от главной точки до точки e.

Вычислив высоту фотографирования над точкой C, можно найти абсолютную высоту фотографирования

$$H_{абс} = H_C + Z_C, \tag{15.53}$$

где Z_C — высота точки C.

Обычно величину $H_{абс}$, полученную по одному снимку, используют для *обработки всех снимков данного маршрута.*

Глава 16

ВЗАИМНОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ ПАРЫ СНИМКОВ

§ 113. СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКОВ. УСЛОВИЯ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПАРЫ СНИМКОВ

Фотограмметрические преобразования по паре снимков производятся в два этапа: двойной обратной засечкой находят элементы ориентирования снимков в пространстве, существовавшие при фотографировании, а прямой засечкой определяют координаты точек заснятого на снимках объекта.

Ориентирование снимков в пространстве устанавливается с помощью элементов ориентирования. *Последние определяют положение* каждого из снимков относительно заданной системы координат. Различают элементы взаимного и внешнего ориентирования снимков.

Элементы взаимного ориентирования позволяют установить каждый из снимков стереопары в некоторой системе координат так, что восстанавливается их взаимное пространственное положение, существовавшее при съемке. Значения элементов взаимного ориентирования можно найти из соотношения координат одноименных точек на снимках стереопары.

Элементы внешнего ориентирования устанавливают связь между системой *координат, принятой для определения элементов взаимного ориентирования,* и той, в которой должны быть представлены окончательные результаты. При использовании фотограмметрии для составления карт их называют элементами геодезического ориентирования.

Внешнее ориентирование снимков возможно при наличии определенного числа опорных точек, координаты которых получают трудоемкими и дорогостоящими геодезическими методами или фотограмметрическими способами сгущения опорного обоснования.

В этой связи особого внимания заслуживают способы независимого определения элементов внешнего ориентирования по показаниям специальных приборов: высотомеров, статоскопов, гиростабилизирующих установок и т. д. Например, для исследования космического пространства внешнее ориентирование снимков возможно только по данным специальных приборов. Если элементы внешнего ориентирования известны, то положение каждого снимка устанавливают, минуя процесс взаимного ориентирования.

Особый случай составляют способы ориентирования снимка с неизвестными *элементами внутреннего ориентирования, для определения которых* требуется дополнительное опорное обоснование.

Ориентирование снимков можно описать формулами (аналитическое решение) или восстановить на особых приборах (аналоговое решение). Анали-

тическое решение более общее. На основе его удобно выполнить обоснование и анализ воплощения той же задачи и на универсальных фотограмметрических приборах.

Аналитическое решение взаимного ориентирования снимков в СССР впервые дано А. С. Скиридовым в 1928 г. В дальнейшем той же задаче были посвящены труды Н. Г. Келля, М. Д. Коншина, А. Н. Лобанова, Г. П. Жукова и др. Особо следует отметить труды Н. А. Урмаева [49], на которых базируются многие современные способы решения задач ориентирования снимков.

В трудах этих ученых нашло отражение и решение второй задачи — определение внешнего ориентирования снимков.

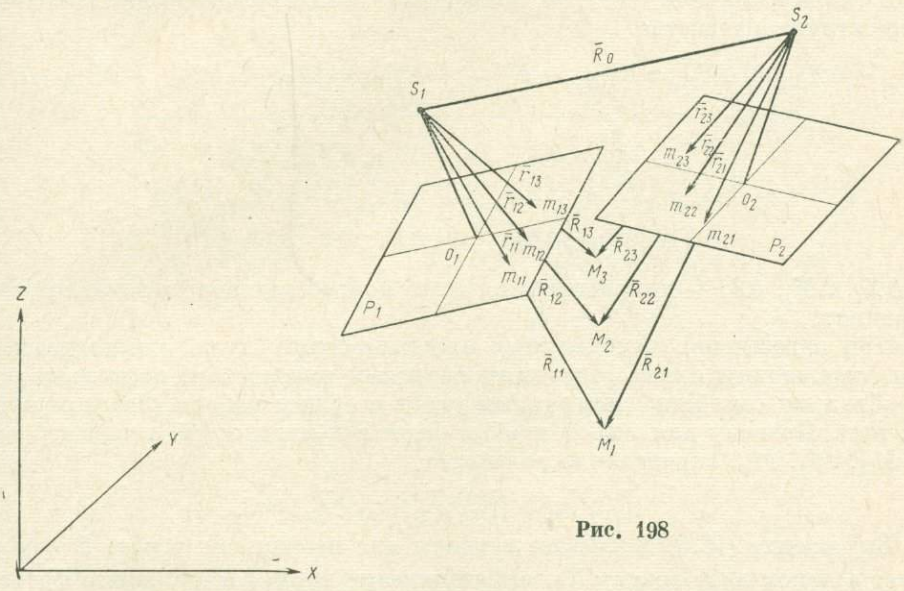


Рис. 198

Чтобы найти взаимное расположение пары снимков в пространстве, существовавшее при фотографировании, необходимо установить критерий, выполнение которого обеспечивает однозначное решение задачи. Если связки проектирующих лучей восстановлены, такому критерию удовлетворяет требование пересечения всех одноименных лучей. В результате образуется геометрическая модель заснятого на снимках объекта. Это требование будем в дальнейшем называть критерием взаимного ориентирования снимков.

Для решения задачи взаимного ориентирования критерий необходимо описать математическими условиями взаимного ориентирования, а от них перейти к уравнениям взаимного ориентирования. Последние должны связывать элементы взаимного ориентирования снимков с координатами точек на снимках стереопары. Необходимо также найти оптимальные пути решения уравнений, чтобы конечные результаты получились точными.

Когда критерий взаимного ориентирования удовлетворен, любая пара одноименных проектирующих лучей лежит в одной базисной плоскости. Если обозначить (рис. 198) одноименные проектирующие лучи S_1M_i и S_2M_i векторами

$\overline{R}_{1i}$ и $\overline{R}_{2i}$, S_1m_{1i}, S_2m_{2i} векторами $\bar{r}_{1i}$ и $\bar{r}_{2i}$, а базис проектирования S_1S_2 вектором $\overline{R}_0$, критерий взаимного ориентирования можно выразить условием компланарности трех векторов

$$\overline{R}_{1i}+\overline{R}_{2i}+\overline{R}_0=0 \tag{16.1}$$

или

$$\overline{R}_0[\overline{R}_{1i}\times\overline{R}_{2i}]=0, \tag{16.2}$$

или

$$\overline{R}_0[\bar{r}_{1i}\times\bar{r}_{2i}]=0. \tag{16.3}$$

В прямоугольной системе координат XYZ выражениям (16.1)—(16.3) соответствуют равенства

$$\Delta X_{R_{1i}}+\Delta X_{R_{2i}}+\Delta X_{R_0}=\Delta Y_{R_{1i}}+\Delta Y_{R_{2i}}+\Delta Y_{R_0}=\Delta Z_{R_{1i}}+\Delta Z_{R_{2i}}+\Delta Z_{R_0}=0 \tag{16.4}$$

или

$$\begin{vmatrix}\Delta X_{R_0}\Delta Y_{R_0}\Delta Z_{R_0}\\ \Delta X_{R_{1i}}\Delta Y_{R_{1i}}\Delta Z_{R_{1i}}\\ \Delta X_{R_{2i}}\Delta Y_{R_{2i}}\Delta Z_{R_{2i}}\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}\Delta X_{R_0}\Delta Y_{R_0}\Delta Z_{R_0}\\ \Delta X_{r_{1i}}\Delta Y_{r_{1i}}\Delta Z_{r_{1i}}\\ \Delta X_{r_{2i}}\Delta Y_{r_{2i}}\Delta Z_{r_{2i}}\end{vmatrix}=0, \tag{16.5}$$

где ΔX_i, ΔY_i, ΔZ_i — приращения начал и концов векторов в заданной системе координат.

При пересечении одноименных проектирующих лучей компланарны векторы, перпендикулярные отдельным базисным плоскостям, поскольку последние образуют семейство двугранных углов с общим ребром (базисом проектирования). Поэтому для любой тройки базисных плоскостей, например для точек M_1, M_2, M_3, справедливо равенство

$$[\bar{r}_{11}\times\bar{r}_{21}]\times[\bar{r}_{12}\times\bar{r}_{22}][\bar{r}_{13}\times\bar{r}_{23}]=0. \tag{16.6}*$$

Выражение (16.6) связывает векторы для нескольких точек. В нем отсутствует в явном виде вектор $\overline{R}_0$, определяющий направление базиса фотографирования. Последний скрыт векторным произведением

$$[\bar{r}_{11}\times\bar{r}_{21}]\times[\bar{r}_{12}\times\bar{r}_{22}]=\overline{R}_0. \tag{16.7}$$

После подстановки (16.7) в (16.6) получим условие компланарности трех векторов (16.3).

Можно записать условие взаимного ориентирования, используя координаты соответствующих точек на трансформированных снимках.

Если предположить, что в заданной системе координат снимки и базис горизонтальны, то вместо равенства (16.5) получим

$$y^0_{1i}-y^0_{2i}=0. \tag{16.8}$$

Наконец, разделив обе части (16.8) на величину фокусного расстояния, найдем критерий взаимного ориентирования, который сводится к требованию равенства двугранных углов λ_1 и λ_2, образованных главной и текущими базисными плоскостями, т. е.

$$\frac{y^0_1}{f}-\frac{y^0_2}{f}=\operatorname{tg}\lambda_1-\operatorname{tg}\lambda_2=\lambda_1-\lambda_2=0. \tag{16.9}$$

---

* Предложено Ю. М. Труниным.

§ 114. ЭЛЕМЕНТЫ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Взаимное ориентирование пары снимков, т. е. установка их в то положение, в котором они находились относительно друг друга при фотографировании, может быть достигнуто двумя способами:

1) угловыми движениями обоих снимков при неподвижном положении базиса;

2) движениями только одной проектирующей камеры, например правой, при неподвижном положении левой камеры.

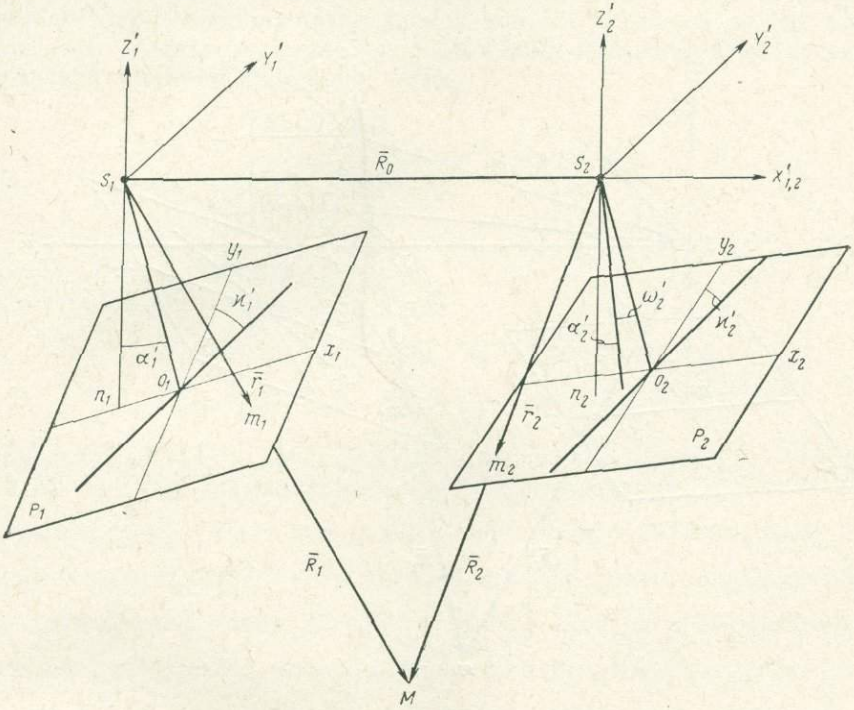


Рис. 199

В соответствии с этим различают две системы координат и элементов взаимного ориентирования.

Первая система — назовем ее условно базисной. Начало пространственной системы координат X_1', Y_1', Z_1' совмещается с левым центром проектирования, ось X_1' с базисом, ось Y_1' направляется перпендикулярно главной базисной плоскости $S_1o_1S_2$ левого снимка, а ось Z_1' вверх, перпендикулярно $X_1'Y_1'$. Дополнительно введем систему координат $S_2X_2'Y_2'Z_2'$, параллельную $S_1X_1'Y_1'Z_1'$.

Элементами взаимного ориентирования в этой системе служат:

α_1' — угол между осью Z_1' и главным лучом левой связки (рис. 199);

$\varkappa_1'$ — угол на левом снимке между осью y_1 и следом плоскости $S_1o_1Y_1'$;

α_2' — угол в плоскости $X_1'Z_1'$ между осью Z_2' и проекцией главного луча правой связки;

ω_2' — угол между проекцией главного луча правой связки на плоскость $X_1'Z_1'$ и главным лучом;

$\varkappa_2'$ — угол на правом снимке между осью y_2 и следом плоскости $S_2o_2Y_2'$.

Углы α_1' и α_2' называются продольными углами наклона снимков относительно базиса фотографирования, угол ω_2' — взаимным поперечным углом наклона, а углы $\varkappa_1'$ и $\varkappa_2'$ — углами поворота.

Зная элементы взаимного ориентирования снимков, можно найти фотограмметрические координаты любой точки модели.

Вторая система — назовем ее системой координат левого снимка. За начало фотограмметрических координат примем центр проекции

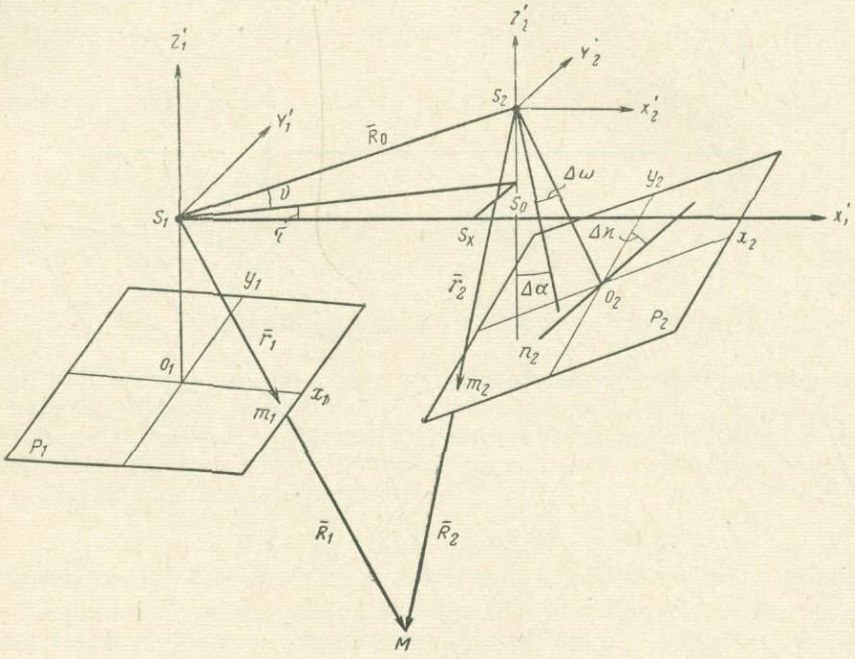


Рис. 200

левого снимка, но координатные оси X_1' и Y_1' (рис. 200) направим параллельно соответствующим координатным осям левого снимка. Очевидно, что ось Z_1' совпадает с главным лучом левой связки. В качестве элементов взаимного ориентирования используем следующие величины:

τ — угол между осью X_1' и проекцией базиса на плоскость $X_1'Y_1'$;

ν — угол наклона базиса относительно левого снимка;

$\Delta\alpha$ — взаимный продольный угол наклона снимков: угол, составленный осью Z_2' с проекцией главного луча правой связки на плоскость $X_2'Z_2'$;

$\Delta\omega$ — взаимный поперечный угол наклона снимков: угол между главным лучом правой связки и его проекцией на плоскость $X_2'Z_2'$;

$\Delta\varkappa$ — взаимный угол поворота снимков: угол на правом снимке между осью y_2 и следом плоскости $S_2o_2Y_2'$.

§ 115. УРАВНЕНИЯ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Уравнения взаимного ориентирования могут быть представлены в различном виде в зависимости от принятой системы элементов ориентирования, записи условий взаимного ориентирования, строгости соотношений величин в уравнениях, способа решения задачи ориентирования и т. д.

В дальнейшем остановимся на некоторых наиболее распространенных уравнениях [21, 26, 27].

1. Взаимное ориентирование снимков устанавливается в прямоугольной базисной системе координат пятью элементами α_1', $\varkappa_1'$, α_2', ω_2', $\varkappa_2'$ (см. рис. 199).

При этом условие пересечения одноименных проектирующих лучей (16.5) для базисной системы координат будет

$$\begin{vmatrix} B & 0 & 0 \\ X_1' & Y_1' & Z_1' \\ X_2' & Y_2' & Z_2' \end{vmatrix} = Y_1'Z_2' - Z_1'Y_2' = 0, \tag{16.10}$$

где X_1', Y_1', Z_1' — координаты точки m_1 в системе $S_1X_1'Y_1'Z_1'$; X_2', Y_2', Z_2' — координаты точки m_2 в системе $S_2X_2'Y_2'Z_2'$.

В соответствии с формулами (14.5)

$$Y_1' = b_1x_1 + b_2y_1 - b_3f_1; \quad Z_1' = c_1x_1 + c_2y_2 - c_3f_1;$$

$$Y_2' = b_1'x_2' + b_2'y_2 - b_3'f_2; \quad Z_2' = c_1'x_2 + c_2'y_2 - c_3'f_2.$$

Определив по (14.4) значения направляющих косинусов ($\omega_1' = 0$), из условия (16.10) получим уравнение взаимного ориентирования

$$\begin{aligned}
&(\sin\varkappa_1'\sin\alpha_2'\cos\varkappa_2' + \sin\varkappa_1'\cos\alpha_2'\sin\varkappa_2'\sin\omega_2' - \sin\alpha_1'\cos\varkappa_1'\cos\omega_2'\sin\varkappa_2')\,x_1x_2 + \\
&+(\sin\varkappa_1'\cos\alpha_2'\sin\omega_2'\cos\varkappa_2' - \sin\varkappa_1'\sin\alpha_2'\sin\varkappa_2' - \sin\alpha_1'\cos\varkappa_1'\cos\omega_2'\cos\varkappa_2')\,x_1y_2 + \\
&+(\cos\varkappa_1'\sin\alpha_2'\cos\varkappa_2' + \cos\varkappa_1'\sin\alpha_2'\sin\omega_2'\sin\varkappa_2' + \sin\alpha_1'\sin\varkappa_1'\cos\omega_2'\sin\varkappa_2')\,x_2y_2 + \\
&+(\cos\varkappa_1'\cos\alpha_2'\sin\omega_2'\cos\varkappa_2' - \cos\varkappa_1'\sin\alpha_2'\sin\varkappa_2' + \sin\alpha_1'\sin\varkappa_1'\cos\omega_2'\cos\varkappa_2')\,y_1y_2 + \\
&+(\cos\alpha_1'\cos\omega_2'\sin\varkappa_2'x_2f_1 - (\sin\alpha_1'\cos\varkappa_1'\sin\omega_2'\sin\varkappa_1'\cos\alpha_2'\cos\omega_2')\,x_1f_2 + \\
&+(\sin\alpha_1'\sin\varkappa_1'\sin\omega_2' - \cos\varkappa_1'\cos\alpha_2'\cos\omega_2')\,y_1f_2 + \cos\alpha_1'\cos\omega_2'\cos\varkappa_2'f_1y_2 + \\
&+\cos\alpha_1'\sin\omega_2'f_1f_2 = 0.
\end{aligned} \tag{16.11}$$

Здесь x_1, y_1 и x_2, y_2 — координаты точек m_1 и m_2 в системах, принятых для измерения снимков.

2. Взаимное ориентирование снимков устанавливается в системе координат левого снимка пятью элементами взаимного ориентирования τ, ν, $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\varkappa$ (см. рис. 200).

Условие пересечения одноименных лучей (16.5) для системы координат левого снимка можно записать так:

$$\begin{vmatrix} B_X & B_Y & B_Z \\ X_1' & Y_1' & Z_1' \\ X_2' & Y_2' & Z_2' \end{vmatrix} = B_X(Y_1'Z_2' - Z_1'Y_2') + B_Y(X_2'Z_1' - X_1'Z_2') + B_Z(X_1'Y_2' - X_2'Z_1'), \tag{16.12}$$

где $B_X B_Y B_Z$ — проекции базиса проектирования на координатные оси, а X_1', X_2', Y_1' и Y_2', Z_1', Z_2' — координаты точек m_1 и m_2 снимков в системах координат $S_1X_1'Y_1'Z_1'$ и $S_2X_2'Y_2'Z_2'$.

В соответствии с (14.5) и рис. 200 имеем:

$$\left.\begin{array}{ll} X_1' = x_1 & X_2' = a_1'x_2 + a_2'y_2 - a_3'f_2 \\ Y_1' = y_1 & Y_2' = b_1'x_2 + b_2'y_2 - b_3'f_2 \\ Z_1' = -f_1 & Z_2' = c_1'x_2 + c_2'y_2 - c_3'f_2 \\ & B_X = B\cos\tau\cos\nu \\ & B_Y = B\sin\tau\cos\nu \\ & B_Z = B\sin\nu \end{array}\right\}, \tag{16.13}$$

где направляющие косинусы связаны с элементами взаимного ориентирования и могут быть получены по формулам (14.4), если α, ω, $\varkappa$ заменить на $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\varkappa$.

После замены компонентов определителя (16.12) в соответствии с (16.13) получим

$$\begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg}\tau & \operatorname{tg}\nu\sec\tau \\ x_1 & y_1 & -f_1 \\ X_2' & Y_2' & Z_2' \end{vmatrix} = 0, \tag{16.14}$$

а затем напишем строгое уравнение взаимного ориентирования в системе координат левого снимка стереопары

$$[\sin\Delta\alpha\cos\Delta\varkappa + \cos\Delta\alpha\sin\Delta\omega\sin\Delta\varkappa - \operatorname{tg}\nu\sec\tau(\cos\Delta\alpha\cos\Delta\varkappa -$$

$$-\sin\Delta\alpha\sin\Delta\omega\sin\Delta\varkappa)]\,y_1x_2 + [\cos\Delta\alpha\sin\Delta\omega\cos\Delta\varkappa - \sin\Delta\alpha\sin\Delta\varkappa + \operatorname{tg}\nu\sec\tau\times$$

$$\times(\cos\Delta\alpha\sin\Delta\varkappa + \sin\Delta\alpha\sin\Delta\omega\cos\Delta\varkappa)]\,y_1y_2 -$$

$$-(\cos\Delta\alpha\cos\Delta\omega + \operatorname{tg}\nu\sec\tau\sin\Delta\alpha\cos\Delta\omega)\,y_1f_2 +$$

$$+[\sin\Delta\varkappa\cos\Delta\omega - \operatorname{tg}\tau(\cos\Delta\alpha\cos\Delta\omega - \sin\Delta\alpha\sin\Delta\omega\sin\Delta\varkappa)]\,f_1x_2 +$$

$$+[\cos\Delta\varkappa\cos\Delta\omega - \operatorname{tg}\tau(\cos\Delta\alpha\sin\Delta\varkappa + \sin\Delta\alpha\sin\Delta\omega\cos\Delta\varkappa)]\,f_1y_2 +$$

$$+(\sin\Delta\omega + \operatorname{tg}\tau\sin\Delta\alpha\cos\Delta\omega)\,f_1f_2 + [\operatorname{tg}\tau(\sin\Delta\alpha\cos\Delta\varkappa + \cos\Delta\alpha\sin\Delta\omega\sin\Delta\varkappa) +$$

$$+\operatorname{tg}\nu\sec\tau\sin\Delta\varkappa\cos\Delta\omega]\,x_1x_2 + [\operatorname{tg}\tau(\cos\Delta\alpha\sin\Delta\omega\cos\Delta\varkappa - \sin\Delta\alpha\sin\Delta\varkappa) +$$

$$+\operatorname{tg}\nu\sec\tau\cos\Delta\varkappa\cos\Delta\omega]\,x_1y_2 + (\operatorname{tg}\tau\cos\Delta\alpha\cos\Delta\omega + \operatorname{tg}\nu + \sec\tau\sin\Delta\omega)\,x_1f_2 = 0. \tag{16.15}$$

Для определения элементов ориентирования необходимо составить систему уравнений (16.11) или (16.15) минимум для пяти точек на снимках стереопары и решить ее. Но поскольку уравнения взаимного ориентирования в строгой записи трансцендентны, непосредственное их решение практически не применяется. Поэтому уравнения приводят к виду, при котором неизвестные элементы ориентирования или их функции находятся в линейной алгебраической зависимости. При этом теряется в той или иной степени строгость соотношений величин в уравнениях.

3. Рассмотрим один из путей приведения уравнений взаимного ориентирования к линейному виду [26]. Неизвестные элементы взаимного ориентирования, назовем их условно φ_1, φ_2, φ_3, φ_4, φ_5, представляются суммами прибли-

женных их значений φ_{01}, φ_{02}, φ_{03}, φ_{04}, φ_{05} и поправок к ним $\delta\varphi_1$, $\delta\varphi_2$, $\delta\varphi_3$, $\delta\varphi_4$, $\delta\varphi_5$

$$\left.\begin{array}{lll} \varphi_1=\varphi_{01}+\delta\varphi_1; & \varphi_3=\varphi_{03}+\delta\varphi_3; & \varphi_5=\varphi_{05}+\delta\varphi_5 \\ \varphi_2=\varphi_{02}+\delta\varphi_2; & \varphi_4=\varphi_{04}+\delta\varphi_4 & \end{array}\right\}. \tag{16.16}$$

Тогда уравнение взаимного ориентирования можно представить так:

$$F_{\varphi_{1-5}}=F_{0,\ \varphi_{01-05}}+\delta F_{\Delta\varphi_{1-5}}, \tag{16.17}$$

где F_0 — свободный член уравнения, полученный по приближенным значениям неизвестных; δF — совокупность членов уравнения, содержащих поправки к приближенным значениям неизвестных:

$$\delta F_{\delta\varphi_{1-5}}=\frac{\partial F}{\partial\varphi_1}\delta\varphi_1+\frac{\partial F}{\partial\varphi_2}\delta\varphi_2+\frac{\partial F}{\partial\varphi_3}\delta\varphi_3+\frac{\partial F}{\partial\varphi_4}\delta\varphi_4+\frac{\partial F}{\partial\varphi_5}\delta\varphi_5. \tag{16.18}$$

После подстановки (16.18) в (16.17) получим линеаризованное уравнение взаимного ориентирования

$$\frac{\partial F}{\partial\varphi_1}\delta\varphi_1+\frac{\partial F}{\partial\varphi_2}\delta\varphi_2+\frac{\partial F}{\partial\varphi_3}\delta\varphi_3+\frac{\partial F}{\partial\varphi_4}\delta\varphi_4+\frac{\partial F}{\partial\varphi_5}\delta\varphi_5+F_{0,\ \varphi_{01-05}}=v \tag{16.19}$$

или

$$a\delta\varphi_1+b\delta\varphi_2+c\delta\varphi_3+d\delta\varphi_4+e\delta\varphi_5+l=v. \tag{16.20}$$

Неизвестными в этом уравнении являются поправки к приближенным значениям элементов взаимного ориентирования. Они и определяются в результате решения системы уравнений, составленной по измеренным координатам точек на снимках. Линеаризованная запись уравнения не является строгой. Поэтому в правой части уравнения вместо нуля поставлено значение некоторой погрешности v.

Следуя приведенной схеме линеаризации уравнений взаимного ориентирования, для базисной системы координат получим свободный член

$$l=F_0(\alpha'_{10}\varkappa'_{10}\alpha'_{20}\omega'_{20}\varkappa'_{20})=Y'_{10}Z'_{20}-Z'_{10}Y'_{20},$$

а частные производные по α'_1, $\varkappa'_1$, α'_2, ω'_2, ω'_2, $\varkappa'_2$ найдем от выражения

$$F(\alpha'_1\varkappa'_1\alpha'_2\omega'_2\varkappa'_2)=Y'_1Z'_2-Z'_1Y'_2=(b_1x_1+b_2y_1-b_3f_1)(c'_1x_2+c'_2y_2-c'_3f_2)-$$
$$-(c_1x_1+c_2y_1-c_3f_1)(b'_1x_2+b'_2y_2-b'_3f_2).$$

Тогда

$$\frac{\partial F}{\partial\alpha'_1}=-[(\cos\alpha'_1\cos\varkappa'_1-\sin\alpha'_1\sin\omega'_1\sin\varkappa'_1)x_1+(-\cos\alpha'_1\sin\varkappa'_1-\sin\alpha'_1\sin\omega'_1\times$$
$$\cos\varkappa'_1)y_1+f\sin\alpha'_1\cos\omega'_1]Y'_2=$$
$$=-(a_1x_1+a_2y_1-a_3f)Y'_2=-X'_1Y'_2.$$

Аналогично найдем и другие частные производные. В результате чего будем иметь

$$\left.\begin{array}{l} a=\frac{\partial F}{\partial\alpha'_1}=-X'_1Y'_2; \quad b=\frac{\partial F}{\partial\alpha'_2}=Y'_1X'_2; \quad c=\frac{\partial F}{\partial\omega'_2}=Y'_1E'-Z'_1F' \\ d=\frac{\partial F}{\partial\varkappa'_1}=Z'_2B-Y'_2C; \ e=\frac{\partial F}{\partial\varkappa'_2}=Y'_1C'-Z_1B'_1 \end{array}\right\}, \tag{16.21}$$

где

$$\left.\begin{aligned} E' &= Y'_2 \cos \alpha'_2 \\ F' &= x_2 b'_3 \sin \varkappa'_2 - y_2 b'_3 \cos \varkappa'_2 + f \cos \omega'_2 \\ B &= b_2 x_1 - b_1 y_1 \\ C &= c_2 x_1 - c_1 y_1 \\ B' &= b'_2 x_2 - b'_1 y_2 \\ C' &= c'_2 x_2 - c'_1 y_2 \end{aligned}\right\}. \tag{16.22}$$

Во второй системе взаимного ориентирования снимков свободный член l представляет собой определитель (16. 14), вычисленный по приближенным значениям элементов взаимного ориентирования

$$l = \begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg} \tau_0 & \operatorname{tg} \nu_0 \sec \tau_0 \\ x_1 & y_1 & -f \\ X'_{20} & Y'_{20} & Z'_{20} \end{vmatrix}. \tag{16.23}$$

Найдем частную производную

$$a = \frac{\partial F}{\partial \tau} = -\begin{vmatrix} x_1 & -f \\ X'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} \sec^2 \tau - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ X'_2 & Y'_2 \end{vmatrix} \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos^2 \tau} \sin \tau.$$

Аналогично вычислим остальные производные. В результате будем иметь

$$\left.\begin{aligned} a &= -(x_1 Z'_2 + f X'_2) \sec^2 \tau - (x_1 Y'_2 - y_1 X'_2) \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos^2 \tau} \sin \tau \\ b &= (x_1 Y'_2 - y_1 X'_2) \frac{\sec^2 \nu}{\cos \tau} \\ c &= (y_1 - x_1 \operatorname{tg} \tau) X'_2 + \left(f \operatorname{tg} \tau + y_1 \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos \tau}\right) Z'_2 \\ d &= -\left(f \operatorname{tg} \tau + y_1 \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos \tau}\right) [a_3 (x_2 \sin \Delta \varkappa + y_2 \cos \Delta \varkappa) - f \sin \Delta \alpha \sin \Delta \omega] + \\ &+ \left(f + x_1 \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos \tau}\right) [b_3 (x_2 \sin \Delta \varkappa + y_2 \cos \Delta \varkappa) + f \cos \Delta \omega] + (y_1 - x_1 \operatorname{tg} \tau) \times \\ &\times [c_3 (x_2 \sin \Delta \varkappa + y_2 \cos \Delta \varkappa + f \cos \Delta \alpha \sin \Delta \omega] \\ e &= \left(f \operatorname{tg} \tau + y_1 \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos \tau}\right) (a_1 y_2 - a_2 x_2) - \left(f + x_1 \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos \tau}\right) (b_1 y_2 - b_2 x_2) - \\ &- (y_1 - x_1 \operatorname{tg} \tau) (c_1 y_2 - c_2 x_2). \end{aligned}\right\} \tag{16.24}$$

Эти коэффициенты, как и свободный член l уравнений поправок, вычисляют по приближенным значениям элементов взаимного ориентирования.

Уравнения (16.19) выгодно применять для обработки снимков, элементы взаимного ориентирования которых значительны, а приближенные их значения известны.

4. Если элементы взаимного ориентирования относительно малы ($\varphi \leqslant 3°$), *для вычисления F_0 можно принять неизвестные равными нулю. Из-за малости* абсолютных значений неизвестных упрощаются также функциональные связи в поправках δF.

После преобразования уравнений (16.11) или (16.15), получим более простые уравнения поправок. Для случая ориентирования снимков в базисной системе координат коэффициенты при неизвестных в уравнении поправок (16.20) будут такими:

$$a = x_1 y_2; \quad b = x_2 y_1;$$

$$c = f_1 f_2 + y_1 y_2; \quad d = f_2 x_1; \quad e = -f_1 x_2,$$

а свободный член

$$l = f_1 y_2 - f_2 y_1.$$

В этом нетрудно убедиться, применив формулы (14.4) и (14.5). Для данного случая получим

$$\left.\begin{array}{c} a_1 = b_2 = c_3 = a_1' = b_2' = c_3' = 1 \\ a_2 = a_3 = b_1 = b_3 = c_1 = c_2 = a_2' = a_3' = b_1' = b_3' = c_1' = c_2' = 0 \\ X_1' = x_1; \quad X_2' = x_2; \quad Y_1' = y_1; \quad Y_2' = y_2 \\ Z_1' = -f_1; \quad Z_2' = -f_2 \end{array}\right\}. \tag{16.25}$$

В результате получим уравнение взаимного ориентирования первого порядка малости

$$x_1 y_2 \alpha_1' - x_2 y_1 \alpha_2' - (f_1 f_2 + y_1 y_2)\,\omega_2' + f_2 x_1 \varkappa_1' - f_1 x_2 \varkappa_2' + (f_2 y_1 - f_1 y_2) = v$$

или, когда $f_1 = f_2$,

$$\frac{x_1 y_2}{f}\alpha_1' - \frac{x_2 y_1}{f}\alpha_2' - \left(f + \frac{y_1 y_2}{f}\right)\omega_2' + x_1 \varkappa_1' - x_2 \varkappa_2' + q = v. \tag{16.26}$$

Таким же образом можно получить уравнение для взаимного ориентирования в системе координат левого снимка

$$(x_1 f_2 - f_1 x_2)\,\tau + (x_1 y_2 - y_1 x_2)\,\nu + x_2 y_1 \Delta\alpha + (f_1 f_2 + y_1 y_2)\,\Delta\omega + f_1 x_2 \Delta\varkappa + \\ + (f_1 y_2 - y_1 f_2) = v$$

или, считая $f_1 = f_2 = f$,

$$p\tau + \frac{yp}{f}\nu + \frac{x_2 y_1}{f}\Delta\alpha + \left(f + \frac{y_1 y_2}{f}\right)\Delta\omega + x_2 \Delta\varkappa - q = v. \tag{16.27}$$

§ 116. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ СПОСОБОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ

Для получения точных значений элементов взаимного ориентирования систему уравнений, приведенных к линейному виду, решают последовательными приближениями.

Допустим, что

$$\left.\begin{array}{l} a_1\delta\varphi_1 + b_1\delta\varphi_2 + c_1\delta\varphi_3 + d_1\delta\varphi_4 + e_1\delta\varphi_5 + l_1 = v_1 \\ a_2\delta\varphi_1 + b_2\delta\varphi_2 + c_2\delta\varphi_3 + d_2\delta\varphi_4 + e_2\delta\varphi_5 + l_2 = v_2 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ a_n\delta\varphi_1 + b_n\delta\varphi_2 + c_n\delta\varphi_3 + d_n\delta\varphi_4 + e_n\delta\varphi_5 + l_n = v_n \end{array}\right\} \tag{16.28}$$

— система уравнений взаимного ориентирования (16.20) или (16.26) или (16.27).

В матричной форме система (16.28) может быть представлена так:

$$AX+L=V. \tag{16.29}$$

Здесь

$$\left.\begin{aligned} A&=\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & e_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_n & b_n & c_n & d_n & e_n \end{pmatrix}; \quad X=\begin{pmatrix} \delta\varphi_1 \\ \delta\varphi_2 \\ \cdots \\ \delta\varphi_5 \end{pmatrix}; \\ L&=\begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \cdots \\ l_n \end{pmatrix}; \quad V=\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdots \\ v_n \end{pmatrix}. \end{aligned}\right\} \tag{16.30}$$

Введя весовые коэффициенты

$$P=\begin{pmatrix} p_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & p_2 & \ldots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \ldots & p_n \end{pmatrix}, \tag{16.31}$$

составим и решим нормальные уравнения

$$BX+W=0, \tag{16.32}$$

где

$$B=A^{\mathrm{T}}PA; \quad W=A^{\mathrm{T}}PL,$$

а A^{T} — транспонированная матрица A.

В результате получим $\delta\varphi_{1-5}$ в первом приближении. В дальнейшем, если исходными уравнениями служили (16.20), вычислим исправленные значения элементов взаимного ориентирования

$$\varphi^{\mathrm{I}}_{1-5}=\varphi_{0,1-5}+\delta\varphi^{\mathrm{I}}_{1-5}, \tag{16.33}$$

в которых индекс I указывает номер приближения. Если использовались уравнения (16.26) или (16.27), полученные в первом приближении величины $\delta\varphi_{1-5}$ считаются равными $\varphi^{\mathrm{I}}_{1-5}$, так как здесь $\varphi_{0,1-5}=0$.

Затем по уточненным значениям элементов вновь составим уравнения поправок, нормальные уравнения и после их решения найдем поправки к элементам первого приближения. После введения этих поправок получим значения элементов во втором приближении. Так следует действовать до тех пор, пока не будет удовлетворяться критерий взаимного ориентирования, записанный одним из его математических выражений, например

$$F_\varphi=Y'_1Z'_2-Z'_2Y'_1\leqslant\mu \tag{16.34}$$

или

$$y^0_1-y^0_2\leqslant\delta q, \tag{16.35}$$

где μ и δq задаются главным образом исходя из ошибок координат точек на снимках.

Определение элементов взаимного ориентирования последовательными приближениями сопровождается трансформированием в каждом приеме коорди-

нат точек на снимках. Когда элементы определяются в базисной системе координат, трансформирование выполняется по формулам (14.18)

$$\left.\begin{aligned} x^0 &= -f\frac{a_1x+a_2y-a_3f}{c_1x+c_2y-c_3f} \\ y^0 &= \frac{b_1x+b_2y-b_3f}{c_1x+c_2y-c_3f} \end{aligned}\right\}, \qquad \text{(а)}$$

в которых направляющие косинусы вычисляются для левого снимка по найденным значениям α_1', $\varkappa_1'$, а для правого — по α_2', ω_2', $\varkappa_2'$ ($x_0 = y_0 = 0$).

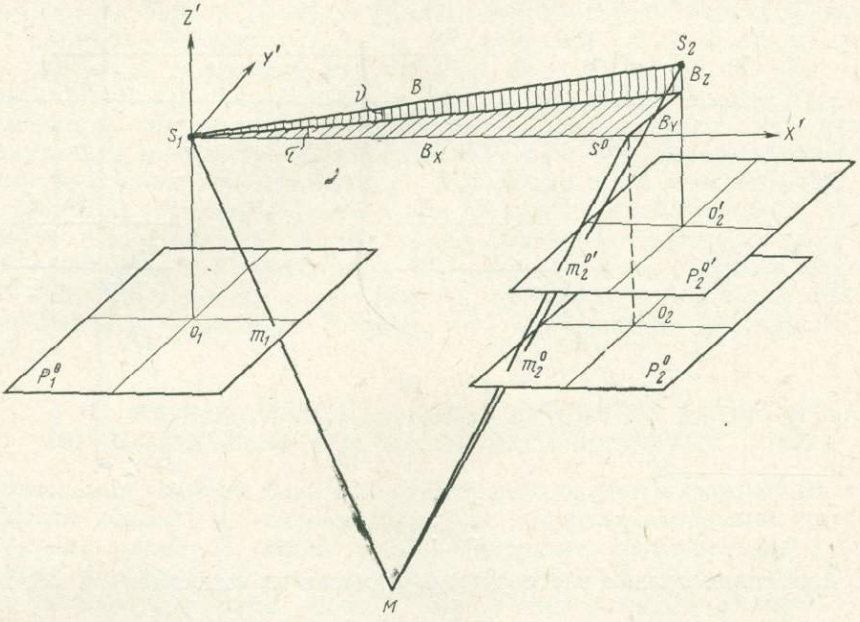


Рис. 201

Если взаимное ориентирование производится в системе координат левого снимка, трансформирование координат точек правого снимка осуществляется в два этапа. Вначале по формулам (а) вычисляются координаты точек x_2^0, $y_2^{0'}$, исправленные за угловые элементы $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\varkappa$, а затем в эти координаты вносят поправки за углы τ и ν.

После первого этапа координаты правого снимка приводятся к случаю съемки, при котором снимки P_1^0 и $P_2^{0'}$ занимают в принятой системе координат горизонтальное положение, как показано на рис. 201.

Вторым этапом вычислений следует привести координаты $x_2^{0'}$ и $y_2^{0'}$ точек правого снимка к такому расположению снимков, когда и базис проектирования будет горизонтален (P_1^0 и P_2^0).

Формулу для трансформирования абсцисс выведем из построений рис. 202, *а*, на котором дана проекция засечки на плоскость $X'Z'$ пространственной системы координат. Здесь P_1^0 и $P_2^{0'}$ образуют стереопару горизонтальных снимков с наклонного базиса, а P_1^0 и P_2^0 — стереопару идеального случая съемки.

Одну и ту же координату Z' некоторой произвольной точки для двух стереопар можно выразить формулами

$$Z' = -f\frac{B_X + x_2^{0'}\frac{B_Z}{f}}{x_1^0 - x_2^{0'}},$$

$$Z' = -f\frac{B_X}{x_1^0 - x_2^0}.$$

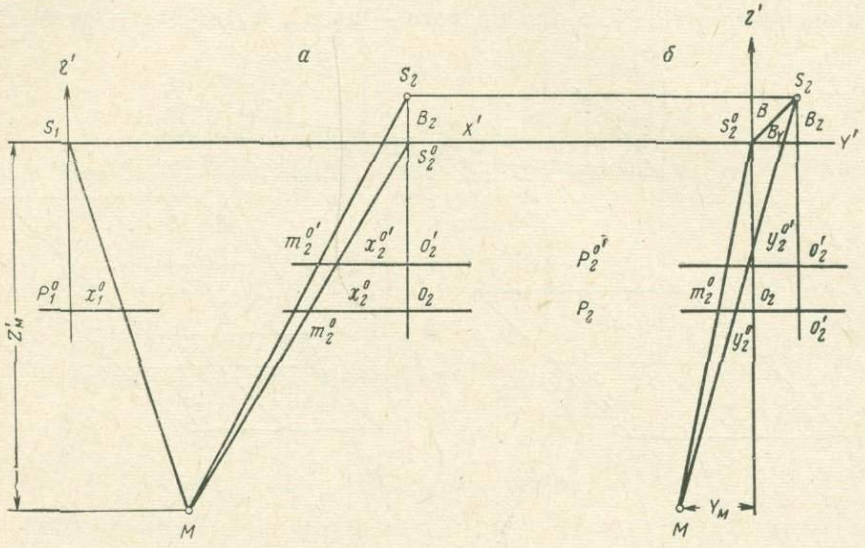


Рис. 202

Приравнивая правые части формул и решая их относительно x_2^0, получим

$$x_2^0 = x_1^0 - \frac{B_X p}{B_X + x_2^{0'}\frac{B_Z}{f}}, \qquad (16.36)$$

где $p = x_1^0 - x_2^{0'}$.

После подстановки в (16.36) $B_Z = B\sin\nu$, и $B_X = B\cos\nu\cos\tau$, будем иметь

$$x_2^0 = x_1^0 - \frac{p}{1 - \frac{x_2^{0'}}{f}\operatorname{tg}\nu\sec\tau}. \qquad (16.37)$$

Из рис. 202, *б*, на котором изображена проекция засечки на плоскость $Y'Z'$ пространственной системы координат, можно вывести формулу для трансформирования ординат.

Ордината некоторой точки может быть получена дважды:

как $$Y' = y_2^0\frac{Z'}{f},$$

или

$$Y' = y_2^{0'}\frac{Z' + B_Z}{f} - B_Y.$$

Приравнивая правые части выражений и решая относительно y_2^0, получим

$$y_2^0 = y_2^{0'} + \frac{B_Z}{Z'} y_2^{0'} - \frac{B_Y}{Z'} f. \tag{16.38}$$

Подставляя вместо Z', B_X, B_Z соотношения, использованные в (16.37), и учитывая, что $B_Y = B \cos \nu \sin \tau$, после преобразований получим

$$y_2^0 = y_2^{0'} - \frac{y_2^{0'} \operatorname{tg} \nu - f \sin \tau}{f \cos \tau - x_2^{0'} \operatorname{tg} \nu}. \tag{16.39}$$

При выводе формул (16.37) и (16.39) предполагалось, что фокусные расстояния снимков одинаковы ($f_1 = f_2$). В противном случае координаты точек правого снимка $x_2^{0'}$ и $y_2^{0'}$ следует умножить на коэффициент $K = f_1 : f_2$.

Для определения элементов взаимного ориентирования последовательными приближениями обычно выбирают избыточное число точек на стереопаре.

Избыточное количество точек позволяет повысить точность определения элементов взаимного ориентирования. Если число точек увеличивается с 6 до 12, то точность определения элементов возрастает приблизительно на 50%. Дальнейшее увеличение числа точек дает небольшое повышение точности определения элементов, но значительно увеличивает объем работ по измерению снимков [26, 28]. Поэтому можно считать, что оптимальное количество точек для решения задачи взаимного ориентирования снимков не должно превышать 12.

§ 117. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПО КООРДИНАТАМ СТАНДАРТНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ТОЧЕК

В отдельных случаях фотограмметрической обработке снимков (например, при рисовке рельефа на стереометрах, для контроля показаний статоскопа, при создании плановой основы и др.) допустимо использование элементов взаимного ориентирования пониженной точности. Применительно к таким случаям разработаны особые способы определения элементов взаимного ориентирования, в которых вычисления относительно просты и могут быть выполнены с помощью логарифмической линейки или настольных вычислительных машин.

Такие способы основаны на принципе измерения координат точек, расположенных на снимках по определенному стандарту. Вычисления же выполняются, как правило, по упрощенным формулам.

Измерения на стандартных точках могут использоваться и в строгих методах взаимного ориентирования последовательными приближениями, позволяя сократить объем вычислений.

Из уравнений (16.26) или (16.27) видно, что отдельные элементы взаимного ориентирования вызывают наиболее ощутимое изменение координат точек снимка в определенных его зонах.

Так, для базисной системы координат влияние α_1' или α_2' нарастает в зонах с максимальными значениями координат точек на снимках x_1 и y_1 или x_2 и y_2; ω' — в зонах максимальных значений y_1 или y_2; $\varkappa_1'$ или $\varkappa_2'$ — в зонах максимальных абсцисс x_1 или x_2. В то же время существуют зоны на снимках, в которых влияние отдельных элементов ориентирования не проявляется. Благодаря этому можно выбрать точки для измерений координат так, чтобы уравнения взаимного ориентирования для каждой точки содержали меньшее число

неизвестных. Система таких уравнений решается простыми преобразованиями.

Пусть для измерений выбрано шесть точек согласно схеме, показанной на рис. 203, т. е.

$$\left.\begin{array}{ll} x_{11}=x_{13}=x_{15}=0; & y_{13}=y_{14}=c \\ x_{12}=x_{14}=x_{16}=b; & y_{15}=y_{16}=-c \\ & y_{11}=y_{12}=0 \end{array}\right\}, \qquad (б)$$

где c — произвольная величина.

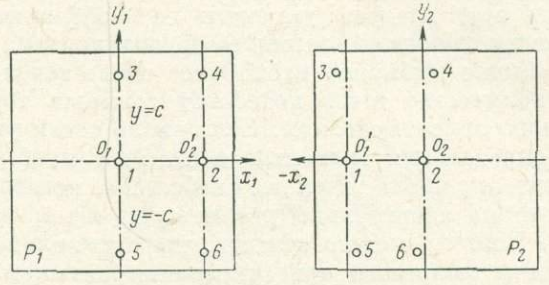


Рис. 203

Тогда точки на правом снимке стереопары при условии ориентирования снимков по начальным направлениям получат координаты

$$\left.\begin{array}{lll} x_{23}=-(b+\Delta p_3); & x_{24}=-\Delta p_4, & y_{21}=y_{22}=0 \\ x_{21}=-(b+\Delta p_1); & x_{22}=0; & y_{23}=c-q_3 \\ x_{25}=-(b+\Delta p_5); & x_{26}=-\Delta p_6; & y_{25}=-(c-q_5) \\ & y_{24}=c-q_4 & \\ & y_{26}=-(c-q_6) & \end{array}\right\}, \qquad (в)$$

так как $x_1 - x_2 = p = b + \Delta p$; $y_1 - y_2 = q$.

Когда превышения заснятой поверхности невелики, для плановой съемки можно в равенствах (в) пренебречь величинами Δp и q, т. е. считать

$$\left.\begin{array}{ll} x_{23}=x_{21}=x_{25}=-b; & x_{24}=x_{22}=x_{26}=0 \\ y_{23}=y_{24}=c; & y_{25}=y_{26}=-c \end{array}\right\}. \qquad (г)$$

В дальнейшем следует записать для каждой точки уравнения взаимного ориентирования, подставляя в (16.26) или (16.27) значения координат в соответствии с (б) и (в) и решая их относительно неизвестных величин. Ограничимся подробным выводом формул для получения элементов взаимного ориентирования в базисной системе координат. При выводе будем пренебрегать влиянием рельефа, т. е. используем равенство (г).

С учетом (16.26), (б) и (г) система уравнений взаимного ориентирования для шести стандартных точек запишется так:

$$\left.\begin{array}{llll}
3. & \frac{bc}{f}\alpha_2' - \left(f + \frac{c_2}{f}\right)\omega_2' & - b\varkappa_2' + q_3 = 0 \\
1. & - f\omega_2' & - b\varkappa_2' + q_1 = 0 \\
5. & -\frac{bc}{f}\alpha_2' - \left(f + \frac{c^2}{f}\right)\omega_2' & - b\varkappa_2' + q_5 = 0 \\
4. & \frac{bc}{f}\alpha_1' - \left(f + \frac{c^2}{f}\right)\omega_2' + b\varkappa_1' & + q_4 = 0 \\
2. & - f\omega_2' + b\varkappa_1' & + q_2 = 0 \\
6. & -\frac{bc}{f}\alpha_1' - \left(f + \frac{c^2}{f}\right)\omega_2' + b\varkappa_1' & + q_6 = 0
\end{array}\right\}. \qquad (16.40)$$

Произведя алгебраические действия над уравнениями по схеме (*4*)—(*6*) и (*3*)—(*5*) и решив их относительно α_1' и α_2', получим

$$\alpha_1' = -\frac{f}{2bc}(q_4 - q_6); \quad \alpha_2' = -\frac{f}{2bc}(q_3 - q_5), \qquad (16.41)$$

а по схемам (*4*) + (*6*) — 2 (*2*), а также (*3*) + (*5*) — 2 (*1*), будем иметь:

$$\omega_2'^{\mathrm{I}} = \frac{f}{2c^2}(q_4 + q_6 - 2q_2);$$

$$\omega_2'^{\mathrm{I}} = \frac{f}{2c^2}(q_3 + q_5 - 2q_1),$$

откуда

$$\omega_2' = \frac{\omega_2'^{\mathrm{I}} + \omega_2'^{\mathrm{II}}}{2}. \qquad (16.42)$$

Наконец, выполнив решение уравнений (*2*) и (*1*), найдем

$$\varkappa_1' = \frac{f}{b}\omega_2' - \frac{q_2}{b}, \qquad (16.43)$$

$$\varkappa_2' = \frac{f}{b}\omega_2' - \frac{q_1}{b}. \qquad (16.44)$$

Для вычислений по формулам (16.41)—(16.44) *достаточно знать поперечные параллаксы на шести стандартных точках пары снимков, ориентированных на стереокомпараторе по начальным направлениям или следу главной базисной плоскости левого снимка.*

Вертикальные параллаксы получают как разность отсчетов по шкалам прибора при визировании на все точки относительно исходной (обычно точки 2). Поэтому при вычислении величина q_2 *может быть опущена. Аналогичные формулы можно вывести и для другой системы элементов ориентирования снимков* τ, ν, $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\varkappa$.

Формулы (16.41)—(16.44) и им подобные называют формулами первого порядка малости. Согласно исследованиям они обеспечивают получение элементов взаимного ориентирования плановых снимков (углы наклона до 3°) с точностью порядка 2—4′, если рельеф сфотографированной поверхности не превышает $1/30H$ для $f = 70$ мм; $1/43H$ для $f = 100$ мм; $1/86H$ для $f = 200$ мм.

В противном случае следует использовать формулы, сохраняющие величины второго порядка малости, которые выводятся с учетом равенств (в). Они состоят из членов первого и второго порядков малости. Члены второго порядка малости содержат неизвестные элементы взаимного ориентирования, что затрудняет решение задачи. Для вычислений необходимо знать как поперечные, так и продольные параллаксы в каждой точке.

Для обработки снимков на стереометре и решения других задач широкое распространение получил способ определения элементов взаимного ориентирования по измерениям на стандартных точках, разработанный в ЦНИИГАиК под руководством Г. П. Жукова.

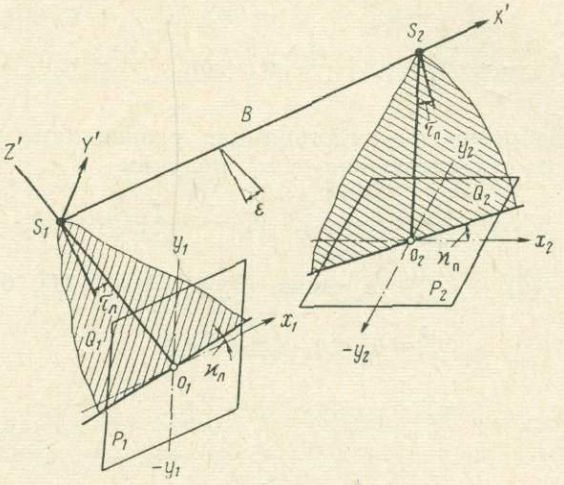


Рис. 204

Способ предусматривает ориентирование снимков в базисной системе координат (рис. 204) с несколько своеобразным выбором элементов ориентирования.

Взаимное положение снимков в этом способе устанавливают пять элементов:

$\tau_л$ — угол между осью ZZ пространственной системы координат и направлением оптической оси левого снимка S_1o_1 (соответствует углу α_1');

$\varkappa_л$ — угол между следом главной базисной плоскости левого снимка Q_1 и осью x_1 левого снимка (соответствует $\varkappa_1'$);

$\tau_п$ — угол между направлением оптической оси правого снимка и перпендикуляром к базису в главной базисной плоскости правого снимка Q_2;

ε — угол между главными базисными плоскостями;

$\varkappa_п$ — угол между следом главной базисной плоскости правого снимка и осью x_2 правого снимка.

Формулы первого порядка малости аналогичны выведенным ранее с заменой α_1' на $\tau_л$, α_2' на $\tau_п$ и ω_2' на ε.

Элементы взаимного ориентирования $\varkappa_л$ и $\varkappa_п$ обычно не определяются.

Более строгие формулы, сохраняющие величины второго порядка малости, предусматривают введение поправок к непосредственно измеренным величинам параллаксов и записываются также в виде функций измеренных величин, что представляет очевидные удобства при вычислениях.

Ниже приводятся формулы, рекомендованные наставлением при составлении карт масштабов 1 : 10 000 и 1 : 25 000

$$\left.\begin{aligned}
\Delta Q_1 &= \left\{K_1\left[\beta^2(Q_1-Q_2)\frac{Q_1+Q_2}{2}-Q_3^2+\beta Q_3P_1\right]+\right.\\
&\left.+K_2[Q_3^2-\beta Q_3P_3+Q_1^2]\right\}\frac{1}{100}\\
\Delta Q_2 &= \left\{K_1\left[\beta^2(Q_1-Q_2)\frac{Q_1+Q_2}{2}+Q_3^2+\beta Q_3P_2\right]+\right.\\
&\left.+K_2[Q_3^2-\beta Q_2P_4]\right\}\frac{1}{100}\\
\Delta Q_3' &= \{K_1[\beta^2(Q_1-Q_2)Q_3+\beta Q_3P_3]+K_2[2Q_1Q_3-\beta Q_2P_1]\}\frac{1}{100}\\
\Delta Q_3'' &= \{K_1[\beta^2(Q_1-Q_2)Q_3+\beta Q_3P_4']+K_2[Q_2Q_3-\beta Q_2P_2]\}\frac{1}{100}
\end{aligned}\right\}, \quad (16{,}45)$$

$$\begin{aligned}
Q_1 &= q_1-q_6; & P_1 &= \Delta p_4-\Delta p_6\\
Q_2 &= q_3-q_5; & P_2 &= \Delta p_3-\Delta p_5\\
Q_3' &= q_4+q_6; & P_3 &= \Delta p_4+\Delta p_6\\
Q_3'' &= q_3+q_5-2q_1; & P_4' &= \Delta p_3+\Delta p_5-2\Delta p_1\\
& & P_4 &= \Delta p_3+\Delta p_5
\end{aligned}$$

$$K_1=\frac{f^2}{2c}100$$

$$K_2=\frac{f}{2c}100$$

$$\beta=c:b$$

$$\tau_л=-\frac{f}{2bc}(Q_1+\Delta Q_1)$$

$$\tau_п=-\frac{f}{2bc}(Q_2+\Delta Q_2)$$

$$\varepsilon'=\frac{f}{2c^2}(Q_3'+\Delta Q_3')$$

$$\varepsilon''=\frac{f}{2c^2}(Q_3''+\Delta Q_3'')$$

а Δp и q — измеренные разности продольных параллаксов.

Совершенствованию метода ЦНИИГАиК посвящены работы М. Д. Коншина, Л. Ф. Валова и др. [21].

В заключение запишем зависимости для подсчета средних квадратических ошибок определения элементов взаимного ориентирования, используя для этого формулы (16.41)—(16.44), получим

$$\left.\begin{aligned}
m_{\alpha_1'} &= m_{\alpha_2'} = \frac{f}{bc\sqrt{2}}m_q\\
m_{\omega_2'} &= \frac{f}{2c^2}m_q\sqrt{3}\\
m_{\varkappa_1'} &= m_{\varkappa_2'} = \frac{m_q}{b}\sqrt{1+\frac{3}{4}\frac{f^4}{c^4}}
\end{aligned}\right\}. \quad (16.46)$$

Отсюда следует, что элементы взаимного ориентирования снимков, полученных короткофокусными фотокамерами, находятся с большей точностью, чем элементы снимков, полученных длиннофокусными фотоаппаратами. При данном значении фокусного расстояния фотоаппарата ошибки элементов будут тем меньше, чем величины b и c будут больше (см. рис. 203). Поэтому точки *3*, *4*, *5*, *6* надо выбирать по возможности дальше от начального направления. Однако расстояние от этих точек до краев снимка должно быть не менее 2 см, так как при меньшем расстоянии не всегда можно выдержать стандартное расположение точек вследствие углов поворота снимков. Кроме того, по мере приближения к краям снимков падает точность измерения, поскольку качество изображения в этих местах хуже, чем в центральной части.

§ 118. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Решение задачи взаимного ориентирования снимков не всегда однозначно. В отдельных случаях критерий пересечения одноименных проектирующих лучей удовлетворяется при различном относительном расположении снимков, т. е. возникает неопределенность взаимного ориентирования.

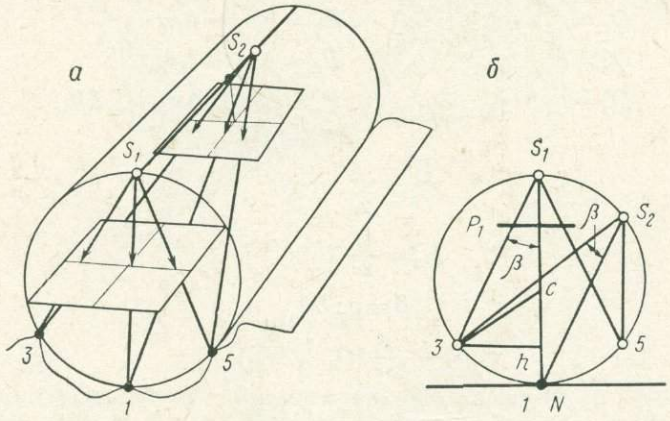


Рис. 205

Неопределенность взаимного ориентирования снимков возникает, когда фотографируемая поверхность близка к цилиндрической, а точки фотографирования попадают на образующие цилиндра, как это показано на рис. 205, *а*.

Спроектировав элементы на плоскость, перпендикулярную к образующим цилиндра (рис. 205, *б*), получим, что при любых перемещениях одной из точек фотографирования, например S_2, сохраняется равенство двугранных углов β, а следовательно, и ординат y.

Если точки S_1, S_2 и *1*, *3*, *5* лежат на окружности, то высота фотографирования

$$H = h : \sin^2\beta, \tag{16.47}$$

где h — превышение точки *3* (или *5*) над точкой *1*.

Угол β можно выразить через координаты точки снимка и фокусное расстояние камеры. Тогда

$$H = \frac{f^2+y^2}{y^2}\,h = \left(1+\frac{f^2}{y^2}\right)h, \tag{16.48}$$

где y — ордината точки *3* на снимке.

Очевидно, чем больше значение коэффициента, стоящего перед h в формуле (16.48), тем вероятнее появление неопределенности решения взаимного ориентирования. Для одинакового формата кадра он растет с увеличением фокусного расстояния съемочной камеры. Так, для $y = 70$ мм и $f = 70$, 100, 200 мм он равен 2, 3 и 9 соответственно, т. е. при фотографировании широкоугольной съемочной камерой неопределенность взаимного ориентирования возникает реже.

Неопределенности решения задачи взаимного ориентирования посвящены работы Н. Г. Келля, А. С. Скиридова, Г. П. Жукова, Н. И. Соколова и др.

Особое значение неопределенность взаимного ориентирования приобретает при аналитическом решении задачи по ограниченному числу точек. В этой связи выбор точек должен быть направленным. Лучше, если на местности они лежат примерно в одной плоскости, что обычно и требуется действующими наставлениями.

Глава 17

ВНЕШНЕЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

§ 119. ЭЛЕМЕНТЫ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ МОДЕЛИ

Для получения конечных результатов фотограмметрической обработки пары снимков необходимо знать положение модели относительно геодезической * системы координат $Q_\Gamma X_\Gamma Y_\Gamma$ (рис. 206), а также ее масштаб. Проведем из точки S_1 оси X'_Γ, Y'_Γ, Z'_Γ, параллельные осям X_Γ, Y_Γ, Z_Γ соответственно.

Положение модели однозначно определяют шесть параметров: X_{S_1}, Y_{S_1} Z_{S_1} — геодезические координаты начала S_1 фотограмметрической системы координат S_1XYZ; ξ — продольный угол наклона модели, составленный проекцией оси Z на плоскость $X'_\Gamma Z'_\Gamma$ с осью Z'_Γ; η — поперечный угол наклона модели, составленный осью Z и ее проекцией на плоскость $Z'_\Gamma X'_\Gamma$; θ — угол поворота модели вокруг оси Z, заключенный между осью Y и следом плоскости $Z'_\Gamma Y'_\Gamma$.

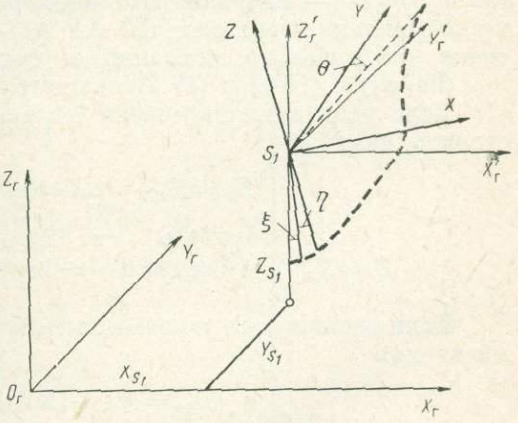


Рис. 206

Величины X_S, Y_S, Z_S, ξ, η, θ и знаменатель масштаба модели t называют элементами внешнего ориентирования модели, а их определение составляет сущность решения задачи внешнего ориентирования модели.

---

* Понятие «Геодезическая система координат» справедливо только при использовании фотограмметрии в топографических целях. Однако его принято распространять и на системы координат, ориентированные в пространстве иным образом.

§ 120. УРАВНЕНИЯ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ МОДЕЛИ

Чтобы найти элементы внешнего ориентирования модели, необходимы опорные точки.

Запишем соотношения между координатами точки модели в двух системах координат $X_\Gamma Y_\Gamma Z_\Gamma$ и XYZ [27]

$$\begin{pmatrix} X_\Gamma \\ Y_\Gamma \\ Z_\Gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{S_1} \\ Y_{S_1} \\ Z_{S_1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} t, \tag{17.1}$$

где a_{1-3}, b_{1-3}, c_{1-3} — направляющие косинусы, вычисляемые по формулам (14.4), в которые вместо углов α, ω, $\varkappa$ подставляют углы ξ, η, θ.

Если выражения (17.1) записать для опорных точек, то из них можно определить элементы внешнего ориентирования.

Так как искомых элементов семь, таких точек должно быть не менее трех, причем для одной из них достаточно знать только одну координату — высоту. Опорные точки не должны лежать на одной прямой.

Уравнения внешнего ориентирования можно представить в несколько иной форме

$$\begin{pmatrix} X_\Gamma \\ Y_\Gamma \\ Z_\Gamma \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_{\Gamma_1} \\ Y_{\Gamma_1} \\ Z_{\Gamma_1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} t, \tag{17.2}$$

где $X_{\Gamma_1} Y_{\Gamma_1} Z_{\Gamma_1}$ — координаты одной из опорных точек (исходной) в геодезической системе координат; $\Delta X\ \Delta Y\ \Delta Z$ — приращения координат определяемой точки относительно исходной в фотограмметрической системе координат.

Формулы (17.1) и (17.2) являются строгими.

Если углы наклона модели ξ и η малы, то уравнения (17.2) можно представить так:

$$\left.\begin{aligned} X_\Gamma &= X_{\Gamma_1} + (\Delta X \cos\theta - \Delta Y \sin\theta - \Delta Z\xi)\, t \\ Y_\Gamma &= Y_{\Gamma_1} + (\Delta X \sin\theta + \Delta Y \cos\theta - \Delta Z\eta)\, t \\ Z_\Gamma &= Z_{\Gamma_1} + [\Delta X (\xi \cos\theta + \eta \sin\theta) + \Delta Y (\eta \cos\theta - \xi \sin\theta) + \Delta Z]\, t \end{aligned}\right\}. \tag{17.3}$$

Если же малы все угловые элементы внешнего ориентирования, то получим уравнения

$$\left.\begin{aligned} X_\Gamma &= X_{\Gamma_1} + (\Delta X - \Delta Y\theta - \Delta Z\xi)\, t \\ Y_\Gamma &= Y_{\Gamma_1} + (\Delta X\theta + \Delta Y - \Delta Z\eta)\, t \\ Z_\Gamma &= Z_{\Gamma_1} + (\Delta X\xi + \Delta Y\eta + \Delta Z)\, t \end{aligned}\right\}. \tag{17.4}$$

Наконец, в случае, когда все угловые элементы ориентирования малы, а знаменатель масштаба модели отличается от единицы на малую величину Δt, имеем:

$$\left.\begin{aligned} X_\Gamma &= X_{\Gamma_1} + \Delta X\, \Delta t - \Delta Y\theta - \Delta Z\xi \\ Y_\Gamma &= Y_{\Gamma_1} + \Delta X\theta + \Delta Y\, \Delta t - \Delta Z\eta \\ Z_\Gamma &= Z_{\Gamma_1} + \Delta X\xi + \Delta Y\eta + \Delta Z\, \Delta t \end{aligned}\right\}. \tag{17.5}$$

§ 121. АНАЛИТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ МОДЕЛИ ПО ОПОРНЫМ ТОЧКАМ

Уравнения внешнего ориентирования (17.1) и (17.2) трансцендентны. Поэтому приходится их преобразовывать в приближенные, но линеаризованные в отношении неизвестных выражения. Чтобы получить неизвестные достаточно точными, их находят последовательными приближениями.

А. Н. Лобановым предложен способ преобразования уравнений (17.1) по той же схеме, что и уравнений взаимного ориентирования (см. гл. 16): строгие уравнения F представляются в виде суммы двух выражений F_0 и δF.

Под F_0 понимают правую часть (17.1), вычисленную по приближенным значениям элементов ориентирования, а δF — сумму произведений частных производных от F по каждому элементу ориентирования на поправки к приближенным значениям.

В результате получают систему линейных уравнений

$$\left.\begin{aligned} a_X\,\delta X_{S_1} + d_X\,\delta\xi + e_X\,\delta\eta + f_X\,\delta\theta + g_X\,\delta t + l_X = v_X \\ b_Y\,\delta Y_{S_1} + d_Y\,\delta\xi + e_Y\,\delta\eta + f_Y\,\delta\theta + g_Y\,\delta t + l_Y = v_Y \\ c_Z\,\delta Z_{S_1} + d_Z\,\delta\xi + e_Z\,\delta\eta + f_Z\,\delta\theta + g_Z\,\delta t + l_Z = v_Z \end{aligned}\right\}, \tag{17.6}$$

где

$$\left.\begin{aligned} a_X &= \frac{\partial X_\Gamma}{\partial X_{S_1}} = 1; \quad b_Y = \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial Y_{S_1}} = 1 \\ c_Z &= \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial Z_{S_1}} = 1; \quad d_X = \frac{\partial X_\Gamma}{\partial\xi} = (Z'_\Gamma) \\ d_Y &= \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial\xi} = 0; \quad d_Z = \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial\xi} = (X'_\Gamma) \\ e_X &= \frac{\partial X_\Gamma}{\partial\eta} = -(Y'_\Gamma)\sin\xi \\ e_Y &= \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial\eta} = -(Y'_\Gamma)\operatorname{tg}\eta - \frac{1}{\cos\eta}Zt \\ e_Z &= \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial\eta} = (Y'_\Gamma)\cos\xi \\ f_X &= \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial\theta} = (a_2X - a_1Y)\,t \\ f_Y &= \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial\theta} = (b_2X - b_1Y)\,t \\ f_Z &= \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial\theta} = (c_2X - c_1Y)\,t \\ g_X &= \frac{\partial X_\Gamma}{\partial t} = (X'_\Gamma); \quad g_Y = \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial t} = (Y'_\Gamma) \\ g_Z &= \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial t} = (Z'_\Gamma); \quad l_X = (X_{S_1}) + (X'_\Gamma) - X_\Gamma \\ l_Y &= (Y_{S_1}) + (Y'_\Gamma) - Y_\Gamma \\ l_Z &= (Z_{S_1}) + (Z'_\Gamma) - Z_\Gamma \end{aligned}\right\}, \tag{17.7}$$

а $(X_{S_1})\,(Y_{S_1})\,(Z_{S_1})$, $(X'_\Gamma)\,(Y'_\Gamma)\,(Z'_\Gamma)$ — приближенные значения координат.

Если уравнений (17.6) больше, чем неизвестных, то они решаются под условием $[pv^2] = \min$.

Для частного случая, когда ξ, η и θ малы, а t близко к единице, можно воспользоваться приближенными уравнениями

$$\left.\begin{aligned} \delta X_{S_1} - Z\xi - Y\theta + X\,\delta t + l_X &= v_X \\ \delta Y_{S_1} - Z\eta + X\theta + Y\,\delta t + l_Y &= v_Y \\ \delta Z_{S_1} - X\xi + Y\eta + Z\,\delta t + l_Z &= v_Z \end{aligned}\right\}. \tag{17.8}$$

Для плановой съемки можно применить способ последовательного определения неизвестных.

Образовав приращение координат всех опорных точек относительно исходной в двух системах координат, вычислим знаменатель масштаба

$$t = \frac{L_\Gamma}{L} = \frac{(\Delta X_\Gamma^2 + \Delta Y_\Gamma^2 + \Delta Z_\Gamma^2)^{1/2}}{(\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2)^{1/2}}. \tag{17.9}$$

где L_Γ — расстояние между опорными точками в натуре, L — соответствующее расстояние на модели.

Если есть избыточные данные, значение t получают как среднее весовое из всех комбинаций

$$t_{cp} = \frac{L_1 t_1 + L_2 t_2 + \ldots + L_n t_n}{L_1 + L_2 + \ldots + L_n}. \tag{17.10}$$

Умножив на знаменатель масштаба приращения координат точек модели, запишем уравнения (17.2) так:

$$\left.\begin{aligned} a_1 \Delta X^0 + a_2 \Delta Y^0 + a_3 \Delta Z^0 - \Delta X_\Gamma &= 0 \\ b_1 \Delta X^0 + b_2 \Delta Y^0 + b_3 \Delta Z^0 - \Delta Y_\Gamma &= 0 \\ c_1 \Delta X^0 + c_2 \Delta Y^0 + c_3 \Delta Z^0 - \Delta Z_\Gamma &= 0 \end{aligned}\right\}, \tag{17.11}$$

где ΔX^0, ΔY^0, ΔZ^0 — масштабированные приращения.

Уравнения (17.11) связаны лишь угловыми элементами внешнего ориентирования. При плановой съемке, как правило, наклоны модели ξ и η малы. Поэтому для приведения уравнений к линейному виду воспользуемся формулами (17.3), преобразовав их так

$$\left.\begin{aligned} \Delta X^0 \cos\theta - \Delta Y^0 \sin\theta - \Delta Z^0 \xi - \Delta X_\Gamma &= 0 \\ \Delta Y^0 \cos\theta + \Delta X^0 \sin\theta - \Delta Z^0 \eta - \Delta Y_\Gamma &= 0 \\ (\Delta X^0 \cos\theta - \Delta Y^0 \sin\theta)\,\xi + (\Delta Y^0 \cos\theta + \Delta X^0 \sin\theta)\,\eta + \Delta Z^0 - \Delta Z_\Gamma &= 0 \end{aligned}\right\}. \tag{17.12}$$

Заменяя в третьем уравнении выражения в скобках соответствующими им значениями из первых двух уравнений, имеем:

$$\left.\begin{aligned} \Delta X^0 \cos\theta - \Delta Y^0 \sin\theta - (\Delta Z^0 \xi + \Delta X_\Gamma) &= 0 \\ \Delta Y^0 \cos\theta + \Delta X^0 \sin\theta - (\Delta Z^0 \eta + \Delta Y_\Gamma) &= 0 \\ \Delta X_\Gamma \xi + \Delta Y_\Gamma \eta + \Delta Z^0 (\xi^2 + \eta^2) + (\Delta Z^0 - \Delta Z_\Gamma) &= 0 \end{aligned}\right\}. \tag{17.13}$$

Здесь третье уравнение позволяет определить углы наклона модели ξ и η независимо от угла поворота θ.

Решать системы уравнений (17.13) целесообразно постепенно: сначала найти ξ и η, составив третье уравнение для каждой опорной точки, а затем — $\cos\theta$ и $\sin\theta$ из первого и второго уравнений, составленных тоже для каждой опорной точки.

Обозначив известные части уравнений

$$\left.\begin{aligned} -(\Delta Z^0\xi - \Delta X_r) &= L_X \\ -(\Delta Z^0\eta - \Delta Y_r) &= L_Y \\ \Delta Z^0(\xi^2+\eta^2) + \Delta Z^0 - \Delta Z_r &= L_Z \end{aligned}\right\}, \tag{17.14}$$

получим

$$\left.\begin{aligned} \Delta X^0\cos\theta - \Delta Y^0\sin\theta + L_X &= 0 \\ \Delta Y^0\cos\theta + \Delta X^0\sin\theta + L_Y &= 0 \\ \Delta Z_r\xi + \Delta Y_r\eta + L_Z &= 0 \end{aligned}\right\}. \tag{17.15}$$

Решать системы уравнений (17.15) можно с помощью настольных вычислительных средств. В первом приеме решения в свободном члене третьего уравнения величиной $\Delta Z^0(\xi^2+\eta^2)$ пренебрегают, а в последующих используют ξ и η из результатов предыдущих приближений.

Формулы (17.15) удобны и для аналитического метода внешнего ориентирования модели, созданной на универсальных приборах.

Можно определить и координаты начала фотограмметрической системы координат — X_{S_1}, Y_{S_1}, Z_{S_1}, если известны координаты XYZ хотя бы одной из опорных точек. Для этого достаточно решить уравнения (17.1) относительно X_{S_1}, Y_{S_1}, Z_{S_1}, подставив в них определенные ранее значения ξ, η, θ и t.

По формулам (17.1) или (17.2) следует произвести преобразование координат любой точки модели, используя найденные элементы внешнего ориентирования.

§ 122. ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВНУТРЕННЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛИ ПО ПАРЕ СНИМКОВ

Погрешности координат точек модели в зависимости от ошибок элементов внутреннего ориентирования снимков f, x_0, y_0 в общем виде могут быть записаны так:

$$\left.\begin{aligned} \delta X &= \frac{\delta F_X}{\partial f}\delta f + \frac{\partial F_X}{\partial x_0}\delta x_0 + \frac{\partial F_X}{\partial y_0}\delta y_0 \\ \delta Y &= \frac{\partial F_Y}{\partial f}\delta t + \frac{\partial F_Y}{\partial x_0}\delta x_0 + \frac{\partial F_Y}{\partial y_0}\delta y_0 \\ \delta Z &= \frac{\partial F_Z}{\partial f}\delta f + \frac{\partial F_Z}{\partial x_0}\delta x_0 + \frac{\partial F_Z}{\partial y_0}\delta y_0 \end{aligned}\right\}, \tag{17.16}$$

где F_X, F_Y, F_Z — функции, описывающие преобразования для получения координат точек модели.

В дальнейшем будем полагать, что модель построена в базисной системе координат * по снимкам планового случая съемки. Для нее справедливы соотношения

$$\left.\begin{aligned} F_X = X = B\frac{x_1+\Delta x_1}{p+\Delta p} &= B\frac{x_1+\left(f+\frac{x_1^2}{f}\right)\alpha_1'-y_1\varkappa_1'}{p+\left(f+\frac{x_1^2}{f}\right)\Delta\alpha'-\frac{x_1y_1}{f}\omega_2'-y_1\Delta\varkappa'+} \\ &\qquad +2\frac{x_1p}{f}\alpha_2'+\frac{y_1p}{f}\omega_2'-\frac{p^2}{f}\alpha_2' \\ F_Y = Y = B\frac{y_1+\Delta y_1}{p+\Delta p} &= B\frac{y_1+\frac{x_1y_1}{f}\alpha_1'+x_1\varkappa_1'}{p+\left(f+\frac{x_1^2}{f}\right)\Delta\alpha'-\frac{x_1y_1}{f}\omega_2'-y_1\Delta\varkappa'+} \\ &\qquad +2\frac{x_1p}{f}\alpha_2'+\frac{y_1p}{f}\omega_2'-\frac{p^2}{f}\alpha_2' \\ F_Z = Z = B\frac{f}{p+\Delta p} &= B\frac{f}{p+\left(f+\frac{x_1^2}{f}\right)\Delta\alpha'-\frac{x_1y_1}{f}\omega_2'-y_1\Delta\varkappa'+} \\ &\qquad +2\frac{x_1p}{f}\alpha_2'+\frac{y_1p}{f}\omega_2'-\frac{p^2}{f}\alpha_2' \end{aligned}\right\}, \qquad (17.17)$$

в которых поправки Δx, Δy, Δp к измеренным по снимкам x_1, y_1, p представлены как функции углов α_1', α_2', ω_2', $\varkappa_1'$, $\varkappa_2'$ (с учетом величин первого порядка малости). При этом $\Delta\alpha' = \alpha_1' - \alpha_2'$ и $\Delta\varkappa' = \varkappa_1' - \varkappa_2'$.

После дальнейших преобразований (17.17) имеем:

$$\left.\begin{aligned} F_X &= B\frac{x_1}{p}\left(1+\frac{f^2+x_1^2}{fx_1}\alpha_1'-\frac{y_1}{x_1}\varkappa_1'+\frac{p-2x_1}{f}\alpha_2'-\right. \\ &\left.-\frac{f^2+x_1^2}{pf}\Delta\alpha'+\frac{x_1y_1-py_1}{pf}\omega_2'+\frac{y_1}{p}\Delta\varkappa'\right) \\ F_Y &= B\frac{y_1}{p}\left(1+\frac{x_1}{f}\alpha_1'+\frac{x_1}{y_1}\varkappa_1'+\frac{p-2x_1}{f}\alpha_2'-\right. \\ &\left.-\frac{f^2+x_1^2}{pf}\Delta\alpha'+\frac{x_1y_1-py_1}{pf}\omega_2'+\frac{y_1}{p}\Delta\varkappa'\right) \\ F_Z &= B\frac{f}{p}\left(1+\frac{p-2x_1}{f}\alpha_2'-\frac{f^2+x_1^2}{pf}\Delta\alpha'+\right. \\ &\left.+\frac{x_1y_1-py_1}{pf}\omega_2'-\frac{y_1}{p}\Delta\varkappa'\right) \end{aligned}\right\}, \qquad (17.18)$$

откуда при нулевых значениях элементов ориентирования снимков можно получить известные формулы

$$X=\frac{B}{p}x_1, \quad Y=\frac{B}{p}y_1 \quad \text{и} \quad Z=\frac{B}{p}f.$$

---

* Выводы последующего анализа справедливы и для случая построения модели в системе координат исходного снимка стереопары.

Неверное положение главной точки на снимках приведет к погрешностям измерений координат x и y. Поэтому для решения уравнений (17.16) вместо $\frac{\partial F}{\partial x_0}$ и $\frac{\partial F}{\partial y_0}$ можно принять $\frac{\partial F}{\partial x}$ и $\frac{\partial F}{\partial y}$. После решения и небольших преобразований получим

$$
\left.
\begin{aligned}
\delta X = \frac{B}{p}\Big[& x_1\Big(\frac{f^2-x_1^2}{f^2x_1}\,\alpha_1' - \frac{p-2x_1}{f^2}\,\alpha_2' - \frac{f^2-x_1^2}{pf^2}\,\Delta\alpha' - \\
& - \frac{x_1y_1-py_1}{pf^2}\,\omega_2'\Big)\delta f + \Big(\frac{2x_1}{f}\,\alpha_1' + \frac{p-4x_1}{f}\,\alpha_2' - \\
& - \frac{f^2-3x_1^2}{pf}\,\Delta\alpha' + \frac{2x_1y_1-py_1}{pf}\,\omega_2' + \frac{y_1}{p}\,\Delta\varkappa'\Big)\delta x_0 + \\
& + \Big(\frac{x_1^2-x_1p}{pf}\,\omega_2' + \frac{x_1}{p}\,\Delta\varkappa' - \varkappa_1'\Big)\delta y_0\Big] + \frac{B}{p}\,\delta x_0 \\
\delta Y = \frac{B}{p}\Big[& y_1\Big(\frac{x_1}{f^2}\,\alpha_1' - \frac{p-2x_1}{f^2}\,\alpha_2' - \frac{f^2-x_1^2}{pf^2}\,\Delta\alpha' - \\
& - \frac{x_1y_1-py_1}{pf^2}\,\omega_2'\Big)\delta f + \Big(\frac{y_1}{f}\,\alpha_1' + \varkappa_1' - \frac{2y_1}{f}\,\alpha_2' - \\
& - \frac{2x_1y_1}{pf}\,\Delta\alpha' + \frac{y_1^2}{pf}\,\omega_2'\Big)\delta x_0 + \Big(\frac{x_1}{f}\,\alpha_1' + \frac{p-2x_1}{f}\,\alpha_2' - \\
& - \frac{f^2+x_1^2}{pf}\,\Delta\alpha' + 2\,\frac{x_1y_1-py_1}{pf}\,\omega_2' - \\
& - 2\,\frac{y_1}{p}\,\Delta\varkappa'\Big)\delta y_0\Big] + \frac{B}{p}\,\delta y_0 \\
\delta Z = \frac{B}{p}\Big[& \Big(-\frac{2f}{p}\,\Delta\alpha' - \frac{y_1}{p}\,\Delta\varkappa'\Big)\delta f + \Big(2\alpha_2' - \\
& - 2\,\frac{x_1}{p}\,\Delta\alpha + \frac{y_1}{p}\,\omega_2'\Big)\delta x_0 + \Big(\frac{x_1-p}{p}\,\omega_2' - \\
& - \frac{f}{p}\,\Delta\varkappa'\Big)\delta y_0\Big] + \frac{B}{p}\,\delta f.
\end{aligned}
\right\} \qquad (17.19)
$$

Формулы (17.19) *позволяют оценить влияние ошибок элементов внутреннего* ориентирования на любую из трех координат точек модели, построенной в результате взаимного ориентирования.

Из формул (17.9) следует, что влияние ошибок элементов внутреннего ориентирования на координаты X, Y, Z состоит из двух частей. Первая часть зависит от элементов взаимного ориентирования α_1', α_2', ω_2', $\varkappa_1'$, $\varkappa_2'$, вторая часть, выраженная последними членами формул, не зависит от этих элементов. Если снимки горизонтальные, то первая часть равна нулю.

Чтобы выяснить требования к точности сохранения элементов внутреннего ориентирования при взаимном ориентировании снимков, запишем выражения (17.19), сохраняя в них только первую часть членов.

При записи будем предполагать самые неблагоприятные условия, при которых произойдет суммирование всех членов формул для предельных значений координат и угловых величин, $x_1 = y_1 = p = a$, $\alpha_1' = \alpha_2' = \omega_2' = \varkappa_1' = \varkappa_2' = \beta$. Подставим также вместо $\delta X = \delta x\frac{B}{p}$, $\delta Y = \delta y\frac{B}{p}$ и $\delta Z = -\frac{Bf}{p^2}\,\delta p$.

В результате получим

$$\left.\begin{aligned}
\delta x &\approx \left(2+7\frac{a^2}{f^2}\right)\beta\,\delta f+\left(1+\frac{f}{a}+13\frac{a}{f}\right)\ \delta x_0+2\left(1+\frac{a}{f}\right)\beta\,\delta y_0\\
\delta y &\approx \left(1+7\frac{a^2}{f^2}\right)\beta\,\delta f+\left(1+6\frac{a}{f}\right)\beta\,\delta x_0+\left(2+\frac{f}{a}+9\frac{a}{f}\right)\beta\,\delta y_0\\
\delta p &\approx \left(2+\frac{a}{f}\right)\beta\,\delta f+5\frac{a}{f}\beta\,\delta x_0+\left(1+2\frac{a}{f}\right)\beta\,\delta y_0
\end{aligned}\right\}. \qquad (17.20)$$

Поставим условие, чтобы погрешности каждого из элементов внутреннего ориентирования вносили ошибки $\delta x = \delta y$, не превышающие 0,02 мм, и δp не больше 0,01 мм. Тогда для разных фокусных расстояний и $a = 70$ мм, $\beta = -1 : 30$ получим данные, приведенные в табл. 8.

Таблица 8

f, мм	$\delta x = 0{,}02$ мм			$\delta y = 0{,}02$ мм			$\delta p = 0{,}01$ мм		
	δf, мм	δx_0, мм	δy_0, мм	δf, мм	δx_0, мм	δy_0, мм	δf, мм	δx_0, мм	δy_0, мм
70	0,07	0,04	0,15	0,08	0,09	0,05	0,20	0,12	0,20
100	0,10	0,05	0,20	0,14	0,12	0,07	0,22	0,17	0,24
200	0,20	0,08	0,25	0,30	0,20	0,08	0,25	0,38	0,38

Рассмотрим требования к тем же элементам при построении засечки. Из выражений (17.19) составим формулы, сохраняющие вторую группу членов, а именно

$$\delta X = \frac{B}{p}\delta x_0; \quad \delta Y = \frac{B}{p}\delta y_0; \quad \delta Z = \frac{B}{p}\delta f. \qquad (17.21)$$

Согласно формулам ошибки элементов внутреннего ориентирования δx_0 и δy_0 искажают только координаты X и Y, а δf — координату Z. Причем искажения δx_0, δy_0, δf непосредственно деформируют одну из определяемых координат, а потому требования к сохранению элементов внутреннего ориентирования должны соответствовать точности конечных результатов.

В самом деле, заменяя в (17.21) $B : p = Z : f$, имеем:

$$\delta X = \frac{Z}{f}\delta x_0; \quad \delta Y = \frac{Z}{f}\delta y_0; \quad \delta Z = \frac{Z}{f}\delta f, \qquad (17.22)$$

откуда

$$\delta x_0 = \delta x; \quad \delta y_0 = \delta y; \quad \delta f = \frac{\delta Z}{Z} f, \qquad (17.23)$$

где δx и δy — возможная точность получения координат точек на снимках, $\delta Z : Z$ — относительная ошибка определения высот.

Например, допуская $\delta Z : Z = 1 : 3000$, для f равного 70, 100, 200 мм, получим δf равное 0,02; 0,03; 0,07 мм соответственно.

Таковы требования к точности сохранения элементов внутреннего ориентирования, когда модель построена в свободной системе координат. Последующее внешнее ориентирование модели по опорным точкам несколько перераспределяет соотношения между искомыми величинами и элементами внутреннего ориентирования снимков. Иными становятся и их допустимые погрешности.

В процессе внешнего ориентирования оперируют приращениями координат всех точек модели относительно одной опорной

$$\Delta X_i = X_i - X_0; \quad \Delta Y_i = Y_i - Y_0; \quad \Delta Z_i = Z_i - Z_0.$$

Ошибки приращений координат в зависимости от δx_0, δy_0, δf с учетом (17.22) описываются формулами

$$\left.\begin{aligned} \delta\Delta_X &= \delta X_i - \delta X_0 = \frac{Z_i - Z_0}{f}\,\delta x_0 = \frac{h}{f}\,\delta x_0 \\ \delta\Delta_Y &= \delta Y_i - \delta Y_0 = \frac{Z_i - Z_0}{f}\,\delta y_0 = \frac{h}{f}\,\delta y_0 \\ \delta\Delta_Z &= \delta Z_i - \delta Z_0 = \frac{Z_i - Z_0}{f}\,\delta f = \frac{h}{f}\,\delta f \end{aligned}\right\}. \tag{17.24}$$

Откуда следует критерий сохранения x_0, y_0, f

$$\delta\,(x_0 y_0 f) = \frac{f}{h}\,\delta\,(XYZ), \tag{17.25}$$

который в k раз грубее, чем для свободной модели, т. е.

$$k = \frac{Z}{h}$$

Для плоско-равнинной местности, когда модель ориентирована в геодезической системе координат, значения элементов внутреннего ориентирования не критичны.

Если допущена ошибка в установке элементов внутреннего ориентирования для одного из снимков, можно доказать, что результирующее влияние этой ошибки на определение координат точек модели согласуется с критерием (17.25).

Например, предполагая $f_1 \neq f_2$, можно считать $\delta f = b_Z$. Следовательно,

$$\delta p = \frac{x_{\max}}{f}\,b_z = \frac{p}{f}$$

или

$$\delta Z = \frac{Z}{f}\,\delta f.$$

В приведенных рассуждениях упоминался плановый случай съемки при решении задачи взаимного ориентирования.

В общем случае съемки требования к точности элементов внутреннего ориентирования для взаимного ориентирования снимков и построения засечки совпадают.

§ 123. ДЕФОРМАЦИЯ МОДЕЛИ

Модель объекта, построенная по паре снимков, всегда будет несколько деформирована. Деформацию вызывает совокупность погрешностей, сопровождающих любые фотограмметрические преобразования.

Эти погрешности могут быть разбиты на три группы:

1) геометрические ошибки снимков, возникающие в результате нарушения «идеальных» условий получения изображений (см. гл. 2);

2) инструментальные ошибки, которые появляются из-за нестрогости конструкции приборов, используемых для обработки снимков;

3) методические ошибки, возникающие в результате теоретических «упрощений», допускаемых при выполнении отдельных процессов построения модели, и др.

Наиболее ощутима деформация модели из-за геометрических ошибок снимков.

Общая деформация модели складывается из постоянной для каждой стереомодели части и случайных искажений. Последние являются следствием главным образом случайных ошибок визирования и зависят от измерительных качеств снимков (разрешающей способности, контраста и «смаза» изображений и др.).

После выявления и исключения постоянной составляющей деформации случайная ее часть будет определять окончательную точность результатов построения модели по паре снимков. Сосредоточим вначале внимание на систематических искажениях модели, принимая термин «деформация» только для них.

Широко распространено приближенное описание систематической деформации степенными полиномами [27]

$$\left.\begin{aligned}
\delta X &= A_0 + A_1 X + A_2 Y + A_3 XY + A_4 X^2 + A_5 Y^2 + A_6 X^2 Y + \dots \\
\delta Y &= B_0 + B_1 X + B_2 Y + B_3 XY + B_4 X^2 + B_5 Y^2 + B_6 X^2 Y + \dots \\
\delta Z &= C_0 + C_1 X + C_2 Y + C_3 XY + C_4 X^2 + C_5 Y^2 + C_6 X^2 Y + \dots
\end{aligned}\right\}, \qquad (17.26)$$

где X и Y — координаты точки модели, а A_i — постоянные коэффициенты.

Чем выше порядок степенных полиномов, тем полнее они аппроксимируют реальные искажения модели. Но так как коэффициенты полиномов находятся по координатам опорных точек, на практике порядок полиномов выбирают оптимально малым. Так, для описания деформации, вызванной ошибками взаимного ориентирования, достаточно использовать полиномы второй и третьей степеней. Докажем это.

В выведенных ранее для построения модели соотношениях (17.18) будем считать искаженными угловые элементы ориентирования. Погрешности $\delta\alpha_1'$, $\delta\varkappa_1'$, $\delta\omega_2'$, $\delta\Delta\alpha_1'$, $\delta\Delta\varkappa'$ элементов взаимного ориентирования, в свою очередь, деформируют определяемые координаты XYZ, т. е. появляются ошибки δX, δY, δZ.

После подстановки $\Delta\alpha_1'$, $\delta\omega_2'$, $\delta\varkappa_1'$, $\delta\Delta\alpha'$, $\delta\Delta\varkappa'$ в (17.18) и перегруппировки членов получим

$$\left.\begin{aligned}
\delta X &= \frac{B}{p}\left(f\,\delta\alpha_1' + x_1\frac{p^2\,\delta\alpha_2' - f^2\delta\,\Delta\alpha'}{pf} - y_1\,\delta\varkappa_1' + x_1 y_1\frac{p\,\delta\omega_2' - f\delta\,\Delta\varkappa'}{pf} + \right. \\
&\qquad \left. + x_1^2\frac{\delta\alpha_1' - 2\delta\alpha_2'}{f} - x_1^3\frac{\delta\,\Delta\alpha'}{pf} + x_1^2 y_1\frac{\delta\omega_2'}{pf}\right) \\
\delta Y &= \frac{B}{p}\left(x_1\,\delta\varkappa_1' + y_1\frac{p^2\,\delta\alpha_2' - f^2\,\delta\,\Delta\alpha'}{pf} + x_1 y_1\frac{\delta\alpha_1' - 2\delta\alpha_2'}{f} + \right. \\
&\qquad \left. + y_1^2\frac{f\delta\,\Delta\varkappa' - p\delta\omega_2'}{pf} - x_1^2 y_1\frac{\delta\,\Delta\alpha'}{pf} + x_1 y_1^2\frac{\delta\omega_2'}{pf}\right) \\
\delta Z &= \frac{B}{p}\left(\delta\alpha_2' p - \frac{f^2}{p}\,\delta\,\Delta\alpha' - 2x_1\,\delta\alpha_2' - y_1\frac{p\,\delta\omega_2' + f\delta\,\Delta\varkappa'}{p} + \right. \\
&\qquad \left. + x_1 y_1\frac{\delta\omega_2'}{p} - x_1\delta\,\Delta\alpha'\right)
\end{aligned}\right\} \qquad (17.27)$$

или, заменяя $B/p = Z/f$ и $p = b$, имеем:

$$\left.\begin{aligned}
\delta X &= A_0 + A_1X_1 + A_2Y_1 + A_3X_1Y_1 + A_4X_1^2 + A_6X_1^3 + A_7X_1^2Y_1\\
\delta Y &= B_1X_1 + B_2Y_1 + B_3X_1Y_1 + B_5Y_1^2 + B_7X_1^2Y_1 + B_8X_1Y_1^2\\
\delta Z &= C_0 + C_1X_1 + C_2Y_1 + C_3X_1Y_1 + C_4X_1^2
\end{aligned}\right\}, \qquad (17.28)$$

где

$$A_0 = Z\delta\alpha_1'; \qquad B_1 = \delta\varkappa_1'; \qquad C_0 = \left(\delta\alpha_2' b - \frac{f^2}{b}\delta\Delta\alpha\right)\frac{Z}{f};$$

$$A_1 = \frac{b^2\delta\alpha_2' - f^2\delta\Delta\alpha'}{bf}; \qquad B_2 = \frac{b^2\delta\alpha_2' - f^2\delta\Delta\alpha'}{bf}; \qquad C_1 = -2\delta\alpha_2';$$

$$A_2 = -\delta\varkappa_1'; \qquad B_3 = \frac{\delta\alpha_1' - 2\delta\alpha_2'}{Z}; \qquad C_2 = \frac{b\delta\omega_2' + f\delta\Delta\varkappa'}{b};$$

$$A_3 = \frac{b\,\delta\omega_2' - f\delta\Delta\varkappa'}{Zb}; \qquad B_5 = \frac{f\delta\Delta\varkappa' - b\,\delta\omega_2'}{bZ}; \qquad C_3 = \frac{f\delta\omega_2'}{Zb};$$

$$A_4 = \frac{\delta\alpha_1' - 2\delta\alpha_2'}{Z}; \qquad B_7 = -\frac{\delta\Delta\alpha'}{bZ^2}; \qquad C_4 = -\frac{f}{Z}\delta\Delta\alpha,$$

$$A_6 = \frac{f\delta\Delta\alpha}{Z^2b}; \qquad B_8 = \frac{\delta\omega_2'}{bZ^2};$$

$$A_7 = \frac{f\delta\omega_2'}{Z^2b},$$

что и следовало доказать.

Полиномиальным соотношениям подчиняется также деформация модели из-за собственных искажений положения точек на снимках. Порядок полиномов при этом не остается постоянным, а зависит от съемочного оборудования, фотоматериалов, параметров съемки и других причин.

При создании карт средних и мелких масштабов учету деформации модели, построенной по паре снимков, не придается большого значения. Соотношения масштабов аэросъемки и карты таковы, что величины деформаций не выходят за пределы допустимых погрешностей отображения высот и контуров на картах. Учет деформации такой модели приобретает смысл при использовании фотограмметрии для создания карт крупных масштабов, когда масштаб аэросъемки в несколько раз мельче, чем карты. Проблему составляет учет деформации модели при изготовлении оригинала карты на универсальных приборах.

Деформацию можно учесть различными способами, например на стадии внешнего ориентирования модели. Анализируя (17.26), заметим, что первые три члена полиномов описывают переход к новому началу ($A_0B_0C_0$) и поворот на углы ξ (A_1X, C_1X), η (B_2Y, C_2Y) и θ (A_1X_1, A_2Y, B_1X, B_2Y). Для координат X и Y членами полиномов A_1X_1, B_2Y учитываются и масштабные изменения модели. Поэтому задачи внешнего ориентирования и исключения деформации можно объединить.

Выполнив масштабирование, а если требуется и приближенный поворот, составляют три системы уравнений-полиномов (17.26). Порядок полиномов по каждой координате выбирается в зависимости от числа опорных точек, назначения результатов, ожидаемых искажений модели.

Решая системы уравнений, находят коэффициенты полиномов, а по ним в соответствии с (17.26) поправки в координаты каждой точки модели.

После поворота модели по минимуму точек ее деформация станет иной, чем при свободном угловом ориентировании. Результирующие искажения

модели δX_0, δY_0, δZ_0 получаются как разность деформации до ее ориентирования δX, δY, δZ и некоторых приращений δX, δY, $\delta Z_г$, т. е.

$$\left.\begin{aligned}\delta X_0 &= \delta X - \delta X_г\\ \delta Y_0 &= \delta Y - \delta Y_г\\ \delta Z_0 &= \delta Z - \delta Z_г\end{aligned}\right\} \qquad (17.29)$$

Приращения $\delta X_г$, $\delta Y_г$, $\delta Z_г$ являются результатом распределения по площади стереопары деформаций δX, δY, δZ для опорных точек, по которым выполнялось внешнее ориентирование. Их можно вычислить по формулам, которые следуют из выражений (17.5) с достаточной для учета деформаций строгостью

$$\left.\begin{aligned}\delta X_г &= -Y\,\delta\theta\\ \delta Y_г &= X\,\delta\theta\\ \delta Z_г &= X\,\delta\xi + Y\,\delta\eta\end{aligned}\right\}. \qquad (17.30)$$

При этом углы $\Delta\xi$, $\delta\eta$ и $\delta\theta$ отражают деформацию модели на использованных для внешнего ориентирования точках. Значения их находят из решения системы тех же уравнений (17.30), записанной для опорных точек.

Характер изменения деформации модели зависит от числа и расположения используемых для внешнего ориентирования опорных точек, а также от порядка полиномов, аппроксимирующих искажения.

Дальнейший учет деформации производится, как и в первом способе, по избыточным опорным точкам.

Такова общая схема выявления и исключения систематической деформации модели после ее горизонтирования. Рассмотрим более подробно возможности исключения деформации по высоте, что имеет особое значение при построении модели на универсальных приборах. Будем считать, что общую деформацию достаточно аппроксимировать полиномом второй степени, т. е.

$$\delta Z = C_0 + C_1X + C_2Y + C_3XY + C_4X^2, \qquad (17.31)$$

а для горизонтирования используют высоты трех опорных точек.

Погрешности $\delta\xi$, $\delta\eta$ в элементах углового ориентирования модели найдем, решая систему уравнений,

$$\left.\begin{aligned}C_0 + C_1X_1 + C_2Y_1 + C_3X_1Y_1 + C_4X_1^2 &= X_1\delta\xi + Y_1\delta\eta\\ C_0 + C_1X_2 + C_2Y_2 + C_3X_2Y_2 + C_4X_2^2 &= X_2\delta\xi + Y_2\delta\eta\\ C_0 + C_1X_3 + C_2Y_3 + C_3X_3Y_3 + C_4X_3^2 &= X_3\delta\xi + Y_3\delta\eta\end{aligned}\right\}, \qquad (17.32)$$

где X_{1-3} и Y_{1-3} — соответствуют координатам опорных точек.

Предположим, что опорные точки располагаются по углам стереопары (рис. 207, *а*). Тогда, используя (17.28), напишем

$$\left.\begin{aligned}C_0 + C_2Y_1 &= Y_1\delta\eta\\ C_0 + C_2Y_2 &= Y_2\delta\eta\\ C_0 + C_1X_3 + C_2Y_3 + C_3X_3Y_3 + C_4X_3^2 &= X_3\delta\xi + Y_3\delta\eta\end{aligned}\right\}. \qquad (17.33)$$

Решая систему уравнений с учетом, что $Y_1 = Y_3$, получим

$$\delta\eta = C_2 \text{ и } \delta\xi = C_1 + C_3Y_1 + C_4X_3. \qquad (17.34)$$

Наконец, подставив (17.34), (17.31) и (17.30) в третье равенство (17.29), найдем уравнение деформации

$$\delta Z_0 = \delta Z - \delta Z_г = C_3 X (Y - Y_1) + C_4 X (X - X_3). \qquad (17.35)$$

При выводе формулы (17.35) опущена постоянная для всех точек модели составляющая деформации A_0, уничтожаемая согласованием координат на опорных точках.

Предполагая, что опорные точки расположены так, как показано на рис. 207, *б*, получим выражение перераспределенной деформации

$$\delta Z_0 = C_3 XY + C_4 X (X - X_3). \qquad (17.36)$$

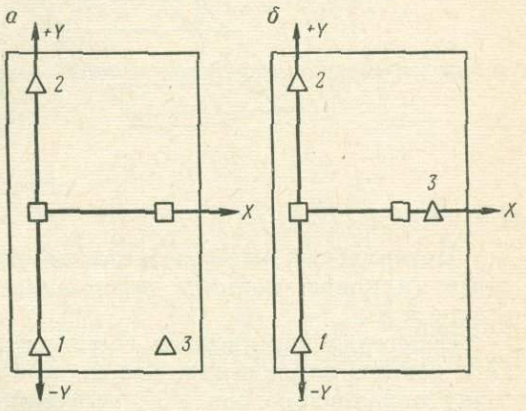


Рис. 207

Формально (17.35) и (17.36) являются уравнениями одной и той же криволинейной поверхности, ориентированной относительно прямоугольной системы координат $OXYZ$. Проанализируем поверхность для первого случая ориентирования. Рассечем ее плоскостями, параллельными основным плоскостям системы координат $OXYZ$.

Сечения, параллельные плоскости ZOY, когда в (17.35) $X = 0$, или $X = \text{const}$, описываются уравнениями

$$\delta Z_0 = 0 \text{ или } \delta Z = C_4' + C_3' (Y - Y_1)$$

и представляют собой прямые линии.

Сечения, параллельные плоскости ZOX, когда $Y = 0$, или $Y = \text{const}$, описываются уравнениями

$$\delta Z = C_3 X + C_4 X (X - X_3)$$

и представляют собой параболы.

Наконец, в плоскостях, параллельных XOZ, имеем сечения — гиперболы согласно уравнениям

$$C_3 X (Y - Y_1) + C_4 X (X - X_3) - C_0 = 0,$$

где

$$C_0 = 0 \text{ или } C_0 = \text{const}.$$

Общая поверхность носит название гиперболического параболоида и схематически показана на рис. 208, *а*. На рис. 208, *б* представлена та же поверхность для второго случая расположения опорных точек.

Общая деформация модели является суммой влияния двух составляющих

$$\left.\begin{aligned} \delta Z_0' &= C_3 X (Y - Y_1), \text{ или } \delta Z_0' = C_3 XY \text{ и} \\ \delta Z_0'' &= C_4 X (X - X_3) \end{aligned}\right\}. \qquad (17.37)$$

Каждая из составляющих образует собственную поверхность искажений. Последние показаны на рис. 209, *а* и *б* для второго случая ориентации гиперболического параболоида.

Поверхность, изображенная на рис. 209, *а*, носит название г и п е р б о л о и д а. Она линейчатая в направлении осей X и Y и криволинейная по произвольному направлению. Характеризуя деформацию такого рода, часто употребляют термин «к р у ч е н и е м о д е л и».

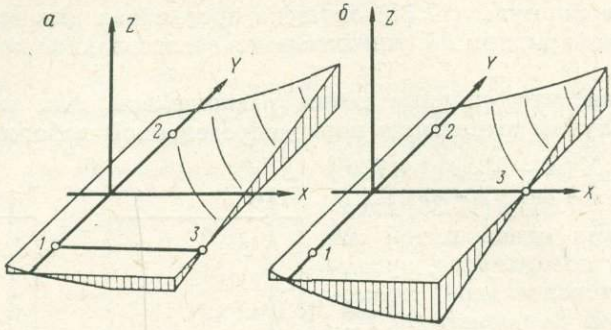


Рис. 208

Поверхность, изображенная на рис. 209, *б*, носит название параболического цилиндра, поэтому деформацию такого рода называют п р о г и б о м м о д е л и.

Сопоставление частных составляющих общей деформации позволяет сделать важное заключение, что по линии, проходящей через третью опорную точку параллельно оси YY, деформация прогиба отсутствует. Если есть дополнительная опорная точка на этой линии, можно выявить, а в последующем и исключить кручение модели.

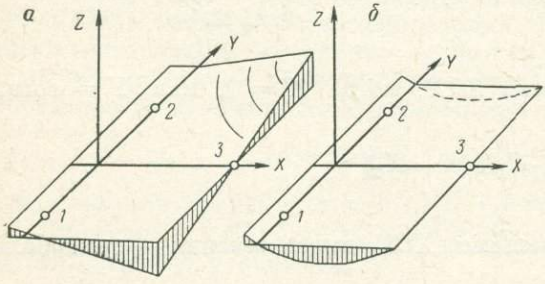


Рис. 209

Ранее отмечалась трудность учета систематической деформации модели в процессе ее построения на универсальных фотограмметрических приборах оптико-механического типа.

Радикальным решением проблемы является разработка особых приборов или приставок к существующим приборам, способных учитывать возможные искажения модели. Опытные варианты таких устройств предлагались.

В качестве временного решения можно рекомендовать обработку снимков по частям — «зонам». Каждая зона должна быть ограничена опорными точками. Деформация модели в пределах зон будет меньшей, чем по всей стереопаре.

Определенного эффекта можно достичь, если устранить деформацию модели по высоте изменением углового ориентирования снимков $\delta\Delta\alpha'$ и $\delta\omega'$, имея избыточные опорные точки. Из формул (17.28) видно, что коэффициенты C_3 и C_4 зависят от искажений $\delta\Delta\alpha'$ и $\delta\omega'$, причем коэффициенты C_3 и C_4 сохраняют свое значение и после поворота модели.

Можно расположить опорные точки так, чтобы влияние элементов внешнего ориентирования снимков и элементов, отражающих деформацию на этих точках, было независимым.

После исключения систематической деформации окончательная точность результатов будет зависеть от случайных погрешностей построения модели и ее взаимного ориентирования.

Рассмотрим эту зависимость. Формулы для получения конечных результатов построения модели приближенно представим так:

$$\left.\begin{aligned} X_{\text{г}} &= X_S + X - Y\theta - Z\xi + X\,\Delta t \\ Y_{\text{г}} &= Y_S + Y + X\theta - Z\eta + Y\,\Delta t \\ Z_{\text{г}} &= Z_S + Z + X\xi + Y\eta + Z\,\Delta t \end{aligned}\right\}. \tag{17.38}$$

Считая, что величины в правой части формул имеют погрешности, после дифференцирования (17.38) получим

$$\left.\begin{aligned} dX_{\text{г}} &= dX_S + dX + X\,dt - Y\,d\theta - Z\,d\xi + \Delta t\,dX - \theta\,dY - \xi\,dZ \\ dY_{\text{г}} &= dY_S + dY + Y\,dt + X\,d\theta - Z\,d\eta + \Delta t\,dY + \theta\,dX - \eta\,dZ \\ dZ_{\text{г}} &= dZ_S + dZ + Z\,dt + X\,d\xi + Y\,d\eta + \Delta t\,dZ + \xi\,dX + \eta\,dY \end{aligned}\right\}, \tag{17.39}$$

где dX_S, dY_S, dZ_S — ошибки координат опорных точек, dX, dY, dZ — ошибки координат ориентирования снимков, $d\xi$, $d\eta$, $d\theta$, dt — погрешности элементов внешнего ориентирования.

Формулы (17.39) не дают прямой связи величин, так как одни ошибки ($d\xi$, $d\eta$, $d\theta$, dt) являются функциями других (dX, dY, dS), а те, в свою очередь, зависят от погрешностей координат точек на снимках (dx, dy, dp). В дальнейшем их следует преобразовать так, чтобы они связывали только ошибки непосредственно измеренных величин, т. е. координат точек на снимках (dx, dy, dp) и опорных точек (dX_S, dY_S, dZ_S). Однако такое преобразование не просто и не однозначно. Формальный подход путем последовательной подстановки и решения функциональных связей погрешностей между собой может привести к резкому огрублению ожидаемой точности.

Внешнее ориентирование модели аналитическим способом и на универсальных приборах в той или иной мере выполняется последовательными приближениями по избыточному числу опорных точек. В результате ошибки элементов внешнего ориентирования будут таковы, что их суммарное влияние не превысит заметно ошибок построения модели после взаимного ориентирования снимков с учетом искажений координат опорных точек. Поэтому дальнейшие преобразования (17.39) проведем с сохранением первых двух членов правой части формул.

Учитывая соотношения координат точек модели и на снимках, вместо (17.39) напишем

$$\left.\begin{aligned} dX_{\text{г}} &= dX_S + \frac{Z}{f}\,dx + \frac{Zx}{fb}\,dp \\ dY_{\text{г}} &= dY_S + \frac{Z}{f}\,dy + \frac{Zy}{fb}\,dp \\ dZ_{\text{г}} &= dZ_S + \frac{Z}{p}\,dp \end{aligned}\right\}, \tag{17.40}$$

откуда получим формулы точности построения модели по паре снимков

$$\left.\begin{aligned} m^2_{X_\Gamma} &= m^2_{X_S} + \left(\frac{Z}{f}\right)^2 \left[m_x^2 + \left(\frac{x}{b}\right)^2 m_p^2\right] \\ m^2_{Y_\Gamma} &= m^2_{Y_S} + \left(\frac{Z}{f}\right)^2 \left[m_y^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 m_p^2\right] \\ m^2_{Z_\Gamma} &= m^2_{Z_S} + \left(\frac{Z}{b}\right)^2 m_p^2 \end{aligned}\right\} \qquad (17.41)$$

Они являются основными для расчетов, связанных с точностью и эффективностью фотограмметрической обработки снимков. Из них следуют рекомендации для выбора параметров съемки, фотокамеры и т. д. Так, ошибки в определении координат при заданной точности измерения снимков зависят в основном от высоты фотографирования и формата снимков. На точность определения плановых координат дополнительно влияет фокусное расстояние съемочной камеры.

Глава 18

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СТЕРЕОПРИБОРЫ

§ 124. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

Универсальные стереоприборы служат для составления топографических карт, ортофотокарт и цифровых моделей местности по снимкам.

На универсальном стереоприборе можно решить обратную двойную фотограмметрическую засечку, т. е. выполнить все процессы преобразования снимков в карту, а именно:

1) внутреннее ориентирование снимков — построение связок проектирующих лучей;

2) взаимное ориентирование снимков — построение модели;

3) внешнее ориентирование модели;

4) определение координат отдельных точек и съемку контуров и рельефа.

Если элементы внешнего ориентирования снимков известны с достаточной точностью, то на универсальном приборе можно решить и прямую фотограмметрическую засечку. В этом случае снимки устанавливают в приборе по элементам ориентирования. Затем путем проектирования снимков создают связки лучей. В результате пересечения соответственных лучей образуется модель, которая используется для составления карты.

Для составления ортофотокарт универсальные стереоприборы снабжены приспособлениями, позволяющими получать фотографическое изображение местности в ортогональной проекции.

Цифровая модель используется для составления планов и карт на координатографе с программным управлением, а также для решения различных инженерных задач при помощи электронной цифровой вычислительной машины, например для трассирования железных и шоссейных дорог. Фиксация координат отдельных точек местности в универсальном стереоприборе выполняется автоматически специальными устройствами, в которые входят пишущая машинка и перфоратор.

На универсальных стереоприборах можно и сгущать опорную геодезическую сеть в пределах нескольких или многих стереопар, т. е. строить фототриангуляционные сети. Однако более точным и производительным методом сгущения опорной сети является аналитическая фототриангуляция с применением стереокомпаратора и электронной цифровой вычислительной машины.

Связки проектирующих лучей в универсальном стереоприборе могут быть или тождественными существовавшим в момент съемки или преобразованными. В соответствии с этим и модель получается подобной местности или преобразованной, а универсальные стереоприборы разделяются на две группы: приборы с подобными связками и приборы с преобразованными связками.

По способам построения связок проектирующих лучей и модели универсальные стереоприборы можно разделить на четыре группы: оптические, механические, оптико-механические и аналитические.

Оптический универсальный стереоприбор имеет две или больше проектирующих камер, с помощью которых по снимкам создаются связки лучей и модель местности.

В универсальном стереоприборе механического типа связки лучей и модель строятся с помощью прецизионных рычагов или линеек.

В оптико-механическом универсальном стереоприборе связки лучей получаются оптически, а модель строится при помощи механизмов.

В аналитическом универсальном стереоприборе в процессе измерения снимков определяются координаты точек местности на электронной цифровой вычислительной машине, которые одновременно используются для составления карты на координатографе.

Аналитические универсальные стереоприборы обеспечивают наивысшую точность измерения снимков: средняя квадратическая ошибка измерения координат точек равна 3—5 мкм. Остальные приборы по точности измерения снимков разделяются на три класса. Они позволяют измерять снимки с точностью, равной соответственно 10, 20 и 50 мкм.

§ 125. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ОПТИЧЕСКИХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

Оптические универсальные стереоприборы разделим на две подгруппы.

В первую подгруппу входят двойные проекторы и мультиплексы. В этих приборах снимки с помощью камер проектируются на экран так, чтобы изображения их накладывались друг на друга (рис. 210). Связки лучей взаимно ориентируются, в результате чего получается оптическая модель местности. Затем модель ориентируется относительно планшета и используется для составления карты.

Фотограмметрическая засечка образуется путем построения треугольника, вершинами которого служат передние узловые точки объективов проектирующих камер S_1 и S_2 и определяемая точка a модели (принцип треугольника).

Модель наблюдают и измеряют обычно способом анаглифов с помощью марки, находящейся в центре экрана.

Расстояние между передними узловыми точками объективов проектирующих камер равно базису фотографирования в масштабе модели

$$B' = \frac{1}{t} B. \qquad (18.1)$$

Отсюда следует, что минимальный масштаб модели определяется наименьшим расстоянием, которое можно установить между передними узловыми точками объективов проектирующих камер.

Так как экран E находится на конечном расстоянии от объектива камеры, то для получения резкого изображения снимка лучи, исходящие из точки снимка и проходящие объектив, должны направляться к экрану сходящимся пучком. В этом случае главное фокусное расстояние объектива проектирующей камеры $f_{об}$ должно быть меньше фокусного расстояния самой камеры $\bar{f}$.

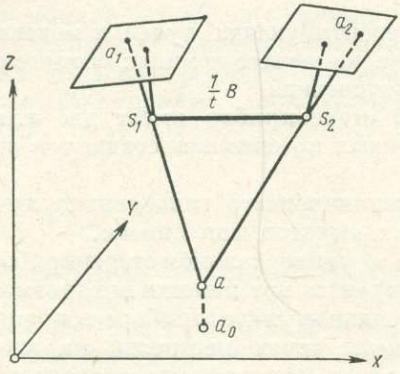


Рис. 210

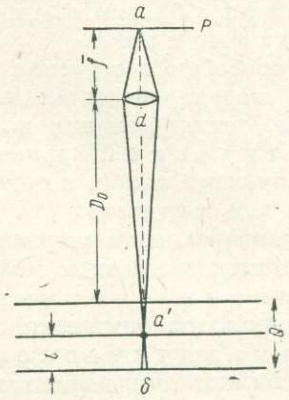


Рис. 211

Чтобы получить резкое изображение на экране, необходимо выполнить два условия:

1) расстояния от объектива до снимка $\bar{f}$ и до экрана D вдоль главной оптической оси объектива должны удовлетворять основному уравнению оптики

$$\frac{1}{\bar{f}}+\frac{1}{D}=\frac{1}{f_{об}}; \tag{18.2}$$

2) плоскость снимка, главная плоскость объектива и плоскость экрана должны пересекаться по одной линии.

В двойных проекторах и мультиплексах эти условия выполняются обычно нестрого.

Пусть при горизонтальном положении проектирующей камеры изображение на экране получается резким, когда экран удален от объектива на расстояние D_0 (рис. 211). При любом другом положении экрана резкость изображения нарушается. Появляются кружки нерезкости, диаметр которых

$$\delta=\frac{d}{D_0}\,l, \tag{18.3}$$

где l — расстояние от экрана до плоскости резкого изображения, а d — диаметр действующего отверстия объектива.

Потребуем, чтобы величина δ не превышала такого значения, при котором практически не снижается точность стереоскопических измерений. Тогда глубина резкости

$$Q=2l=2\,\frac{\delta}{d}\,D_0. \tag{18.4}$$

На местности величине Q соответствует превышение

$$h = \frac{H}{D_0} Q = 2 \frac{\delta}{d} H, \tag{18.5}$$

где H — высота фотографирования.

При наклоне проектирующей камеры резкость изображения нарушается, так как главная плоскость объектива O не проходит через линию пересечения снимка P и экрана E, а остается параллельной снимку. Такое явление наблюдается и в случае, когда первое оптическое условие выполнено. При этом кру-

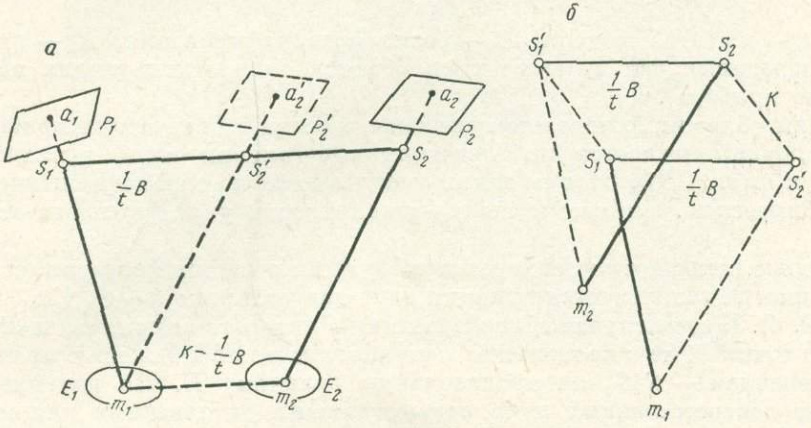


Рис. 212

жок нерезкости будет максимальным на краю изображения. Диаметр его можно найти по формуле, аналогичной (2.2),

$$\delta = \frac{d}{f} r\varepsilon, \tag{18.6}$$

где $d : f$ — относительное отверстие объектива, r — расстояние на снимке от главной точки до данной, ε — угол наклона камеры.

Пусть $d : f = 1 : 10$, $r = 20$ мм, $\varepsilon = 6°$. Тогда $\delta = 0{,}2$ мм.

Отдельные приборы первой подгруппы имеют приспособления для изменения фокусного расстояния проектирующей камеры, а также для поворота объектива. Это позволяет строго выполнять оптические условия.

С целью сокращения размеров прибора мультиплекс рассчитан на обработку не оригинальных снимков, а уменьшенных в 3—4 раза.

Пусть N_0 — разрешающая способность негатива. Чтобы получить на диапозитиве все детали местности, изобразившиеся на негативе, необходимо использовать диапозитивные пластинки с разрешающей способностью

$$N = nN_0, \tag{18.7}$$

где n — коэффициент уменьшения негатива.

В приборах второй подгруппы, например в стереопланиграфе Цейсса, каждый снимок с помощью камеры проектируется на отдельный экран, снабженный измерительной маркой (*рис. 212, а*). Расстояние S_1S_2 между передними узловыми точками объективов проектирующих камер может быть, с точки

зрения теории, произвольным. Практически оно устанавливается по конструктивным соображениям и всегда больше базиса фотографирования, выраженного в масштабе модели.

Модель получается в результате пересечения лучей левой связки с соответствующими лучами правой связки, перенесенной параллельно так, чтобы вершина ее совпала с точкой S_2'. При этом расстояние между измерительными марками

$$m_1m_2 = K - \frac{1}{t}B, \tag{18.8}$$

где $1 : t$ — масштаб модели, B — базис фотографирования, K — расстояние между передними узловыми точками объективов проектирующих камер (постоянная прибора).

Таким образом, фотограмметрическая засечка в оптических приборах второй подгруппы решается по принципу треугольник плюс параллелограмм ($S_1S_2'm_1$ и $m_1m_2S_2S_2'$). *Этот принцип используется не только в оптических, но* и в механических, а также в оптико-механических универсальных стереоприборах.

С целью сокращения размеров прибора для решения фотограмметрической засечки иногда используется принцип двух треугольников — $S_1S_2'm_1$ и $S_1'S_2m_2$ (рис. 212, *б*). В этом случае центр проекции S_2 второго снимка смещается относительно точки S_2' не в продольном направлении по продолжению прямой S_1S_2', а в поперечном — $S_2'S_2$ на произвольную величину K. На рисунке S_1m_1 и S_2m_2 два соответственных луча, осуществляемые оптическими или механическими средствами. При этом точка m_1 получается в пересечении направления S_1m_1 с направлением $S_2'm_1$, проведенным из точки S_2' параллельно S_2m_2.

Снимок, установленный в проектирующую камеру стереопланиграфа, находится в главной фокальной плоскости объектива. Поэтому лучи, исходящие из точки снимка и проходящие объектив, направляются параллельным пучком. Резкое изображение снимка на экране получается с помощью дополнительной проектирующей системы, расположенной между объективом камеры и экраном и состоящей из положительной и отрицательной линз. При изменении расстояния между камерой и экраном меняется и расстояние между этими линзами с помощью инверсора.

Для наблюдения и измерения модели применяется способ мнимой марки. При этом действительные марки m_1 и m_2 и изображения снимков, построенные на экранах, рассматривают стереоскопически посредством сложной наблюдательной системы.

§ 126. МУЛЬТИПЛЕКСЫ

Мультиплекс (рис. 213) состоит из трех или более проекторов и служит для обработки уменьшенных в 3—4 раза снимков (диапозитивов).

Основные части мультиплекса: стол с экраном, две стойки, штанга, базисные каретки, проекторы и измерительный столик.

Стойки опираются на подъемные винты, концы которых входят в гнезда подшипников, прикрепленных к столу. На стойках имеются муфты, поддерживающие штангу, которая служит осью X прибора. Штурвалами можно изменить высоту штанги, а винтами закрепить ее в нужном положении. К штанге шарнирно прикреплены держатели предохранительной планки. На штанге имеются: направляющая и зубчатая рейка для перемещения базисных кареток

вдоль оси X, шкала для учета этого перемещения, штепсельные розетки для проекторов, измерительного столика и ручной лампы, а также штепсельная вилка для включения подводящего кабеля.

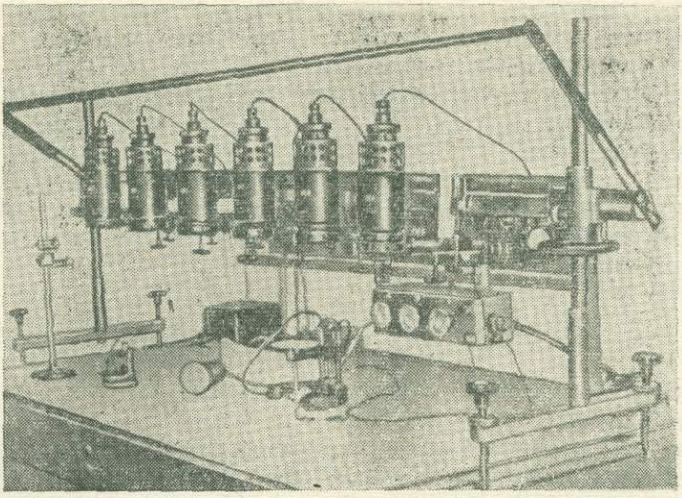


Рис. 213

Базисная каретка (рис. 214), состоящая из двух суппортов и карданного кольца, надевается на штангу и может перемещаться по ней рукояткой (движение b_X). В карданном кольце находится проектирующая камера. Суппорты позволяют передвигать камеру вдоль осей Y и Z прибора (движения b_Y и b_Z). Карданное кольцо обеспечивает наклоны камеры α и ω вокруг взаимно перпендикулярных осей. Прикладная рамка камеры поворачивается вокруг оптической оси от руки или с помощью микрометренного винта. Оси кардана и оптическая ось камеры пересекаются в центре выходного зрачка объектива.

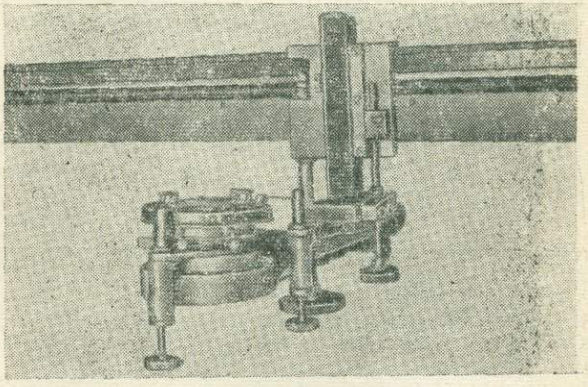


Рис. 214

Проектор состоит из проектирующей камеры и осветителя. Проектирующая камера имеет корпус, объектив и прикладную рамку в виде стеклянной пластинки, на которой отмечена главная точка. Для установки и центрирования диапозитива служат зажимы и два эксцентрика. Осветитель составляют кожух, конденсор и лампа. Кожух имеет охладительные каналы и паз для анаглифического светофильтра. Распределение тока по проекторам и регулировка накала ламп обеспечиваются электропультом.

Измерительный столик служит для измерения модели. На подковообразном основании столика укреплены вертикальные направляющие, по которым с помощью червячного винта перемещается хомут, несущий экранчик. В центре экранчика находится светящаяся марка. Высота экранчика отсчитывается по счетчику. К основанию столика прикреплено карандашное приспособление. Кроме измерительного столика имеются ориентирные столики для внешнего ориентирования модели по опорным точкам.

В мультиплексе применен анаглифический способ наблюдения снимков. Обработка снимков на мультиплексе включает: изготовление уменьшенных снимков — диапозитивов, внутреннее ориентирование снимков, взаимное ориентирование снимков, внешнее ориентирование модели, определение положения отдельных точек местности, рисовку контуров и рельефа.

Если обработка снимков производится с подобными связками, то коэффициент уменьшения снимков

$$k = \frac{f}{\bar{f}}, \tag{18.9}$$

где f — фокусное расстояние съемочной камеры, $\bar{f}$ — фокусное расстояние проектирующей камеры.

Для внутреннего ориентирования снимков каждый диапозитив устанавливается в соответствующую камеру так, чтобы главная точка его совпала с главной точкой, отмеченной на прикладной рамке. Взаимное ориентирование снимков выполняется путем перемещения и поворота проекторов. В результате взаимного ориентирования снимков соответственные лучи связок пересекаются, т. е. образуется модель местности. Внешнее ориентирование модели производится по опорным точкам, нанесенным на планшет; для этого используются базисные движения проекторов и повороты штанги с помощью муфт и подъемных винтов. Для составления карты наблюдатель визирует на точки модели или обводит маркой контуры и линии равных высот на модели. Одновременно карандашное устройство вычерчивает эти элементы на планшете.

Таблица 9

Основные характеристики мультиплекса	Тип мультиплекса			
	нормально-угольный $2\beta=62°$ $f=210$ мм	Широко-угольные		сверхширо-угольный $2\beta=122°$ $f=70$ мм
		$2\beta=105°$ $f=100$ мм	$2\beta=87°$ $f=100$ мм	
Число проекторов	6—9	6—9	9	9
Коэффициент уменьшения снимков	4	4,5	3,3	3,3
Фокусное расстояние проектирующей камеры, мм	45	22	31,5	21
Формат диапозитивов, мм	40×60	40×60	40×60	58×58
Фокусное расстояние объектива проектирующей камеры, мм	40,0	20,7	28,6	19,6
Зона резкого изображения снимка, мм	250—360	250—360	250—360	250—360
Значения:				
b_x, мм	80—100	80—120	80—120	100—140
b_y, мм	65	60	55	60
b_z, мм	40	40	35	40
Углы наклона α и ω камеры	$\pm 8°$	$\pm 8°$	$\pm 7°$	$\pm 8°$
Углы поворота $\varkappa$ камеры	360°	360°	360°	360°

В зависимости от величины угла зрения проектора мультиплексы делятся на нормальноугольные, широкоугольные и сверхширокоугольные.

В табл. 9 приведены основные характеристики советских мультиплексов. За создание сверхширокоугольного мультиплекса Н. В. Викторову, Д. И. Аронову, А. Ш. Шахвердову, М. Д. Коншину и М. М. Русинову присуждена Государственная премия. По предложению В. И. Кораблева изготовлен универсальный уменьшитель, позволяющий получать диапозитивы с различными коэффициентами уменьшения, т. е. для любых мультиплексов. Н. П. Михайлов разработал профилограф для построения профилей и визирную насадку на измерительный столик для определения полей невидимости по модели местности, созданной на мультиплексе.

Точность измерения снимков на мультиплексе в 2—3 раза ниже по сравнению с универсальными приборами первого класса, что вызвано уменьшением снимков и недостатками анаглифического способа наблюдения их. Поэтому в настоящее время мультиплекс применяется главным образом для обучения как простой и сравнительно недорогой прибор, позволяющий наглядно показать основные процессы пространственной фототриангуляции и составления карты.

§ 127. СТЕРЕОПЛАНИГРАФ ЦЕЙССА

Стереопланиграф — высокоточный универсальный стереоприбор, позволяющий составлять карты и строить фототриангуляционные сети по снимкам (рис. 215). В основу прибора *положен оптический способ* решения фотограмметрической засечки по принципу треугольник плюс параллелограмм.

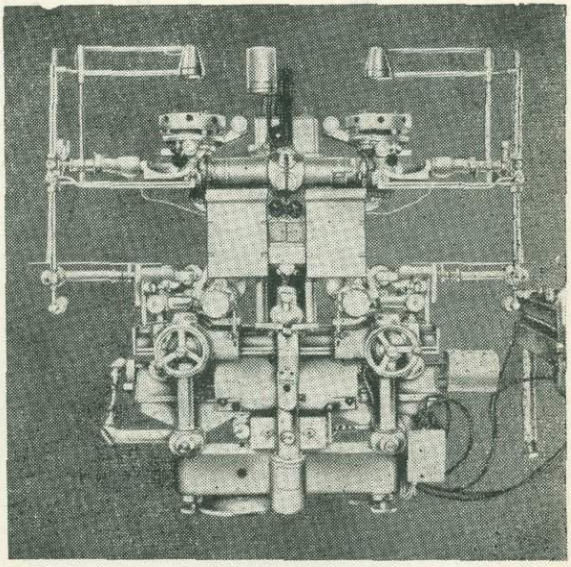
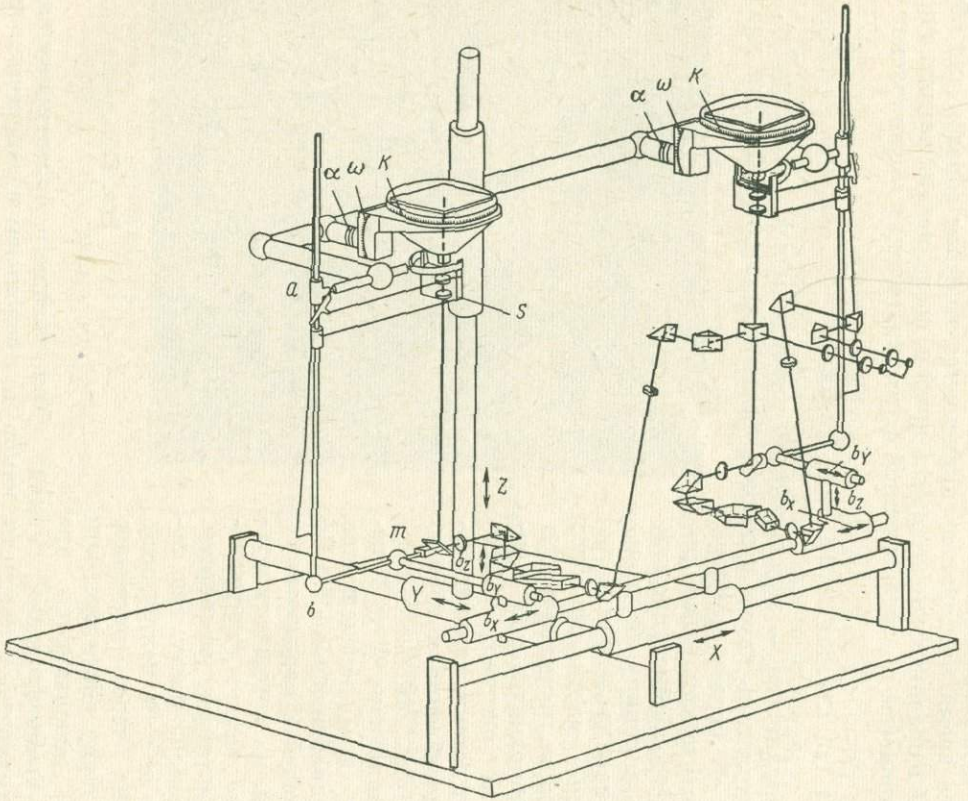


Рис. 215

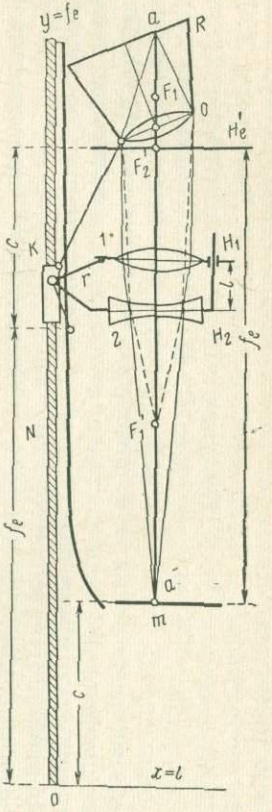
Основные части прибора: направляющие, проектирующая система, дополнительная проектирующая система, наблюдательная система, измерительные приспособления и координатограф (рис. 216).

Направляющие X и Y неподвижны, а Z перемещается вдоль направляющей Y. По направляющей Z передвигается кронштейн, на котором смонтированы две камеры, составляющие проектирующую систему. Каждая камера имеет три поворота α, ω и $\varkappa$ вокруг осей, проходящих через переднюю узловую точку объектива. Эти повороты используются при взаимном ориентировании снимков. Для внешнего ориентирования модели имеются совместные повороты камер в продольном и поперечном направлениях.

Стереопланиграф снабжен двумя комплектами проектирующих камер: один с фокусным расстоянием 100 мм, другой с фокусным расстоянием 200 мм.



Рис, 216



Рис, 217

Фокусное расстояние каждой камеры можно изменять в небольших пределах, перемещая прикладную рамку относительно объектива. Камеры проектируют снимки на зеркальные экраны. В центре каждого экрана находится измерительная марка. Расстояние между передними узловыми точками объективов левой и правой камер — величина постоянная. Для установки базиса измерительные марки имеют движения b_X, b_Y и b_Z.

Дополнительная проектирующая система обеспечивает резкость изображения снимка на экране измерительной марки при различных положениях экрана относительно камеры.

Наблюдательная система служит для стереоскопического рассматривания *изображений снимков и измерительных марок.*

С каретками X и Y связан карандаш координатографа, вычерчивающий на планшете элементы карты в заданном масштабе.

Плоскость прикладной рамки R (рис. 217) проектирующей камеры совпадает с главной плоскостью объектива. Поэтому лучи, исходящие из точки a снимка и проходящие объектив, направляются параллельным пучком. Дополнительная проектирующая система собирает этот пучок и строит изображение a' точки снимка на экране в плоскости измерительной марки m. Эта система состоит из двух линз — положительной *1* и отрицательной *2*, которые играют роль телеобъектива с переменным фокусным расстоянием. Абсолютные значения фокусных расстояний линз одинаковы.

Пусть F_2' — картинный фокус отрицательной линзы, F_1' — картинный фокус положительной линзы. Положение главных плоскостей и эквивалентное фокусное расстояние системы определяются следующими формулами, известными из оптики:

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{f_1(f_1'-f_2)}{\Delta}; \quad x' = \frac{f_2'(f_1'-f_2)}{\Delta} \\ f_e &= -\frac{f_1'f_2'}{\Delta} \end{aligned}\right\}; \tag{18.10}$$

здесь x — расстояние от переднего фокуса первой линзы F_2' до предметной главной плоскости системы, x' — расстояние от картинного фокуса второй линзы F_2' до картинной главной плоскости системы H_e', f_1, f_2 и f_1', f_2' — передние и задние *фокусные расстояния линз*, Δ — *оптический интервал*, т. е. *расстояние между* двумя последующими фокусами линз:

$$\Delta = l - f_1' - f_2', \tag{18.11}$$

где l — расстояние между главными плоскостями линз.

В данном случае

$$f_1 = -f_1 = -f_2 = f_2' = f.$$

Поэтому

$$x = x' = 0, \quad f_e' = \frac{f^2}{l}, \quad \Delta = l, \tag{18.12}$$

т. е. *предметная и картинная плоскости телеобъектива проходят соответственно* через предметный фокус положительной линзы и картинный фокус отрицательной линзы, а оптический интервал равен расстоянию между линзами.

Телеобъектив поворачивается вокруг передней узловой точки объектива камеры. С этой точкой совмещен картинный фокус отрицательной линзы F_2'. Для изменения фокусного расстояния телеобъектива меняется расстояние l между линзами.

Так как удаление отрицательной линзы от центра вращения телеобъектива постоянно, то расстояние между линзами изменяется движением положительной линзы. При этом главная фокальная плоскость телеобъектива всегда проходит через марку m. Эту задачу решает лекальный инверсор.

Обозначим l через x и f_e через y. Тогда

$$y = \frac{f^2}{x} \quad — \tag{18.13}$$

— уравнение гиперболы, центр которой совпадает с началом координат, а асимптоты — с координатными осями.

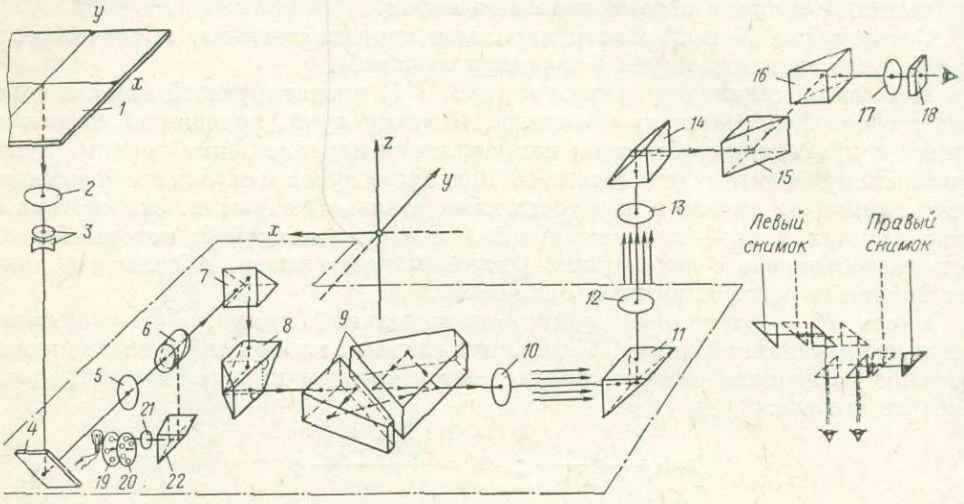


Рис. 218

Кривая (18.13) осуществлена в виде лекала L, которое прикреплено к направляющей N, вращающейся вокруг марки m. При перемещении проектирующей камеры вдоль оси Z прибора, а также при изменении положения марки по направляющей N скользит каретка K с рычагом r. Один конец рычага опирается на лекало, а другой перемещает положительную линзу телеобъектива. Конец рычага, опирающийся на лекало, смещен на величину c относительно центра вращения телеобъектива. Поэтому и центр кривой o не находится в плоскости марки, а смещен на ту же величину c.

Зеркальный экран связан с телеобъективом при помощи параллелограмма $Sabm$ (см. рис. 216). Когда проектирующие камеры перемещаются вдоль оси Y, параллелограмм поворачивается вдоль осей Sa и mb. При этом поворачивается и экран вокруг оси mb, направляя отраженные лучи вдоль оси X в наблюдательную систему. Если общая каретка смещается вдоль оси X, то стержень L (см. рис. 217) поворачивается вокруг оси, проходящей через точку b параллелограмма (см. рис. 216), а зеркальный экран при помощи шестерен вращается вокруг оси Y, на половину угла поворота стержня. В результате этого отраженный от экрана пучок лучей направляется в наблюдательную систему вдоль той же оси X.

На рис. 218 изображена левая часть проектирующей и наблюдательной системы. Аналогично устроена и правая часть.

Лучи, идущие от изображения снимка *1*, полученного с помощью объектива камеры *2* и телеобъектива *3* на зеркальном экране *4*, падают на линзу *5*, входящую в состав первого объектива наблюдательной системы. Пройдя линзу *5* и цилиндр *6*, лучи падают на прямоугольную призму *7*, которая направляет их вдоль оси Z в сложную призму *8*. После первого отражения в этой призме лучи идут в направлении оси X, после второго — в направлении оси Y. Далее лучи проходят призму Пехана *9*, состоящую из двух призм и предназначенную для поворота изображения в его плоскости, и падают на линзу *10* — вторую составляющую первого объектива наблюдательной системы. Пройдя эту линзу, пучок лучей становится параллельным и через призму *11* и покровное стекло *12* он направляется в окулярную часть наблюдательной системы. Второй объектив *13* преобразует параллельный пучок в сходящийся. Трехгранная призма *14* направляет сходящийся пучок на подвижные призмы *15* и *16* окулярной головки. Пройдя эти призмы, пучок строит изображение, рассматриваемое наблюдателем с помощью окуляра *17* и оптического клина *18*. Вращая оптический клин, можно совместить визирную ось глаза с оптической осью окуляра.

Если подвижные призмы *15* и *16* левой части наблюдательной системы и подвижные призмы *15* и *16* правой части занимают положение, показанное справа на рис. 218 сплошными линиями, то изображение левого снимка поступает в левый окуляр. Если же эти призмы находятся в положении, показанном пунктиром, то левый снимок наблюдается через правый окуляр. Таким образом, в стереопланиграфе можно переключать оси визирования относительно глаз наблюдателя.

В наблюдательной системе имеются еще вращающиеся диски с фильтрами *19* и марками *20*. Марка вводится в наблюдательную систему с помощью объектива *21*, призмы *22* и отражающей грани, установленной в цилиндре *6* под углом 45° к оси X прибора. Цвет марки зависит от установленного фильтра.

Оптическая система *5—12* вместе с зеркальным экраном *4* находится на базисных суппортах, смонтированных на общей каретке (см. рис. 216). Рассматривая различные точки снимка, перемещают вдоль оси X общую каретку K_X, а следовательно, и систему *5—12* (см. рис. 218). При этом призмы *11* и *14* вращаются вокруг взаимно параллельных осей, а промежуток между покровным стеклом *12* и линзой *13* изменяется. Однако эти движения не нарушают резкости изображения в наблюдательной системе, так как отражающие плоскости призм *11* и *14* остаются взаимно параллельными при параллельном пучке лучей в интервале *10—13*. При наблюдении снимков пользуются еще движением проектирующих камер вдоль оси Y прибора. В этом случае экран *4* поворачивается вокруг оси X и становится непараллельным отражающей плоскости призмы *7*, что вызывает вращение изображения в его плоскости сначала вокруг оси X, а затем вокруг оси Y. С целью компенсации этого вращения призма *9* поворачивается вокруг оси Y в обратную сторону на половину угла поворота экрана *4*. Этот поворот осуществляется механической передачей вращения от экрана *4* к призме *9*. Призма *9* имеет и независимый поворот для вращения изображения.

Общее увеличение v изображения снимка, наблюдаемого в стереопланиграфе, зависит от увеличения v_1 изображения, построенного на зеркальном экране, и увеличения v_2 наблюдательной системы. Величина v равна отношению фокусных расстояний телеобъектива и проектирующей камеры

$$v_1 = \frac{f_e}{f}. \qquad (18.14)$$

Следовательно,

$$v = \frac{f_e}{f} v_2. \qquad (18.15)$$

Измерительные приспособления состоят из винтовых передач, линейных и угловых шкал и счетчиков. Для отсчета высот в метрах счетчик снабжен набором шкал, используемых в зависимости от масштаба модели.

Основные характеристики стереопланиграфа:

формат снимков . . . . . 23×23 см
фокусные расстояния камер . . . . . 206 ± 5;
211 ± 5
152 ± 4;
115 ± 2.5
100 ± 2,5 мм

углы наклона и поворота камер:
α_1 от +15 до −30^g, α_2 от +30 до −15^g,
ω_1 от +10 до −10^g, ω_2 от +10 до −10^g,
$\varkappa_1$ от 0 до 400^g, $\varkappa_2$ от 0 до 400^g,
углы наклона модели ξ от +9 до −9, η от +75 до −20^g пределы движений:
X от +280 до −280 мм $b_x = \pm 270$ мм
Y от +310 до −430 мм $b_y = \pm 30$ мм
Z от +150 до +640 мм $b_z = \pm 20$ мм
общее увеличение v:
от 3 до 13$^\times$ при $f = 200$ мм
от 4 до 10$^\times$ при $f = 152$ мм
от 6 до 14$^\times$ при $f = 100$ мм
увеличение масштаба составляемой карты по сравнению с масштабом модели от 0,1 до 5$^\times$ (24 ступени)
точность измерения координат X и Y точки местности 0,01 мм в масштабе снимка
точность измерения высоты 1 : 10 000 от высоты полета над землей
размеры:
стереопланиграфа . . . . . 2,3×1,8×2,5 м
координатографа . . . . . 1,4×1,6×0,8 м
масса прибора . . . . . 1730 кг

Стереопланиграф С-8 отличается от описанного выше в основном тем, что *позволяет обрабатывать снимки с фокусными расстояниями от 100 до 600 мм* и снабжен ортофотопроектором Гигас (ФРГ) для дифференциального трансформирования снимков (см. § 133).

Ортофотопроектор состоит из камеры, дополнительной проектирующей системы, координатографа с кассетой и запоминающего устройства (рис. 219). Камера имеет три поворота и перемещается вдоль оси Z прибора. Снимок, установленный в камере, проектируется на фотоматериал через щель, прикрепленную к каретке координатографа. Дополнительная проектирующая система обеспечивает резкое изображение снимка на фотоматериале.

Ортофотопроектор подключается к стереопланиграфу для получения ортофотоснимка путем сканирования модели по параллельным маршрутам и одновременного дифференциального трансформирования снимка. Эти процессы можно выполнить и раздельно: сначала зарегистрировать в запоминающем устройстве результаты сканирования оператором модели, а затем по этой информации автоматически построить ортофотоснимок. В первом случае скорость сканирования и скорость трансформирования одинаковы — около 5 мм/с,

во втором скорость трансформирования значительно выше. Поэтому целесообразно одним ортофотопроектором обслуживать несколько стереопланиграфов, снабженных устройствами для накопления информации при сканировании модели.

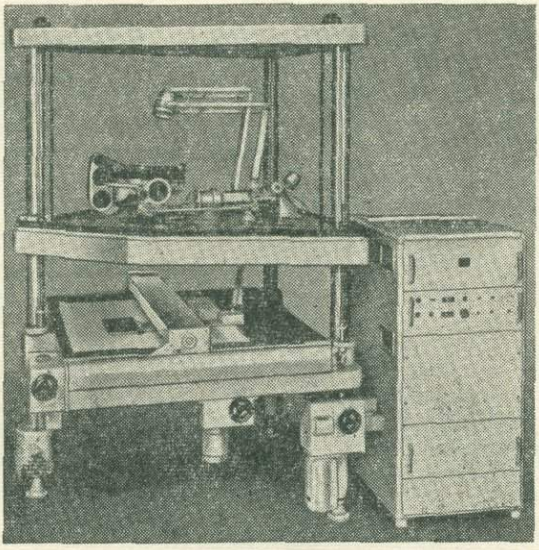


Рис. 219

§ 128. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКИХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

Универсальные стереоприборы, основанные на механических способах решения фотограмметрической засечки, можно разделить на две подгруппы.

В приборах первой подгруппы применяются плоскостные механизмы. К таким приборам относятся стереоавтограф, принципиальная схема которого представлена на рис. 54, а также супрограф и стереотригомат Цейсса.

В приборах второй подгруппы (автограф Вильда, стереограф Ф. В. Дробышева, стереопроектор Г. В. Романовского, стереокартограф Сантони и др.) фотограмметрическая засечка решается с помощью пространственных механизмов.

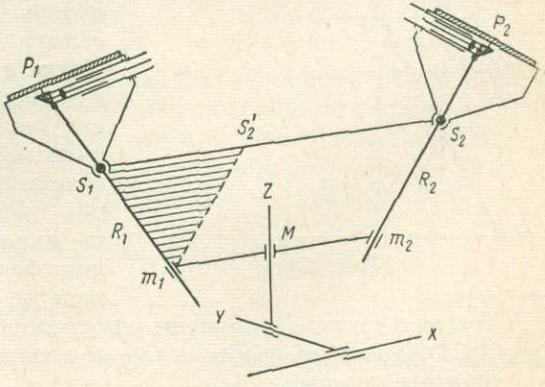


Рис. 220

Вокруг точек S_1 и S_2, соответствующих центрам проекции, вращаются рычаги R_1 и R_2 (рис. 220). Короткие плечи их в автографе связаны с наблюдательной системой (на рисунке показана только часть этой системы), а длинные

проходят через карданы базисного устройства, расположенного на мостике M. Мостик имеет движения по трем взаимно перпендикулярным направляющим. Эти движения учитываются по счетчикам и фиксируются на планшете, что позволяет измерить координаты точек модели и составить карту. Камеры имеют все движения, необходимые для взаимного ориентирования снимков и внешнего ориентирования модели.

Стереограф и стереопроектор существенно отличаются от автографа тем, что снимки в этих приборах всегда находятся в горизонтальной плоскости, а влияние их углов наклона, существовавших в момент фотографирования, учитывается с помощью коррекционных механизмов. Эта особенность позволила применить более простую наблюдательную систему, чем в автографе Вильда и стереопланиграфе Цейса.

В механических универсальных стереоприборах для измерения модели применяется способ мнимой марки, а для решения фотограмметрической засечки — принцип треугольник плюс параллелограмм. Исключением является стереокартограф Сантони, в котором использован принцип двух треугольников.

§ 129. СТЕРЕОГРАФ Ф. В. ДРОБЫШЕВА

Стереограф — широко распространенный в СССР универсальный стереоприбор механического типа. Он основан на теории преобразования связок проектирующих лучей, что позволяет обрабатывать снимки с различными фокусными расстояниями без смены проектирующих камер.

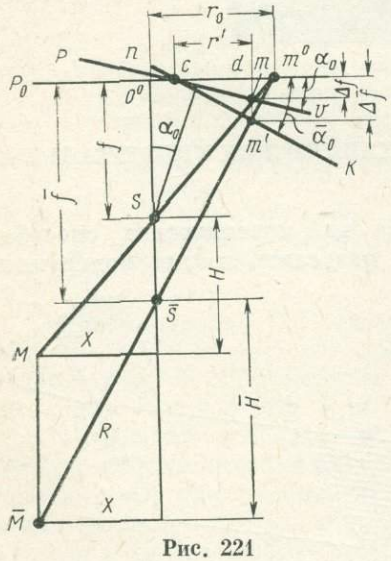


Рис. 221

Снимки в приборе находятся в горизонтальной плоскости. Влияние углов наклона снимков учитывают коррекционные механизмы, которые вводят поправки в положение каждой наблюдаемой точки. Таким образом, наклонные снимки приводятся к горизонтальным. По результатам трансформирования пары снимков строится модель с помощью рычагов, вращающихся вокруг центров проекции. Верхние концы рычагов связаны со снимками, а нижние — с базисной кареткой. При движении базисной каретки по трем взаимно перпендикулярным направляющим рычаги поворачиваются и смещают снимки под неподвижной наблюдательной системой. Поправки за наклон снимка вводятся путем изменения фокусного расстояния проектирующей камеры.

Пусть с точки S получены два снимка: наклонный P и горизонтальный P^0 (рис. 221). Точка M изобразилась в точке m на наклонном снимке и в точке m^0 на горизонтальном.

Выберем новый центр проекции $\bar{S}$ и проведем луч $m^0\bar{S}$ из точки m^0 через этот центр до пересечения с отвесной прямой, проходящей через точку M. Проведем еще вертикальную линию через точку m. Пересечение этой линии с лучом $m^0\bar{S}$ обозначим через m'.

Плоскость K, проходящая через линию неискаженных масштабов и точку m', называется к о р р е к ц и о н н о й. Она позволяет по наклонному снимку получить связку, соответствующую горизонтальному снимку.

Пусть снимок P наклонен на угол α_0, существовавший во время фотографирования, а коррекционная плоскость K — на угол $\bar{\alpha}_0$. Вокруг $\bar{S}$ поворачивается рычаг R. Провизируем ортогональным лучом на точку m и установим одновременно конец рычага в точку m' коррекционной плоскости, находящуюся на продолжении визирного луча. Тогда ось рычага пройдет и через точку m^0 горизонтального снимка. При этом если точка M принадлежит к подобной модели, то точка $\bar{M}$ — к преобразованной.

Учитывая, что f — фокусное расстояние снимка, а $\bar{f}$ — фокусное расстояние прибора, напишем

$$\frac{r^0}{f} = \frac{X}{H} = \frac{r_0}{\bar{f}} = \frac{X}{\bar{H}},$$

отсюда

$$\bar{H} = \frac{\bar{f}}{f} H. \tag{18.16}$$

Это означает, что вертикальный масштаб модели равен горизонтальному, умноженному на коэффициент преобразования связки. Плановое положение точек преобразованной модели такое же, как на подобной модели.

Найдем угол наклона коррекционной плоскости. Из рис. 221 следует

$$\Delta f = r' \operatorname{tg} \alpha_0; \quad \Delta \bar{f} = r' \operatorname{tg} \bar{\alpha}_0,$$

откуда

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha}_0 = \frac{\Delta \bar{f}}{\Delta f} \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\bar{f}}{f} \operatorname{tg} \alpha_0. \tag{18.17}$$

Центр вращения c коррекционной плоскости должен находиться в плоскости главного вертикала наклонного снимка и отстоять от отвесной линии, проходящей через точку S, на величину

$$\delta = o^0 c = f \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}. \tag{18.18}$$

Итак, чтобы при наблюдении снимка отвесным визирным лучом придать проектирующему рычагу правильное положение, необходимо установить снимок под углом α_0, существовавшим во время фотографирования, а коррекционную плоскость повернуть вокруг линии неискаженного масштаба на угол $\bar{\alpha}_0$. При этом фокусное расстояние прибора изменяется на величину

$$\Delta \bar{f} = c\,d \operatorname{tg} \bar{\alpha}_0 = r \cos \alpha_0 \operatorname{tg} \bar{\alpha}_0$$

или

$$\Delta \bar{f} = kr \sin \alpha_0, \tag{18.19}$$

где r — радиус-вектор на наклонном снимке, соединяющий точку нулевых искажений с точкой m, а $k = \bar{f} : f$.

На рис. 221 наблюдаемая точка находится на главной вертикали снимка cv. Для произвольно расположенной точки снимка

$$\Delta f = kr \sin \alpha_0 \sin \varphi, \tag{18.20}$$

где φ — угол между линией неискаженных масштабов и радиус-вектором r. Для точек, лежащих на линии неискаженных масштабов, $\Delta\vec{f} = 0$. При данных значениях α, k и r максимальное смещение $\Delta\vec{f}$ соответствует точке, расположенной на главной вертикали ($\varphi = 90°$).

Так как снимки в стереографе занимают горизонтальное положение, а согласно теории они должны быть наклонены, то в процессе обработки

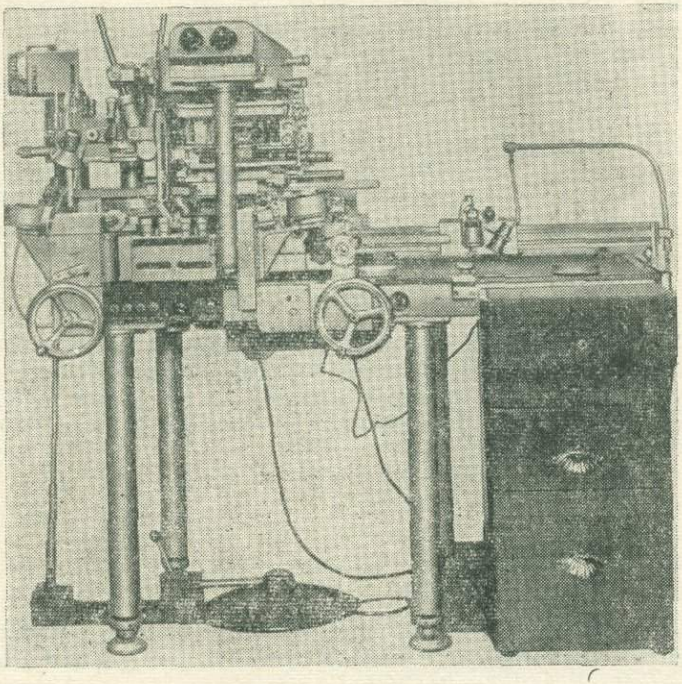


Рис. 222

возникает некоторая погрешность. Она равна разности отрезков cm и cd. Обозначив эту разность через δr, для точки главной вертикали напишем

$$\delta r = r - r\cos\alpha_0$$

или

$$\delta r = r\alpha_0^2. \qquad (18.21)$$

При обработке на приборе гиростабилизированных снимков, отличающихся малыми углами наклона, эта погрешность не имеет никакого практического значения.

Основные части стереографа — станина, снимкодержатели, проектирующие рычаги, коррекционные механизмы, базисная каретка, наблюдательная система и координатограф (рис. 222 и 223).

На станине *1*, прикрепленной к столу, находятся направляющие, осуществляющие ось Y прибора. По этим направляющим перемещается каретка *2* с направляющими, которые осуществляют ось X прибора. По направляющим,

прикрепленным к каретке *2*, перемещается каретка *3*. Каретки *2* и *3* приводятся в движение с помощью штурвалов *Y* и *X*.

На каретке *3* находится направляющая *4*, по которой с помощью ножного диска *Z* перемещается базисная каретка *5*. Вращая штурвалы *X* и *Y* и ножной диск *Z*, можно перемещать базисную каретку вдоль трех взаимно перпендикулярных осей прибора.

На каретке *3* имеются и направляющие дифференциальных кареток *6*, а на каретках *6* — направляющие дифференциальных кареток *7*, с которыми связаны снимкодержатели. С каретками *7* соединены направляющие кареток

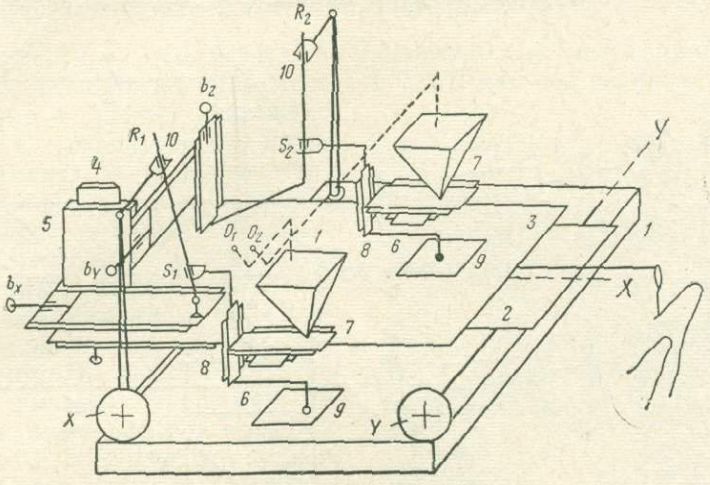


Рис. 223

изменения фокусного расстояния *8*. Каретки *8* заканчиваются шаровыми опорами, которые касаются коррекционных плоскостей *9*. Последние смонтированы на станине и могут наклоняться с помощью микрометренных винтов на углы $k\alpha$ и $k\omega$.

Таким образом, при смещении кареток *2* и *3* вдоль осей *X* и *Y* прибора шаровые опоры скользят по коррекционным плоскостям *9*, что вызывает смещение кареток *8* вдоль вертикальных направляющих, т. е. изменение фокусного расстояния прибора.

С каретками *8* связаны нижние карданы S_1, S_2 и снимкодержатели. Верхние карданы *10* и наблюдательная система прикреплены к станине. Через карданы S_1, S_2 и *10* проходят рычаги R_1 и R_2, определяющие направление проектирующих лучей. Центры нижних карданов S_1 и S_2 представляют собой центры проекции.

При изменении фокусных расстояний нижние карданы S_1 и S_2 скользят вдоль проектирующих рычагов, в результате чего смещаются в горизонтальной плоскости дифференциальные каретки, несущие снимкодержатели. Эти смещения соответствуют разностям абсцисс и ординат на наклонных и горизонтальных снимках.

На базисной каретке имеются суппорты, позволяющие вводить в прибор базис фотографирования путем смещения левой камеры на величину b_X и правой на величины b_Y и b_Z. На суппорте b_X расположены шаровые опоры рычагов R_1 и R_2, определяющие положение точки модели.

Итак, с помощью коррекционных плоскостей происходит дифференциальное перемещение центров проекции в нижних карданах, что вызывает дифференциальное смещение снимков, компенсирующее влияние их углов наклона. Эти смещения происходят отдельно для каждой наблюдаемой точки. Поэтому модель строится не сразу для всей стереопары, а лишь в наблюдаемой точке.

Снимкодержатели имеют повороты $\varkappa$ и движения для введения децентраций.

Наблюдательная система представляет собой бинокулярный микроскоп, обеспечивающий ортогональное визирование на точки снимков. Оптическая схема его показана на рис. 224 : *1* и *1′* — левый и правый снимки, *2* и *2′* — призмы, *3* и *3′* — объективы, *4* и *5* — зеркала, *4′*, *4″* и *5′* — блок призм, *6*

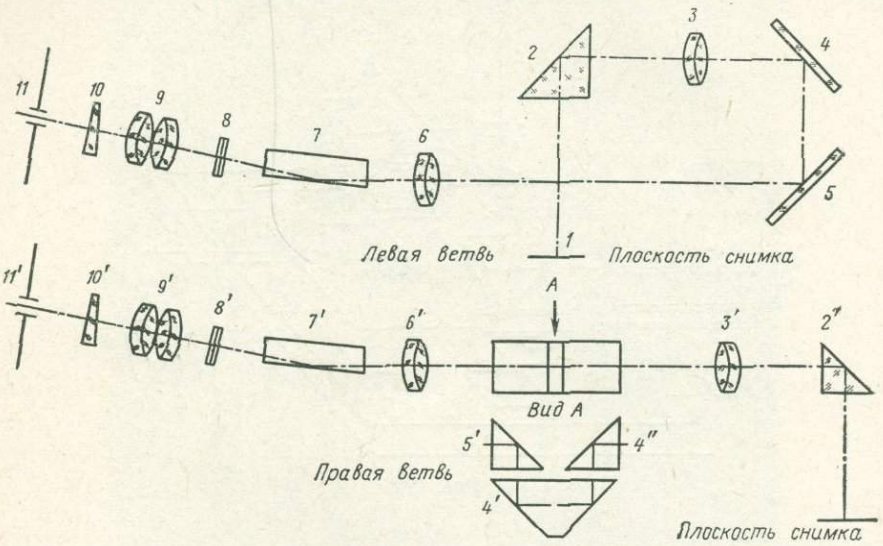


Рис. 224

и *6′* — объективы бинокуляра, *7* и *7′* — трапециевидные призмы, *8* и *8′* — защитные стекла с марками, *9* и *9′* — окуляры, *10* и *10′* — оптические клинья, *11* и *11′* — зрачки выхода. Призмы *4′*, *4″* и *5′* позволяют сохранить параллельность лучей при изменении установки бинокулярного микроскопа по глазному базису. Призма *2* (*2′*) и объектив *3* (*3′*) находятся на одном подвижном плато, которое можно смещать вдоль оси *Y* прибора с помощью микрометренных винтов. Это смещение соответствует поперечной децентрации снимка.

Координатограф служит для составления карты. При этом переход от масштаба модели к масштабу карты осуществляется путем замены шестерен в редукторах.

Основные характеристики стереографа (СД-3):

формат снимков	18×18 см
фокусное расстояние снимков	55—210 мм
фокусное расстояние прибора	127—133 мм
увеличение наблюдательной системы	4 и 7×
поле зрения при увеличении 7×	28 мм
отношение масштаба снимка к масштабу карты	0,5—3,0
максимальная разность высот точек местности	0,35*H*
предельные значения углов наклона снимков	от 3,0 до 5,9^g

размеры прибора со столом	135×105×125 см
масса прибора	400 кг
средняя квадратическая ошибка определения высот по макетной стереопаре	1 : 8000 от высоты фотографирования

За создание высокоточных универсальных стереоприборов Ф. В. Дробышеву присуждена Ленинская премия.

§ 130. СТЕРЕОПРОЕКТОР Г. В. РОМАНОВСКОГО

Стереопроектор — высокоточный универсальный стереоприбор механического типа. Он широко применяется в СССР для составления топографических карт по плановым снимкам.

Снимки в стереопроекторе находятся в горизонтальном положении. Влияние углов наклона снимков, существовавших в момент фотографирования местности, учитывается коррекционными механизмами, которые смещают объективы наблюдательной системы, т. е. трансформируют пару снимков. Модель строится с помощью рычагов, вращающихся вокруг карданных центров, которые в общем случае не совпадают с центрами проекции снимков. Поэтому связки в приборе не подобны существовавшим во время съемки, что вызывает неравенство горизонтального и вертикального масштабов модели. Преобразование связок позволяет обрабатывать снимки практически с любыми фокусными расстояниями.

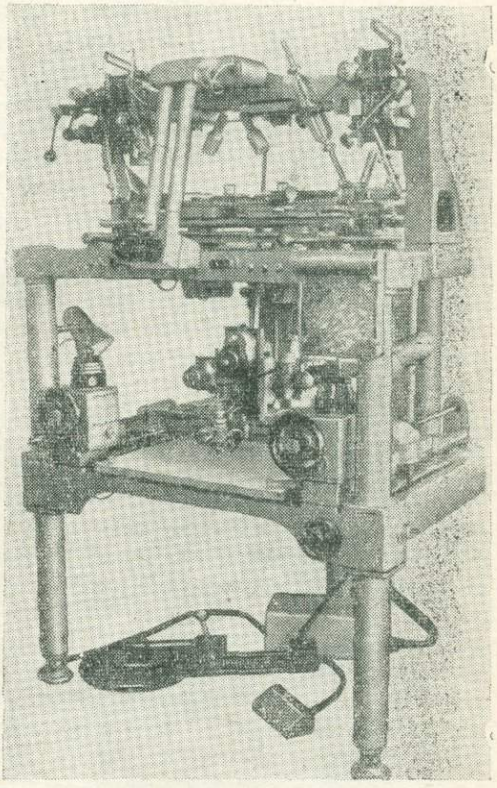


Рис. 225

Основными частями стереопроектора служат станина, каретки снимков, проектирующие рычаги, базисная каретка, каретка фокусных расстояний, наблюдательная система и коррекционный механизм (рис. 225 и 226).

Каретки снимков K_1 и K_2 расположены горизонтально на верхней части станины. При повороте проектирующих рычагов R_1 и R_2 они перемещаются по направляющим, параллельным осям X и Y прибора. На каретках снимков находятся снимкодержатели.

Проектирующие рычаги проходят через двухосные скользящие шарниры и поворачиваются вокруг центров этих шарниров S_1 и S_2. Шарниры находятся на каретке фокусных расстояний $K_{\tilde{f}}$, которая перемещается по вертикальным

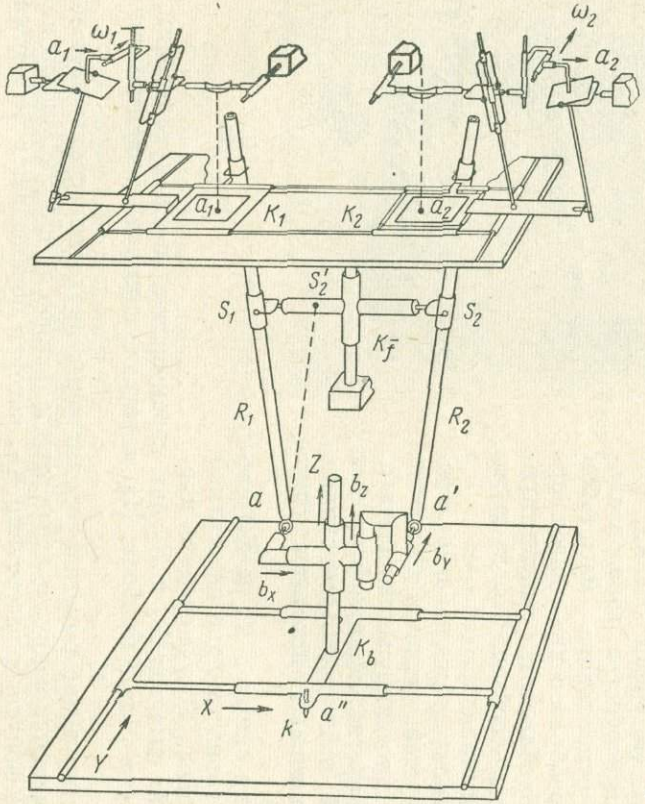


Рис. 226

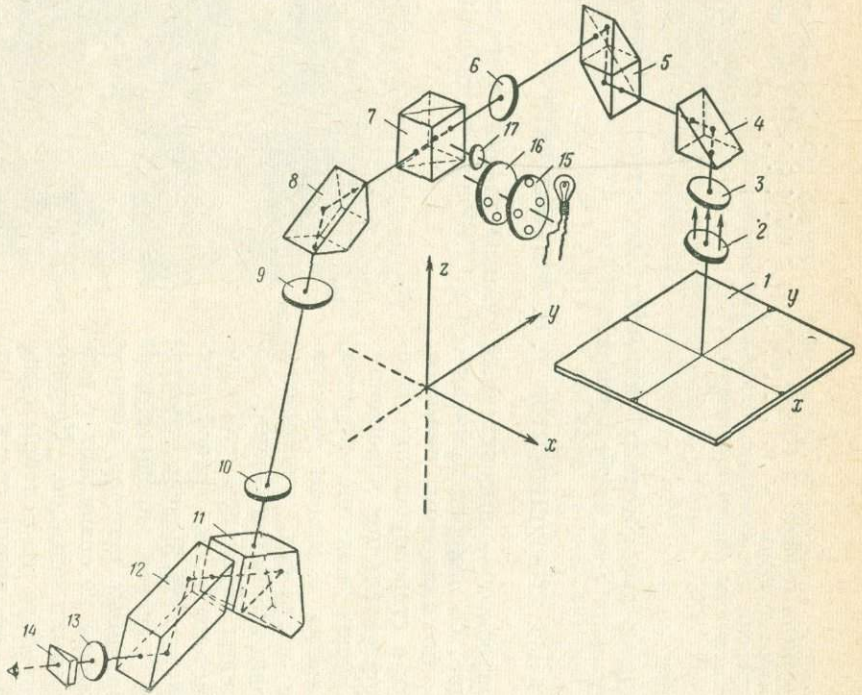


Рис. 227

направляющим. Это движение соответствует изменению фокусного расстояния проектирующей камеры f. Нижние концы рычагов связаны с базисной кареткой, а верхние проходят через шарниры, прикрепленные к кареткам снимков.

Базисная каретка K_b с помощью штурвалов перемещается вдоль осей X и Y прибора. Эти движения отсчитываются по счетчикам и повторяются карандашом K на планшете. Верхняя часть базисной каретки перемещается с помощью ножного диска вдоль оси Z, что позволяет измерять высоты точек модели, отсчитывая их также по счетчику. Фотограмметрическая засечка в стереопроекторе осуществляется по принципу треугольник плюс параллелограмм ($S_1S_2'a$ и $aa'S_2S_2'$). Поэтому расстояние между центрами проекции S_1 и S_2 — величина постоянная, а для установки базиса верхняя часть базисной каретки имеет движения b_X, b_Y и b_Z, параллельные осям X, Y и Z прибора. Эти движения позволяют изменять расстояние между нижними концами проектирующих рычагов.

Наблюдательная система состоит из левого и правого рукавов, симметричных относительно вертикальной плоскости YZ прибора. На рис. 227 представлена схема правого рукава. Снимок *1* находится в главной фокальной плоскости объектива *2*. Этот объектив укреплен на каретке, которая перемещается коррекционным механизмом в продольном и поперечном направлениях. За ним следуют объектив *3* и прямоугольная призма *4*. До призмы *4* визирный луч направлен параллельно оси Z прибора. Призма *4* направляет луч параллельно оси X в призму *5*, состоящую из двух прямоугольных призм. Призма *5* перемещает луч несколько вверх и направляет его параллельно оси Y в коллектив *6* и кубическую призму *7*, состоящую из двух прямоугольных призм. Диагональная грань кубической призмы посеребрена на 10% и служит для включения в систему оптической марки. Далее луч попадает в трапециевидную призму *8*, которая направляет его вниз под углом 15° к вертикали. За этой призмой следуют коллективы *9* и *10*, а также пентапризма *11*, выполняющая роль прямоугольной призмы, но имеющая две отражательные грани. Пентапризма направляет луч вверх под углом 75° к вертикали. Оптические детали, расположенные за пентапризмой, — ромбическая призма *12*, окуляр *13* и оптический клин *14* принадлежат бинокулярной головке. Ромбическая призма позволяет изменять расстояние между окулярами, а с помощью оптического клина можно перемещать в небольших пределах изображение снимка и марки в фокальной плоскости окуляра, что необходимо для устранения зрительного вертикального параллакса.

На посеребренном диске *16* выгравированы четыре марки — три кольцеобразные и одна Т-образная. Каждая марка включается в оптическую систему поворотом диска. Марка освещена лампой, перед которой установлен диск *15* со сменными цветными фильтрами — белым, желтым и зеленым. Марка проектируется объективом *17*. Диагональная грань кубической призмы направляет часть лучей, идущих от марки, в световой пучок, исходящий от снимка.

Коррекционный механизм решает уравнение

$$r^0 = r - \delta r, \tag{18.22}$$

где r — радиус-вектор на плановом снимке, соединяющий точку нулевых искажений с наблюдаемой точкой, δr — смещение наблюдаемой точки, вызванное наклоном снимка, r^0 — радиус-вектор на горизонтальном снимке, соответствующий величине r.

Согласно формуле (9.22)

$$\delta r = -\frac{r^2 \sin\varphi \sin\alpha_0}{f - r \sin\varphi \sin\alpha_0}$$

или

$$\delta r = -\frac{r\,(r-\delta r)\sin\varphi \sin\alpha_0}{f}, \qquad (18.23)$$

где f — фокусное расстояние снимка, α_0 — угол наклона снимка, φ — угол на снимке, составленный радиус-вектором r с горизонталью.

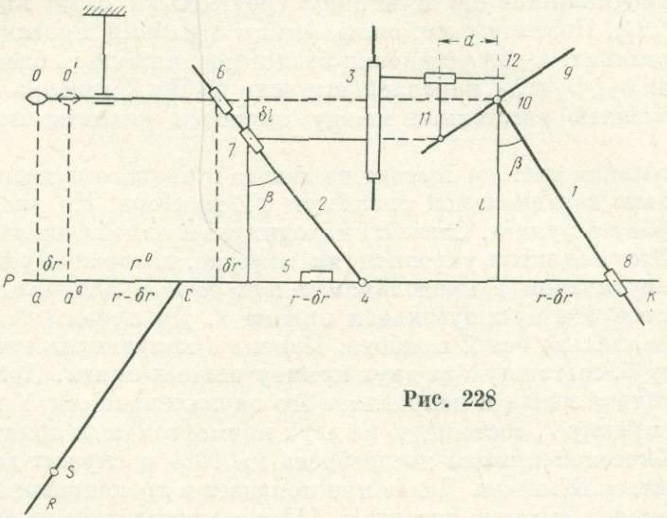


Рис. 228

На рис. 228 представлены снимок P, рычаг R, подвижный объектив O наблюдательной системы и основные части коррекционного механизма: рычаги *1* и *2* и каретка *3*.

Нижний конец рычага *2* соединен с двухосным шарниром *4*, а последний с суппортом *5*, который перемещается вместе с кареткой снимка K. Верхний конец рычага *2* проходит через скользящий двухосный шарнир *6*, соединенный с кареткой объектива O и через скользящий двухосный шарнир *7*, связанный с кареткой *3*. Эта каретка может перемещаться по вертикальной направляющей. Вместе с кареткой перемещается и шарнир *7*. Нижний конец рычага *1* проходит через скользящий шарнир *8*, соединенный с суппортом *5*, а верхний жестко связан с тарелкой *9* и может поворачиваться с ней вокруг центра неподвижного двухосного шарнира *10*. Разности высот l центров шарниров *10* — *8* и *6*—*4* одинаковы.

На тарелку опирается шаровидный конец стержня *11*, который можно смещать в продольном и поперечном направлениях. При вертикальном положении рычагов *1* и *2* центры шарниров *6* и *7* совпадают, а визирный луч должен проходить через точку нулевых искажений.

Движение каретки снимка вызывает поворот рычагов *1* и *2*. Если конец стержня находится в центре шарнира *10*, то центры шарниров *6* и *7* остаются совмещенными при любых положениях рычагов *1* и *2*. Если же конец этого стержня смещен с центра шарнира *10*, то при повороте рычагов каретка *3* сместится по вертикальной направляющей, что вызывает смещение шарнира *7* по высоте на величину δl и каретки объектива на величину δr.

Пусть рычаги *1* и *2* перпендикулярны плоскости снимка, визирный луч проходит через точку нулевых искажений, а стержень *11* смещен на величину d относительно центра шарнира *10*. Действуя штурвалами, переместим каретку снимка, чтобы визирный луч прошел через точку a. В результате этого рычаги R, *1*, *2* и тарелка *9* повернутся, каретка *3* опустится и объектив O сместится на величину δr. При этом каретка снимка смещается не на r, а на величину $r - \delta r$.

Как следует из рис. 228,

$$\delta r = \delta l \operatorname{tg} \beta' = d \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \beta',$$

где β и β' — углы отклонения рычагов *1* и *2* от вертикали. При этом

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{r - \delta r}{l}; \quad \operatorname{tg} \beta' = \frac{r - \delta r}{l - \delta l} \approx \frac{r}{l}.$$

Следовательно,

$$\delta r = d \frac{r (r - \delta r)}{l^2}. \tag{18.24}$$

Сравнивая это выражение с равенством (18.23), видим, что коррекционный механизм вводит поправки за наклон снимка при условии, если смещение стержня *11*

$$d = \frac{l^2}{f} \sin \alpha_0 \sin \varphi. \tag{18.25}$$

В приборе стержень *11* смещается в продольном и поперечном направлениях на величины

$$\left.\begin{aligned} d_x &= \frac{l^2}{f} \sin \alpha \\ d_y &= \frac{l^2}{f} \sin \omega \end{aligned}\right\}. \tag{18.26}$$

Полагая, что углы наклона снимка α и ω малы, напишем

$$d_x = \frac{l^2}{f} \alpha; \quad d_y = \frac{l^2}{f} \omega. \tag{18.27}$$

При отвесном положении проектирующего рычага визирный луч должен проходить через точку надира снимка, а при отвесном положении рычагов коррекционного механизма на визирном луче должна быть точка нулевых искажений. Первое требование выполняется путем децентрации снимка

$$\Delta = f \operatorname{tg} \alpha_0 \approx f \alpha_0, \tag{18.28}$$

а второе — путем децентрации коррекционного механизма

$$\delta = \frac{1}{2} f \operatorname{tg} \alpha_0 \approx \frac{1}{2} f \alpha_0. \tag{18.29}$$

Децентрация снимка вводится смещением верхней части каретки снимка относительно нижней, с которой связаны шарнир рычага R и суппорт *5*. Децентрация коррекционного механизма устанавливается передвижением суппорта *5*. В приборе устанавливают составляющие этих децентраций по осям x и y

$$\left.\begin{aligned} \Delta_x &= f\alpha; \quad \delta_x = \frac{1}{2} f\alpha \\ \Delta_y &= f\omega; \quad \delta_y = \frac{1}{2} f\omega \end{aligned}\right\}. \tag{18.30}$$

Если проектирующий рычаг и рычаги коррекционного механизма приведены в вертикальное положение, а визирный луч проходит через центр снимкодержателя, то отсчеты по шкалам децентраций равны начальным.

Стереопроектор снабжен двумя коррекционными механизмами, расположенными симметрично относительно плоскости YZ прибора.

Основные характеристики стереопроектора СПР-3:

формат снимков	18×18 см
фокусное расстояние снимков	35—350 мм
фокусное расстояние прибора	150—300 мм
увеличение наблюдательной системы	6 и 10×
поле зрения при увеличении 6×	30 мм
отношение масштаба снимка к масштабу карты:	
без координатографа	0,5—2,0
с координатографом	0,1—10,0
максимальная разность высот точек местности (в долях высоты фотографирования) при $n=0{,}5$	0,5
предельные значения углов наклона снимков при фокусных расстояниях f, равных 100 и 35 мм	5,1 и 1,8°
размеры стереопроектора	116×120×190 см
масса	800 кг
размеры координатографа	120×128×80 см
масса	150 кг
средняя квадратическая ошибка определения высот по макетным снимкам	1 : 8000 от высоты фотографирования

§ 131. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

В оптико-механических универсальных стереоприборах, например в фотостереографе Нистри (Италия), связки образуются с помощью проектирующих камер, а модель — посредством пространственных рычагов R_1 и R_2 (рис. 229). Рычаги вращаются вокруг передних узловых точек проектирующих камер и устанавливаются по направлениям лучей. С рычагами связана наблюдательная система так, что визирные оси ее микроскопов проходят через точки пересечения осей рычагов со снимками. На рисунке показана только часть наблюдательной системы.

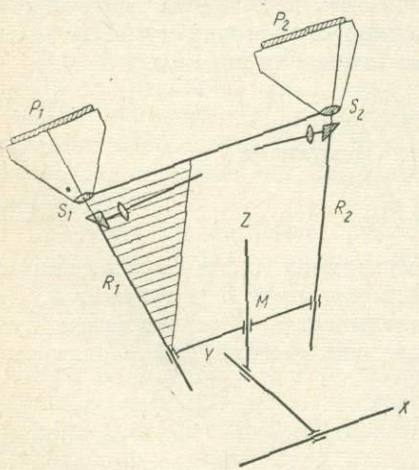


Рис. 229

Засечка решается по принципу треугольник плюс параллелограмм. Нижние концы рычагов проходят через карданы базисного устройства, находящегося на мостике M. Для установки базиса фотографирования изменяют расстояние между центрами этих шарниров. Мостик перемещается по трем взаимно перпендикулярным напра-

влениям. Эти движения учитываются по счетчикам и передаются на каретку координатографа, что позволяет измерять координаты точек модели и составлять карту.

§ 132. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА АНАЛИТИЧЕСКИХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

Универсальные приборы аналитического типа созданы с целью расширения возможностей и повышения точности фотограмметрической обработки снимков. Фотограмметрическая засечка в этих приборах решается с помощью электронных цифровых вычислительных машин. Это позволяет быстро и точно решать более сложные, соответствующие реальным условиям уравнения зависимости между координатами точек местности и снимков по сравнению с теми уравнениями, которые приняты в идеальной центральной проекции и в универсальных стереоприборах, относящихся к первым трем группам.

На аналитических приборах можно обрабатывать снимки с любыми элементами ориентирования, полученные любыми фотокамерами, в том числе панорамными и щелевыми.

Аналитический стереоприбор состоит из координатного устройства, электронной цифровой вычислительной машины — вычислителя, стереокомпаратора и координатографа (рис. 230).

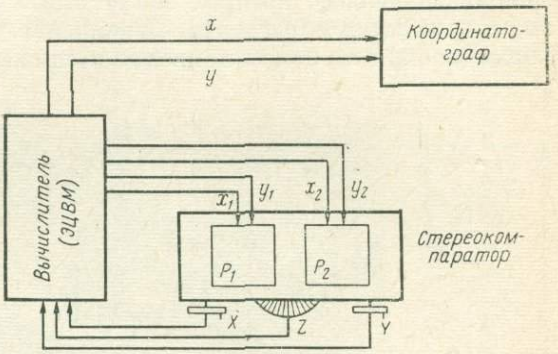


Рис. 230

В координатное устройство входят два штурвала и ножной диск, приводимые в действие оператором. Оно вырабатывает координаты точки модели, которые в виде импульсов поступают в вычислитель. Используя эти данные, а также элементы внешнего ориентирования снимков и другую информацию, необходимую для учета влияния систематических ошибок, вычислитель по специальной программе находит координаты соответственных точек левого и правого снимков и координаты точки карты. Результаты вычислений преобразуются из цифровой в аналоговую форму и используются для установки кареток стереокомпаратора и координатографа. После такой установки, выполняемой автоматически с помощью моторов, измерительная марка совмещается с определяемой точкой модели, а карандаш координатографа указывает положение этой точки на составляемой карте.

Если элементы внешнего ориентирования снимков неизвестны, но даны опорные точки, то можно решить обратную двойную засечку. Для этого измеряют координаты не менее пяти точек стереопары, по которым вычисляют элементы взаимного ориентирования снимков, затем строят модель и по опорным точкам находят ее элементы внешнего ориентирования. Эти элементы используют для определения положения точек местности и для составления карты.

Возможен и другой путь ориентирования снимков в данном приборе, основанный на определении элементов внешнего ориентирования каждого снимка по опорным точкам.

К аналитическим стереоприборам относится аналитический плоттер, разработанный фирмой Ottico Meccanica Italiana по предложению Хелавы (Канада).

Фирма изготовила несколько моделей этого прибора. Наиболее универсальной из них является модель AS-11B-1, позволяющая обрабатывать снимки формата до 23×45 см. Она снабжена мощной вычислительной машиной, устройством для получения ортофотоснимков, а также приспособлениями для автоматического проведения горизонталей и построения профилей.

§ 133. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ СНИМКОВ НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРАХ

Фотоплан содержит много ценной информации о местности и нашел широкое применение в народном хозяйстве. Однако на фотоплане, составленном из снимков, трансформированных на обычном фототрансформаторе, остаются ошибки за рельеф, которые могут выйти за допустимые пределы, если местность холмистая или горная. Стремление уменьшить эти ошибки путем трансформирования по зонам приводит к снижению производительности труда.

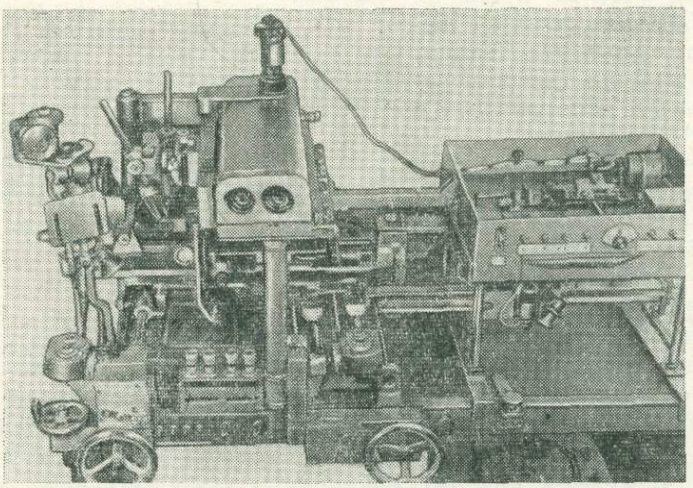


Рис. 231

Эффективным способом создания горизонтальных снимков, практически свободных от ошибок за рельеф и называемых ортофотоснимками, является дифференциальное трансформирование аэроснимков.

Дифференциальное трансформирование основано на проектировании снимка малыми участками через щель. При этом расстояние от центра проекции до экрана, на котором находится светочувствительный материал, непрерывно изменяется в зависимости от рельефа местности, что обеспечивает постоянство масштаба ортофотоснимка.

В СССР для дифференциального трансформирования снимков созданы щелевой фототрансформатор Е. И. Калантарова и Г. П. Жукова, фотоприставка к стереографу (рис. 231) и ортофототрансформатор Ф. В. Дробышева и др., разрабатывается ортотрансформатор ЦНИИГАиК. За рубежом изготовлены стереотригомат и топокарт Цейсса (ГДР), ортопроектор Гигас в виде приставки к стереопланиграфу (ФРГ) и др.

Рассмотрим две основные схемы дифференциального трансформирования снимка.

Первая схема показана на рис. 232. Неподвижный снимок P проектируется на экран E через объектив S и щель *щ*. Здесь a и b — точки снимка P, a' и b' — их изображения на ортофотоснимке. В процессе проектирования щель перемещается над фотоматериалом, прикрепленным к экрану в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а камера с объективом и осветителем поднимаются или опускаются в соответствии с рельефом модели местности, полученной в универсальном стереоприборе. Такая схема

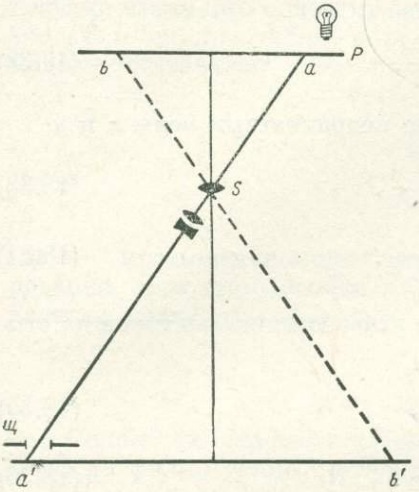


Рис. 232

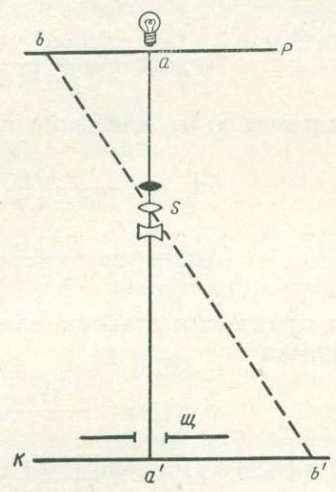


Рис. 233

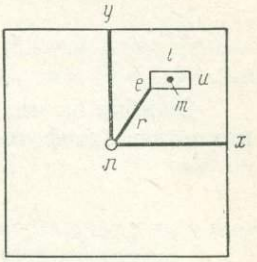


Рис. 234

осуществлена в щелевом фототрансформаторе Е. И. Калантарова и Г. П. Жукова и в ортопроекторе Гигас.

Вторая схема (рис. 233) применена в фотостереографе Ф. В. Дробышева. Снимок и экран имеют противоположно направленные движения, конденсор, объектив и щель неподвижны, масштаб проектирования изменяется перемещением экрана и щели вверх—вниз [10].

Резкость изображения на экране обеспечивается с помощью дополнительной проектирующей системы, состоящей из положительной и отрицательной линз, расстояние между которыми изменяется автоматически инверсором.

Снимки проектируются через щель в процессе профилирования модели на универсальном стереоприборе: измерительной маркой обводится модель по прямым, параллельным, например, оси Y прибора и отстоящим друг от друга на расстоянии, равном длине щели. Каждой такой прямой на ортофотоснимке соответствует полоса, ширина которой равна длине щели.

Щель имеет не бесконечно малые, а конечные размеры. Поэтому на ортофотоснимке вследствие влияния рельефа местности возникают ошибки в положении точек на краях полосы, например в точке e (рис. 234).

Полагая, что коэффициент трансформирования снимка равен n, подсчитаем эту ошибку по формуле, аналогичной (9.27),

$$\delta r_i = n \frac{h}{f'} r, \tag{18.31}$$

где h — превышение точки e' модели над центром a' элементарного участка модели, f' — высота проектирования над точкой a', r — расстояние на снимке от точки надира до точки e. Из рисунка следует, что

$$h = \frac{l}{2} \operatorname{tg} i,$$

где l — длина щели, а i — угол наклона местности по направлению, соответствующему отрезку r. Кроме того,

$$f' = f + r \operatorname{tg} i.$$

Следовательно,

$$\delta r_i = n \frac{lr \operatorname{tg} i}{2(f + r \operatorname{tg} i)}. \tag{18.32}$$

Получим составляющие этого смещения по координатным осям x и y

$$\delta x_{i_x} = n \frac{lx \operatorname{tg} i_x}{2(f + x \operatorname{tg} i_x)}, \tag{18.33}$$

$$\delta y_{i_x} = n \frac{ly \operatorname{tg} i_x}{2(f + x \operatorname{tg} i_x)}. \tag{18.34}$$

Ошибки δx могут привести к двоению или исчезновению контуров на стыках полос ортофотоснимка

$$\delta s_{i_x} = n \frac{lr \operatorname{tg} i_x}{f}, \tag{18.35}$$

$$\delta s'_{i_x} = n \frac{lx \operatorname{tg} i_x}{f + x \operatorname{tg} i_x}. \tag{18.36}$$

Двоение контуров возникает, когда склон местности направлен от плоскости YZ модели, а исчезновение их — когда склон местности обращен к плоскости YZ.

Рельеф местности может снизить фотографическое качество ортофотоснимка, так как появляется «смаз»

$$\delta s_{i_y} = n \frac{ur \operatorname{tg} i_y}{f + y \operatorname{tg} i_y}, \tag{18.37}$$

где i_y — угол наклона местности в плоскости YZ, u — ширина щели.

При обработке снимков на стереографе снимки не наклоняют и не вводят поправки в масштабный коэффициент фотопроектирования элементарных участков за влияние углов наклона снимков. Вследствие этого на ортофотоснимке возникают ошибки [42]

$$\delta x_{i_x \alpha} = n \frac{l}{2f} \left[\frac{x \sin(i_x - \alpha)}{\left(1 + \frac{x}{f} \operatorname{tg} i_x\right) \cos i_x} - x\alpha - y\omega \right], \tag{18.38}$$

$$\delta y_{i_x \alpha} = n \frac{ly \sin(i_x - \alpha)}{2(f + x \operatorname{tg} i_x) \cos i_x}, \tag{18.39}$$

$$\delta s_{i_y \omega} = n \frac{u}{f} \left[\frac{r \sin(i_y - \omega)}{\left(1 + \frac{y}{f} \operatorname{tg} i_y\right) \cos i_y} - x\alpha - y\omega \right]. \tag{18.40}$$

Приведенные здесь формулы можно использовать для определения длины и ширины щели

$$l = \frac{2\delta x_{i_x\alpha} f\,(f + x \operatorname{tg} i_x)\cos i_x}{n\,[fx \sin(i_x - \alpha) - (x\alpha + y\omega)\,(f + x \operatorname{tg} i_x)\cos i_x]}, \tag{18.41}$$

$$u = \frac{\delta s i_{y\omega} f\,(f + y \operatorname{tg} i_y)\cos i_y}{n\,(fr \sin(i_y - \omega) + (x\alpha + y\omega)\,(f + y \operatorname{tg} i_y)\cos i_y]}. \tag{18.42}$$

Исследования показали, что ошибки ортофотоснимка, вызванные погрешностями взаимного ориентирования снимков на стереографе, равны $\delta x = \delta y = 0{,}08\ n$ мм, а ошибки, обусловленные погрешностью $\delta\varphi$ горизонтирования модели, составляют

$$\left.\begin{aligned} \delta r &= h \sin \delta\varphi \\ \delta x_{\varphi_x} &= h \sin \delta\varphi_x \\ \delta y_{\varphi_y} &= h \sin \delta\varphi_y \end{aligned}\right\}, \tag{18.43}$$

где h — превышение определяемой точки модели над плоскостью трансформирования. При этом ошибка горизонтирования $\delta\varphi_x$ вызывает исчезновение или двоение контуров

$$\delta s'_{\delta\varphi_x} = \frac{nlx \operatorname{tg} \delta\varphi_x}{f}. \tag{18.44}$$

Ошибка δZ совмещения измерительной марки с поверхностью модели в процессе профилирования приводит к смещениям точки на ортофотоснимке

$$\left.\begin{aligned} \delta x_{\delta Z} &= \frac{x}{f}\,\delta Z, \\ \delta y_{\delta Z} &= \frac{y}{f}\,\delta Z \end{aligned}\right\}. \tag{18.45}$$

Полагая, что погрешности ортофотоснимка носят случайный характер, найдем средние квадратические ошибки построения его

$$\left.\begin{aligned} m_x &= \sqrt{\delta x^2_{i_x\alpha} + \delta x^2 + \delta x^2_{\varphi_x} + \delta x^2_{\delta Z}} \\ m_y &= \sqrt{\delta y^2_{i_y\alpha} + \delta y^2 + \delta y^2_{\varphi_y} + \delta y^2_{\delta Z}} \\ m &= \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{aligned}\right\}. \tag{18.46}$$

В процессе профилирования на ортофотоснимке можно получить не только контуры, но и горизонтали, например путем впечатывания точек или штрихов, когда отсчеты по счетчику высот соответствуют горизонталям. Такой способ применен в стереомате А-2000 Вильда. Но он оказался трудоемким для изображения горных районов.

В СССР разработан другой способ создания ортофотокарт: горизонтали вычерчиваются на стереографе с одновременной фиксацией программы ортофотопрофилирования в виде графических точечных профилей. По этой программе создаются ортофотоснимки на ортофототрансформаторе Ф. В. Дробышева. Планшет с горизонталями и ортофотоснимки используются для составления ортофотокарты [10].

Для ортофототрансформатора ЦНИИГАиК программа профилирования получается с помощью ЭЦВМ по цифровой модели, составленной в процессе обработки снимков на универсальном стереоприборе. Кроме программы профилирования на ЭЦВМ получается информация для снижения ошибок на границах полос, вызванных рельефом местности, что позволяет увеличить длину щели и повысить производительность работ (предложение П. С. Александрова).

§ 134. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

В развитии отечественных и зарубежных универсальных стереоприборов можно отметить следующие основные направления.

1. Создание аналитических приборов, отличающихся большей точностью и универсальностью по сравнению с аналоговыми приборами. Однако стоимость аналитических приборов пока высокая, что ограничивает их применение. Они используются главным образом для создания крупномасштабных карт по снимкам мелкого масштаба.

2. Разработка автоматизированных приборов, выполняющих отдельные процессы — взаимное ориентирование и дифференциальное трансформирование снимков, съемку рельефа и построение профилей — почти без участия оператора, что повышает производительность труда в 3—4 раза (см. гл. 23).

3. Создание новых аналоговых приборов, снабженных устройствами для дифференциального трансформирования снимков и съемки рельефа, а также приспособлениями для учета влияния систематических ошибок и для автоматической регистрации координат точек модели. При этом обеспечивается возможность обработки снимков, полученных нормальноугольными, широкоугольными и сверхширокоугольными фотокамерами, с сохранением принципа восстановления связок проектирующих лучей.

4. Использование теории стереофотограмметрической обработки снимков с преобразованными связками для создания новых приборов аналогового типа, значительно расширяющих возможности фотограмметрии (обработка снимков с любыми фокусными расстояниями, построение аффинной модели местности).

5. Усовершенствование известных аналоговых приборов путем введения устройств для дифференциального трансформирования снимков, учета влияния систематических ошибок и для автоматической регистрации результатов измерений.

6. Сочетание универсального стереоприбора с электронной вычислительной машиной при построении фотограмметрических сетей и проектировании инженерных сооружений. Для построения фотограмметрической сети на универсальном стереоприборе создаются одиночные независимые модели. Затем при помощи электронной вычислительной машины эти модели соединяются в общую систему — свободную фотограмметрическую сеть, которая ориентируется относительно геодезической системы координат. Такое сочетание позволяет упростить конструкцию универсального стереоприбора, так как отпадает необходимость иметь устройства для переключения осей визирования и установки отрицательных базисов. Точность инструментально-аналитического способа фототриангуляции выше по сравнению с инструментальным, но ниже точности аналитической фототриангуляции. Для проектирования инженерных сооружений на стереоприборе определяются координаты довольно большого количества точек модели, т. е. получается цифровая модель местности. Результаты этих измерений используются для инженерных расчетов при помощи электронной вычислительной машины.

Глава 19

ОРИЕНТИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СНИМКОВ НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРАХ

§ 135. ВЗАИМНОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ

В результате обработки снимков на универсальных приборах изготовляют планы, фотопланы или карты заснятого объекта. Реже универсальные приборы используются только для определения пространственных координат необходимого числа точек на его поверхности.

Получение любой разновидности результатов обязательно сопровождается построением на приборе модели фотографируемого объекта, которая в дальнейшем подвергается измерениям. При этом используются признаки и условия, выведенные для решения этой задачи аналитическим способом (см. гл. 16).

Модель в универсальном приборе можно построить или путем взаимного ориентирования пары снимков или путем внешнего ориентирования каждого снимка.

Рассмотрим способы построения модели, основанные на взаимном ориентировании снимков. Наиболее наглядно процесс построения модели прослеживается на приборах с подобными связками проектирующих лучей, поэтому с них удобно начать изучение материала.

1. Взаимное ориентирование снимков на универсальных приборах с подобными связками проектирующих лучей сводится к перемещению снимков рабочими движениями прибора до тех пор, пока не будет достигнуто пересечение всех одноименных лучей.

Если пара снимков взаимно ориентирована, то согласно формуле (16.8) для любого пересечения в базисной системе координат или в системе координат левого снимка можно записать равенство

$$y_1^0 - y_2^0 = 0, \tag{а}$$

или

$$Y_1 - Y_2 = 0, \tag{б}$$

где Y_1 и Y_2 — ординаты точки пересечения в пространстве модели, полученные по левому и правому изображениям, y_1^0 и y_2^0 — ординаты пересечений одноименными лучами плоскости P_t «идеального» в системе взаимного ориентирования расположения снимков (см., например, плоскость P_2^0 на рис. 201).

Другими словами, при рассматривании модели, построенной на приборе, или изображения в плоскости P_t должны отсутствовать поперечные параллаксы.

Перед началом ориентирования взаимное расположение снимков всегда иное, чем это было в момент фотографирования.

При наблюдении неориентированных снимков в плоскости P_t возникнут поперечные параллаксы

$$q = y_1 - y_2, \tag{в}$$

которые, в свою очередь, вызовут поперечные параллаксы в масштабе модели Q, равные

$$Q = Y_1 - Y_2 = q\frac{Z}{f}. \tag{г}$$

Таким образом, отсутствие поперечных параллаксов q или Q является объективным критерием правильности взаимного ориентирования снимков на универсальных приборах строгой связки.

Решение задачи взаимного ориентирования на них сводится к последовательным перемещениям снимков рабочими движениями прибора до тех пор, пока поперечные параллаксы исчезнут. Значения элементов взаимного ориентирования можно прочитать по соответствующим шкалам прибора.

Чтобы процесс взаимного ориентирования осуществлялся быстро, выбирается минимальное число стандартно расположенных по площади стереопары точек, на которых вертикальные параллаксы устраняются в определенной последовательности.

Известно, что поперечные параллаксы являются следствием нескольких элементов взаимного ориентирования, а влияние их в различных зонах стереопары неодинаково. Поэтому расположение точек желательно выбирать так, чтобы на каждой из них максимально проявлялось влияние того элемента, изменением которого устраняется поперечный параллакс. Порядок устранения поперечных параллаксов должен быть таким, чтобы по возможности обеспечить неизменность предыдущих установок элементов ориентирования.

Для более детального обоснования порядка взаимного ориентирования плановых аэроснимков используем формулы связи поперечного параллакса и элементов взаимного ориентирования, известные из гл. 16. Так как снимки плановые, для последующего анализа достаточно в формулах ограничиться членами первого порядка малости, а именно:

$$\left.\begin{aligned} q &= \frac{x_1 y_1}{f}\,a'_1 - \frac{x_2 y_2}{f}\,a'_2 - \left(f + \frac{y_2^2}{f}\right)\omega'_2 + x_1 \varkappa'_1 - x_2 \varkappa'_2 \\ Q &= \frac{X_1 Y_1}{Z}\,a'_1 - \frac{X_2 Y_2}{Z}\,a'_2 - \left(Z + \frac{Y_2^2}{Z}\right)\omega'_2 + X_1 \varkappa'_1 - X_2 \varkappa'_2 \end{aligned}\right\} \qquad (19.1)$$

для базисной системы координат и

$$\left.\begin{aligned} q &= \frac{x_2 y_2}{f}\,\Delta a + \left(f + \frac{y_2}{f}\right)\Delta\omega + x_2 \Delta\varkappa + \frac{y_2}{f}\,b'_{z_2} + b'_{y_2} \\ Q &= \frac{X_2 Y_2}{Z}\,\Delta a + \left(Z + \frac{Y_2^2}{Z}\right)\Delta\omega + X_2 \Delta\varkappa + \frac{Y_2}{Z}\,b'_{Z_2} + b'_{Y_2} \end{aligned}\right\} \qquad (19.2)$$

для системы координат исходного снимка.

Формулы (19.1) и (19.2) позволяют составить представление о распределении по площади стереопары поперечных параллаксов, вызванных каждым элементом ориентирования в отдельности. Для большей наглядности эти распределения можно представить в виде диаграмм, приведенных на рис. 235.

Здесь показано размещение следов базисных плоскостей на паре снимков, полученных в разных условиях. Когда элементы взаимного ориентирования равны нулю (позиции P_1 и P_2), следы всех базисных плоскостей на снимках параллельны, а промежутки между следами одноименных плоскостей на правом и левом снимках стереопары одинаковы.

Наличие того или иного элемента ориентирования приведет к поворотам и смещениям следов относительно идеального их расположения, как это показано на рисунке другими позициями снимков P_1 и P_2. При совмещении таких снимков с идеальными будут наблюдаться поперечные параллаксы, выделенные на рисунке в зонах перекрытия снимков. Диаграммами охвачены все возможные положения снимков в системах координат взаимного ориентирования: базисной I и исходного снимка II.

На основании диаграмм и формул можно отметить в перекрывающейся части снимков зоны максимального влияния отдельных элементов взаимного ориентирования (рис. 236, *а*).

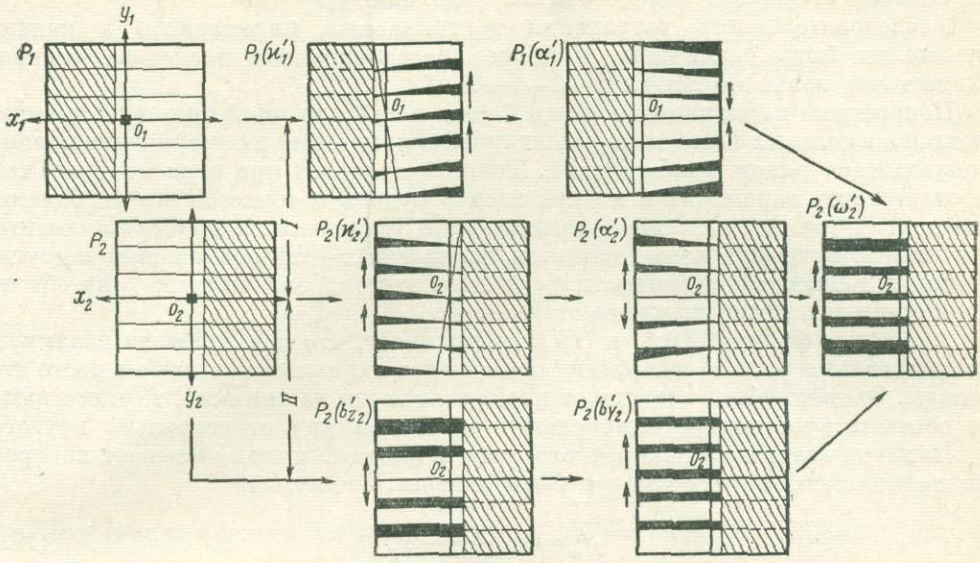


Рис. 235

Так, относительное смещение снимков b'_Y появляется одинаково по всей площади стереопары, влияние элементов ω' и b'_Z максимально в верхней и нижней частях стереопары, α'_1 и α'_2 по углам, а γ'_1 и $\varkappa'_2$ по боковым сторонам снимков, к которым они принадлежат.

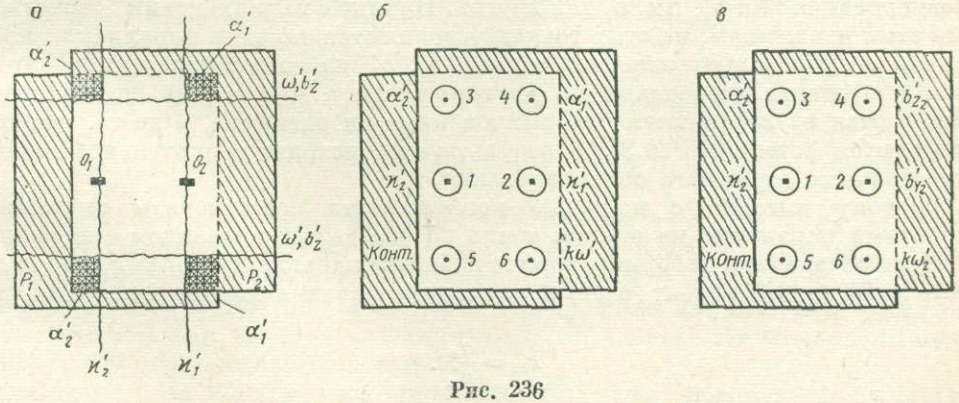


Рис. 236

Точки для устранения поперечных параллаксов выбираются в пределах довольно обширных зон и обычно не запоминаются. Таких точек должно быть пять — по числу неизвестных. Их нумерацию принято на производстве сохранять постоянной. Иногда номером точки отражают последовательность устранения на них поперечных параллаксов.

На рис. 236 показано расположение зон на стереопаре, в которых поперечные параллаксы устраняются движениями прибора, соответствующими элементами взаимного ориентирования в базисной системе координат (рис. 236, *б*), или система координат левого снимка (рис. 236, *в*).

Последовательность устранения вертикальных параллаксов в каждой зоне может быть различной. Наиболее распространена последовательность обхода точек зоны в порядке *2—1—4—6—3*.

Поперечные параллаксы в каждой зоне в той или иной степени отражают влияние нескольких элементов ориентирования, поэтому их устранение должно производиться рядом приближений. Точка *5* является при этом контрольной. По отсутствию параллаксов на ней можно судить о точности их устранения и на других точках, а также о правильности установки на приборе элементов внутреннего ориентирования снимков, искажениях фотоизображений и других причинах. Если нет поперечных параллаксов на контрольной точке, они обычно отсутствуют и по всей площади стереопары.

2. Анализ формул (19.1) и (19.2) показывает, что два элемента взаимного ориентирования ω' и b'_y вызывают поперечные параллаксы в любом месте стереопары. Элемент b'_y не зависит от координат точек на снимках, т. е. его влияние соответствует поперечному сдвигу одного снимка относительно другого.

Наличие взаимного поперечного угла наклона снимков вызывает поперечные параллаксы, которые могут быть описаны формулой

$$q_\omega = f\omega' + \frac{y_2}{f}\omega', \tag{19.3}$$

где $f\omega'$ — постоянно для любой точки стереопары и равносильно действию элемента b'_y.

Указанное обстоятельство для b'_y не приводит к осложнениям при ориентировании снимков, так как влияние b'_y учитывается ранее других элементов.

Движением ω' устраняются поперечные параллаксы лишь на точке *6*. До этого используют на точках *2*, *1*, *4* движения $\varkappa'_1$, $\varkappa'_2$, α'_1 для одной системы ориентирования или b'_y, $\Delta\varkappa$, b_z для другой. Наряду с параллаксами, свойственными этим движениям, на этих точках устраняются также и параллаксы из-за наличия ω'. Поскольку элементы $\varkappa'_1$, α'_1, b'_y, b'_z изменяют поперечные параллаксы в пределах стереопары по другому закону, чем ω', на шестой точке наблюдаются и устраняются деформированные их значения, а не те, которые описываются формулой (19.3). В результате происходит значительное затягивание процесса взаимного ориентирования.

Поэтому выгодно с помощью коэффициента восстановить «истинный» поперечный параллакс на шестой точке по его деформированному значению.

Если обозначить деформированное значение параллакса через q'_ω, то вспомогательный коэффициент взаимного ориентирования можно записать так:

$$k_\omega = \frac{q_\omega}{q'_\omega}. \tag{19.4}$$

Чтобы найти q'_ω в зависимости от наличия элементов ориентирования и координат точек на снимках, проследим за изменением значения общего параллакса q [см. формулу (19.1)] в процессе взаимного ориентирования снимков.

Так как действия $\varkappa'_1$, b'_{y_2} и α'_1, b'_{z_2} на точках *2*, *4*, *6* одинаковы, достаточно проследить изменение q от движений $\varkappa'_1$, $\varkappa'_2$, α'_1, ω'_2, т. е. для одной из систем ориентирования.

Предполагая, что точки для устранения поперечных параллаксов расположены строго стандартно, можно составить табл. 10, в которой представлены эти изменения.

Таблица 10

Исходные q	Измененные q движениями		
	$\varkappa_1'$ на точке 2	$\varkappa_1'$ на точке 1	α_1' на точке 4
$q_2 = x_1\varkappa_1' - f\omega_2'$	0	0	0
$q_1 = x_2\varkappa_2' - f\omega_2'$	$x_2\varkappa_2' - f\omega_2'$	0	0
$q_4 = \frac{x_1y_1}{f}\alpha_1' + x_1\varkappa_1' - \left(f + \frac{y_2^2}{f}\right)\omega_2'$	$\frac{x_1y_1}{f}\alpha_1' - \frac{y_2^2}{f}\omega_2'$	$\frac{x_1y_1}{f}\alpha_1' - \frac{y_2^2}{f}\omega_2'$	0
$q_6 = \frac{-x_1y_1}{f}\alpha_1' + x_1\varkappa_1' - \left(f + \frac{y_2^2}{f}\right)\omega_2'$	$-\frac{x_1y_1}{f}\alpha_1' - \frac{y_2^2}{f}\omega_2'$	$-\frac{x_1y_1}{f}\alpha_1' - \frac{y_2^2}{f}\omega_2'$	$-2\frac{y_2^2}{f}\omega_2'$

Подставляя в формулу (19.4) $q_\omega = (f + y_2^2/f)\,\omega_2'$ и $q_\omega' = -2y_2^2\omega_2'/f$, получим

$$k_\omega = \frac{f^2+y^2}{2y^2}, \tag{19.5}$$

который практически постоянен для материала одной и той же съемочной камеры. Например, для $y = 70$ и f равного 70, 100, 200 мм, k равно 1; 1,5; 4,5. Наблюдаемый поперечный параллакс по снимкам с $f = 70$ мм следует движением ω_2' просто уничтожить; по снимкам с $f = 100$ мм — уничтожив, воспроизвести с другим знаком параллакс, равный половине исходного; по снимкам с $f = 200$ мм — уничтожив, воспроизвести с другим знаком параллакс, равный 3,5-кратному исходному. И так в каждом приеме.

3. В заключение остановимся на особенностях взаимного ориентирования на приборах переобразованной связки проектирующих лучей — стереографе и стереопроекторе. Особенности вытекают из теоретических принципов решения фотограмметрической засечки в приборах, а также от их конструктивной реализации (см. гл. 18).

Напомним, что в этих приборах координаты точек на снимках вначале приводят к горизонтальному их расположению в заданной системе координат. Затем создают модель заснятого объекта. При этом снимки всегда располагают в одной плоскости. Поэтому взаимное ориентирование на таких приборах нельзя рассматривать как воспроизведение их относительного положения, существовавшего в момент фотографирования.

Однако хотя понятие «взаимное ориентирование снимков» на стереографе и стереопроекторе иное, чем на приборах подобной связки, решение задачи сводится к определению одних и тех же элементов.

В самом деле, приведение координат точек снимков к горизонтальному случаю съемки коррекционными устройствами приборов сопровождается определением угловых элементов взаимного ориентирования снимков, что равносильно восстановлению их относительного расположения в пространстве.

Нахождение же в пространстве прибора расположения трансформированных изображений для построения модели принципиально не отличается от такового на приборах подобной связки.

Стереограф и стереопроектор приспособлены для наблюдения непосредственно снимков. Поэтому для записи уравнений взаимного ориентирования воспользуемся равенствами (19.1) и (19.2), которые перепишем так:

$$\left.\begin{aligned} q &= \left[\frac{x_1 y_1}{f}\alpha'_1 - \frac{x_2 y_2}{f}\alpha'_2 - \frac{y_2^2}{f}\omega'_2\right] + x_1\varkappa'_1 - x_2\varkappa'_2 - f\omega'_2 \\ -q &= \left[\frac{x_2 y_2}{f}\Delta\alpha + \frac{y_2^2}{f}\Delta\omega\right] + x_2\Delta\varkappa + b'_{y_2} + \frac{y_2}{f}b'_{z_2} + f\Delta\omega \end{aligned}\right\}. \qquad (19.6)$$

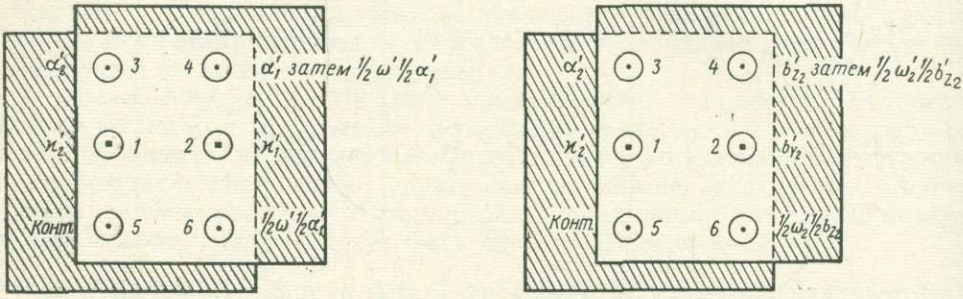


Рис. 237

Здесь члены в квадратных скобках приближенно описывают приведение ординат точек снимков к горизонтальному случаю съемки, а остальные — относительное расположение трансформированных изображений.

Коррекционные устройства производят трансформирование координат точек каждого снимка за углы наклона без учета постоянных сдвигов $f\alpha'$ и $f\omega'$, которые в процессе работы на приборах учитываются дополнительными действиями — децентрациями снимков и коррекционных механизмов. Эти особенности вызывают некоторое изменение порядка взаимного ориентирования снимков на стереографе и стереопроекторе.

Если на этих приборах производить устранение поперечных параллаксов в последовательности, показанной на рис. 236, то на шестой точке возникает параллакс $q_6 \approx -2\frac{y^2}{f}\omega'_2$ (см. табл. 10). Его значение в два раза больше того которое должно быть устранено коррекционным устройством [см. в квадратных скобках формул (19.6)]. Поэтому следует движением ω' устранять половину наблюдаемого параллакса, т. е. $k\omega = 0{,}5 = \text{const}$. Другая половина устраняется движением α'_1.

Оптимальные схемы взаимного ориентирования на стереографе и стереопроекторе показаны на рис. 237. На приборах того же типа с автоматическим введением децентраций порядок устранения вертикальных параллаксов совершенно одинаков с приборами подобной связки проектирующих лучей.

Анализу ориентирования снимков с преобразованными связками посвящены § 138—141.

§ 136. ВНЕШНЕЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Внешнее ориентирование модели, созданной в результате взаимного ориентирования, выполняется на универсальных стереоприборах в два этапа. Вначале модель приводится к заданному масштабу, а затем производится ее поворот (*горизонтирование относительно системы координат прибора*). Осуществляется также переход к началу счета в этой системе координат.

В зависимости от условий съемки, возможностей приборов и других причин внешнее ориентирование выполняют одним из трех способов: аналитическим, графоаналитическим, последовательных приближений.

Известно, что внешнее ориентирование возможно при наличии опорных точек. Требование к числу опорных точек такое же, что и для решения этой задачи в аналитической форме (см. гл. 17), т. е. их должно быть не менее трех. Стремятся расположить точки по углам стереопары, что облегчает решение *внешнего ориентирования последовательными приближениями*.

Внешнее ориентирование снимков на приборах подобной и преобразованной связок несколько различается только на этапе горизонтирования модели. Масштабирование проводится на всех приборах одинаково.

1. Масштабирование модели аналитическим способом сводится к определению коэффициента, с помощью которого устанавливается заданное значение масштаба модели. Для этого достаточно сравнить длины отрезков между опорными точками, вычисленные по «истинным» координатам в заданном масштабе, и по координатам, измеренным на приборе, т. е. решить зависимость

$$k_t = \frac{l}{l'} = \frac{(\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2)^{1/2}}{t\,(\Delta X_1^2 + \Delta Y_1^2 + \Delta Z_1^2)^{1/2}}, \tag{19.7}$$

где ΔX, ΔY, ΔZ — приращения координат опорных точек во внешней системе координат (геодезической), ΔX_1, ΔY_1, ΔZ_1 — приращения координат, измеренные на приборе, t — знаменатель заданного масштаба.

Так как соотношение длин отрезков модели равно соотношению базисов проектирования, вычисление установочных значений базисов проектирования производят по формулам

$$b = b'k_t; \quad b_X = b'_X k_t; \quad b_Y = b'_Y k_t; \quad b_Z = b'_Z k_t. \tag{19.8}$$

Аналитический способ масштабирования более строгий среди других способов.

Масштабирование модели, построенной на приборе по плановым снимкам, чаще производят графоаналитическим способом, который обладает большей наглядностью, хотя при этом нарушается строгость решения.

При масштабировании графоаналитическим способом масштабный коэффициент k получают путем сравнения расстояний между проекциями опорных точек в плоскости XY двух систем координат — внешнего и взаимного ориентирования снимков.

Для этого подготавливают планшет, на который в заданном масштабе наносят опорные точки (например *1—2* на рис. 238). Опознав эти точки на снимках, визируют сначала на точку 1′ модели и совмещают острие карандашного устройства с *однозначной ей точкой 1 планшета, а затем* — на точку *2′* модели. Отмечают на планшете точку *2′* на линии *1—2*, повернув планшет вокруг точки *1*. Несовпадение *2′* с однозначной точкой *2* на планшете

устраняют введением поправок в базисные компоненты b'_X, b'_Y, b'_Z. Поправки вычисляются по формулам

$$\Delta b_X = \frac{\Delta l}{l'} b'_X; \quad \Delta b_Y = \frac{\Delta l}{l'} b'_Y; \quad \Delta b_Z = \frac{\Delta l}{l'} b'_Z, \tag{19.9}$$

где $\Delta l = l - l'$.

Формулы (19.9) получаются как производные пропорции из соотношений (19.8).

Масштабирование графоаналитическим методом можно выполнить с использованием формул (19.9) и без совмещения точек на планшете с одноименными точками, полученными при визировании. Совмещение точек удобно, когда их больше двух, так как сразу видны расхождения на всех точках.

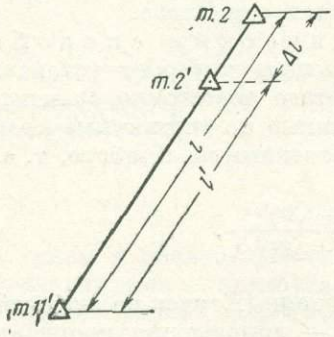


Рис. 238

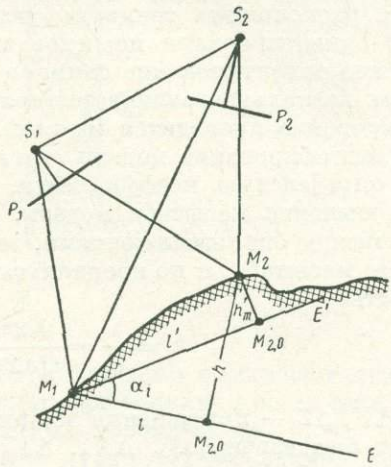


Рис. 239

Масштабирование последовательными приближениями — это частный случай графоаналитического способа, когда поправки Δb_X, Δb_Y, Δb_Z вводятся без предварительного их подсчета на основе опыта исполнителя.

Строго говоря, графоаналитический способ масштабирования в принципе возможен только тогда, когда решение ведется последовательными приближениями.

Масштабирование выполняется раньше поворота модели и поэтому отрезки l и l', участвующие в вычислениях исправленных базисов проектирования, не будут соответственными.

На рис. 239 показан случай, когда точки модели M_1 и M_2 проектируются на разные плоскости E и E', расположенные под углом α_i.

Проекции одного и того же отрезка M_1M_2 в этих плоскостях (l и l') будут разной длины. По смыслу же масштабирования изменением базиса проектирования они будут приравнены, в результате чего масштаб модели будет установлен неверно.

Можно вывести соотношение изменения масштаба в зависимости от условий проектирования отрезков модели на приборе. Известно, что $1 : t = b : B$.

Дифференцируя, получим $dt = -t^2 \frac{db}{B}$ или, считая, что $db = b' \frac{dl'}{l'}$ [см. формулу (19.8)], имеем:

$$dt = -\frac{\Delta l}{l} t \approx -\frac{\Delta L}{l}, \tag{19.10}$$

где Δl и ΔL — расхождение длин отрезков в плоскостях E и E' в масштабе снимка или в натуре, l — расстояние между точками на снимках.

В свою очередь, из чертежа (см. рис. 239) следует, что

$$l = l' \cos \alpha_l - h'_m \sin \alpha_l,$$

или, заменяя $L = lt$, получим

$$L = L' \cos \alpha_l - h' \sin \alpha_l. \tag{19.11}$$

Для плановых снимков, считая $\alpha_l \leqslant 2°$, разность отрезков равна

$$\Delta L = -h' \sin \alpha_l, \tag{19.12}$$

т. е. ошибка масштабирования в основном зависит от рельефа сфотографированной поверхности. Например, для $h' = 300$ м $\alpha_l = 2°$, $l = 100$ мм, $dt = 100$.

Ошибки масштаба модели, в свою очередь, вызовут погрешности решения задачи горизонтирования. Поэтому при обработке снимков значительного рельефа приходится производить масштабирование и поворот модели в несколько приближений или использовать аналитический способ.

2. Как уже упоминалось, в процессе поворота модели устанавливаются шесть элементов внешнего ориентирования. Основное затруднение при выполнении процесса вызывает определение двух из них — продольного ξ и поперечного η углов наклона модели относительно плоскости XY внешней (геодезической) системы координат.

Учет элемента ϑ производится путем совмещения положения опорных точек на планшете с их проекциями на приборе.

Переход к новому началу счета координат осуществляется установкой по счетчикам приборов координат одной из опорных точек. В момент установки измерительная марка должна быть совмещена с соответствующей точкой модели.

Поэтому процесс поворота модели часто называют ее горизонтированием.

Горизонтирование модели на универсальных приборах может быть произведено двумя путями.

П е р в ы м, называемым по установочным элементам *, определяют цифровые значения элементов ориентирования модели, которые в дальнейшем устанавливают на приборе.

В т о р ы м — последовательных приближений — заключающимся в последовательном изменении установок элементов на приборе до тех пор, пока измеренные координаты не совпадут с их истинными значениями.

Определение установочных элементов осуществляется аналитическим или графоаналитическим способом. Установочные элементы могут быть также известны заранее из результатов пространственного фототриангулирования.

Определение установочных элементов ориентирования модели аналитическим способом сводится к решению системы известных (см. гл. 17) уравнений,

---

* Горизонтирование по установочным элементам также может производиться в несколько последовательных этапов, но их значительно меньше.

связывающих эти элементы и координаты опорных точек в двух системах координат, например

$$Z_r = X \sin \xi + Y \cos \xi \sin \eta + (Z_r + \delta Z) \cos \xi \cos \eta, \qquad (д)$$

где δZ — расхождения высот опорных точек.

Аналитический способ из-за громоздкости вычислений употребляется редко.

Фирмой Цейсса создана специальная вычислительная машина «Координиметр», которая обслуживает многие процессы обработки снимков на универсальных приборах и наряду с другими задачами решает уравнения горизонтирования.

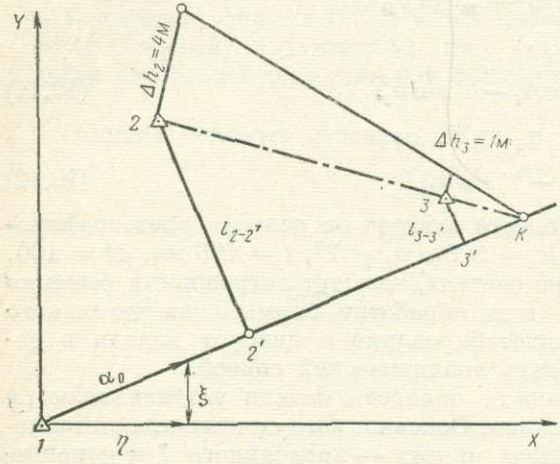


Рис. 240

Вычисления элементов горизонтирования упрощаются, если использовать графоаналитическое решение.

Допустим, что стереопара обеспечена тремя опорными точками *1*, *2* и *3* с известными высотами, расположенными произвольно, но только не на одной прямой (рис. 240).

При визировании на одну из точек (например, *1*) установим по счетчику высот ее отметку. Если модель наклонена, получим расхождения Δh_2 и Δh_3 на двух других точках ($\Delta h_2 = +4$ м, $\Delta h_3 = +1$ м).

По этим расхождениям на планшете с нанесенными в заданном масштабе опорными точками можно провести линию пересечения плоскостей XY модели и внешней системы координат. Эта линия пройдет через точку *1* ($\Delta h_1 = 0$). Вторую точку этой линии K можно найти по соотношению Δh_2 и Δh_3. Решая треугольники, показанные на рисунке, имеем:

$$l_{2-K} = \frac{\Delta h_2}{\Delta h_3 - \Delta h_2} l_{2-3}, \quad l_{3-K} = \frac{\Delta h_3}{\Delta h_3 - \Delta h_2} l_{2-3}, \qquad (19.13)$$

где l_{2-K} и l_{3-K} — расстояния от точек *2* и *3* до точки K.

Измерив по чертежу отрезки $l_{2-2'}$ и $l_{3-3'}$, найдем α_0

$$\operatorname{tg} \alpha_0' = \frac{\Delta h_2}{l_{2-2'} t}; \quad \operatorname{tg} \alpha_0'' = \frac{\Delta h_3}{l_{3-3'} t} \quad \text{и} \quad \alpha_0 = \frac{\alpha_0' + \alpha_0''}{2}, \qquad (19.14)$$

где t — масштаб построений.

Затем, отметив на чертеже направление координатных осей X и Y прибора, построением диаграммы разложения абсолютного угла α_0 на два его составляющих получают искомые элементы η и ξ.

Графоаналитический способ определения элементов ориентирования выгодно использовать, когда опорные точки расположены произвольно по площади стереопары и когда конструктивные оси поворота модели на приборе не совпадают с координатными осями системы, принятой для внешнего ориентирования (например, в стереопланиграфе).

В приборах подобной связки проектирующих лучей полученные элементы непосредственно устанавливаются по шкалам поворота снимков. Для приборов преобразованной связки по этим элементам находят установки коррекционных устройств. Дополнительно на этих приборах вводятся децентрации снимков и коррекционных механизмов. Необходимо повернуть и базис проектирования. С этой целью рассчитываются или преобразованные значения базисных компонентов b_X^0, b_Y^0, b_Z^0, когда углы наклона модели значительны, или поправки к ним при малых углах.

Преобразованные значения вычисляются по формулам

$$\left.\begin{aligned} b_X^0 &= \cos\xi b_X - \sin\xi \sin\eta b_Y - \sin\xi\cos\eta b_Z \\ b_Y^0 &= \cos\eta b_Y - \sin\eta b_Z \\ b_Z^0 &= \sin\xi b_X + \cos\xi\sin\eta b_Y + \cos\xi\cos\eta b_Z \end{aligned}\right\}. \qquad (19.15)$$

Откуда следуют выражения для подсчета поправок

$$\left.\begin{aligned} \Delta b_X^0 &= -\xi b_Z \\ \Delta b_Y^0 &= -\eta b_Z \\ \Delta b_Z^0 &= \xi b_X + \eta b_Y \end{aligned}\right\}. \qquad (19.16)$$

При повороте только одних снимков разрушается модель, построенная в результате взаимного ориентирования, что можно заметить по появлению поперечных параллаксов, которые соответствуют Δb_Y^0 и Δb_Z^0. Этим пользуются для разворота базиса, не прибегая к вычислениям Δb_X^0, Δb_Y^0, Δb_Z^0. Достаточно на линии *1—2* (см. рис. 237) устранить наблюдаемый поперечный параллакс движением Δb_Y^0, а на краю стереопары — Δb_Z^0. Следует также проверить сохранность масштаба модели, что соответствует введению поправки Δb_X^0.

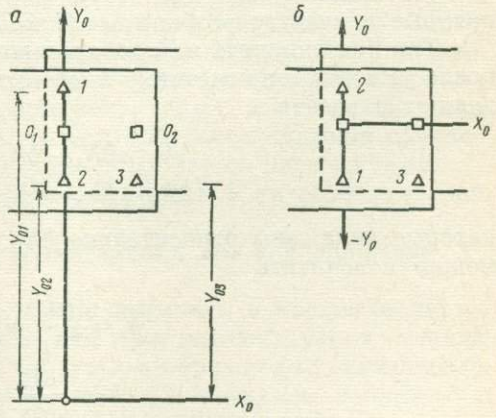


Рис. 241

Горизонтирование модели методом последовательных приближений может быть эффективно использовано, если две из опорных точек расположены на линии, примерно параллельной оси X или Y прибора. Становится возможным устранять расхождения высот опорных точек непосредственно угловыми движениями прибора, не прибегая к сложным вычислениям и графическим построениям.

Пусть опорные точки расположены по углам стереопары (рис. 241). Запишем для этих точек систему уравнений внешнего ориентирования

$$\delta h_i = Z_{\text{т}\,i} - Z_i = X_i\xi + Y_i\eta. \qquad (19.17)$$

Зависимости (19.17) получаются упрощением строгих уравнений (д). Здесь под X_i и Y_i понимаются отстояния точек от соответствующих координатных осей выбранной для внешнего ориентирования пространственной системы координат.

На приборе характер изменения высот отдельных точек модели при ее наклоне зависит от их расположения относительно конструктивных осей поворота модели, с которыми должны быть отождествлены координатные оси пространственной системы координат.

Для поворота модели необходимо установить соотношение изменения превышений от наклона модели и расположения точек относительно конструктивных осей прибора. Важно установить такую связь только для наклона снимков. Поворот базиса проектирования осуществляется на всех приборах одинаково по данным наклона снимков или путем устранения вертикальных параллаксов.

На стереографе и стереопроекторе повороту модели соответствует синхронное трансформирование координат точек двух снимков стереопары. Трансформирование может быть описано теми же формулами, что и поворот модели на приборах подобной связки, так как $\delta h = \frac{H}{b}\delta p$, а δp — изменение разности продольных параллаксов при трансформировании. Рассмотрим несколько примеров.

Пусть три опорные точки расположены по углам стереопары, а оси поворота модели — так, как показано на рис. 241, *а*. (Такое расположение осей у стереопланиграфа.) Тогда искажения высот будут

$$\left.\begin{aligned} \delta h_1 &= X_{01}\xi + Y_{01}\eta \\ \delta h_2 &= X_{01}\xi + Y_{02}\eta, \quad \text{так как} \quad X_{01} = X_{02} \\ \delta h_3 &= X_{03}\xi + Y_{01}\eta, \quad \text{так как} \quad Y_{01} = Y_{03} \end{aligned}\right\}, \tag{19.18}$$

которые и следует устранить наклонами модели ξ и η.

Так как измерить на приборах величины δh_i непосредственно невозможно, после установки по счетчику высот отметки исходной точки, например *1*, определяют разности

$$\left.\begin{aligned} \Delta h_2 &= \delta h_2 - \delta h_1 = (Y_{02} - Y_{01})\,\eta \\ \Delta h_3 &= \delta h_3 - \delta h_1 = (X_{03} - X_{01})\,\xi \end{aligned}\right\}, \tag{19.19}$$

которые искажены относительно δh_2 и δh_3 в k_2 и k_3 раз. Величины k_2 и k_3 можно подсчитать

$$k_2 = \frac{\delta h_2}{\Delta h_2} = \frac{Y_{01}}{Y_{02} - Y_{01}}, \tag{19.20}$$

$$k_3 = \frac{\delta h_3}{\Delta h_3} = \frac{X_{03}}{X_{03} - X_{01}}. \tag{19.21}$$

На рис. 241, *а* $k_3 = 1$, т. е. обнаруженные расхождения высот на точке *3* можно полностью устранить движением ξ прибора, а на точке *2* — с учетом коэффициента $k_2 \neq 1$.

Пусть теперь при том же расположении опорных точек оси поворота модели расположены так, как изображено на рис. 241, *б* (стереограф, стереопроектор). Тогда

$$k_2 = 0{,}5, \tag{19.22}$$

$$k_3 = 1, \tag{19.23}$$

т. е. обнаруженные расхождения высот второй точки устраняют только наполовину поворотом модели в поперечном направлении, а на третьей полностью поворотом модели в продольном направлении.

Если, наконец, расположить исходную точку 1 вблизи главной точки одного из снимков o_1, то получим

$$k_2 = 1, \tag{19.24}$$

$$k_3 = 1, \tag{19.25}$$

но возможны и другие варианты.

Так как опорные точки практически никогда не расположены строго стандартно и формулы (19.17) приближенные, горизонтирование модели ведется последовательными приближениями. При работе на стереографе и стереопроекторе после наклона модели угловыми движениями вводятся децентрации.

§ 137. СОСТАВЛЕНИЕ ОРИГИНАЛА КАРТЫ

Созданную на приборе в результате взаимного и внешнего ориентирования снимков модель в дальнейшем измеряют с целью составления оригинала карты.

Вначале рекомендуется произвести набор нужного числа пикетных точек, высоты которых обычно подписываются на карте. В качестве пикетных выбираются хорошо опознаваемые и удобные для стереоизмерений точки. Положение этих точек отмечается на планшете, а высоты дополнительно записываются в журнал обработки.

В дальнейшем производят отображение рельефа и контуров заснятой местности. Рельеф изображается горизонталями.

Для проведения горизонтали по счетчику высот прибора устанавливается ее отметка. Наблюдая стереоскопически, трассируют измерительную марку по поверхности модели, действуя только штурвалами X и Y прибора. Рекомендуется перед рисовкой горизонталей нанести гидрографическую сеть и скелетную схему крупных форм рельефа (водоразделы, тальвеги и т. д.). Большая часть контуров наносится после рисовки рельефа. При обработке снимков плоскоравнинных районов вместо трассирования марки допускается рисовка горизонталей по отметкам пикетных точек, подобно мензульной и тахеометрической съемкам.

При нанесении контурной нагрузки используются все три движения X, Y и Z прибора.

Обводят границы контуров, которые можно выразить в масштабе карты (леса, озера и т. д.), наносят осевые линии для протяженных узких деталей (ручьи, дороги и т. д.), отмечают точками контуры, отображаемые внемасштабными условными знаками (колодцы, родники и т. д.), сразу же закрепляют контуры условными знаками по правилам полевого вычерчивания.

Приведенная схема составления оригинала карты справедлива, когда он представляется в виде чертежа на бумаге. Для повышения эффективности работ в последнее время широко используется методика отображения рельефа и контуров на пластиках, покрытых гравировальным слоем. Если рисунок на карте несложен, вычерчивание производят непосредственно гравировальной иглой. В противном случае его наносят вначале карандашом, как обычно, а затем производят гравировку рисунка особым гравировальным инструментом. Горизонтали, гидрография и другие контуры, которые печатают на картах разным цветом, вычерчивают на разных листах пластика, что значительно повышает эффективность работ по изготовлению издательского оригинала карты.

Целям повышения эффективности обработки снимков на универсальных приборах служит также методика отображения рельефа горизонталями на

фотопланах или ортофотопланах. Иногда фотопланы используют в качестве дополнительной информации к карте с большой контурной нагрузкой (населенные пункты).

§ 138. ПОСТРОЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАННОЙ МОДЕЛИ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ СНИМКАМ

Построить модель по преобразованным связкам можно очень просто, если снимки горизонтальные.

Пусть P_1 и P_2 — пара горизонтальных снимков, полученных с одной и той же высоты (рис. 242). S_1 и S_2 — центры проекции, f — фокусное расстояние снимков.

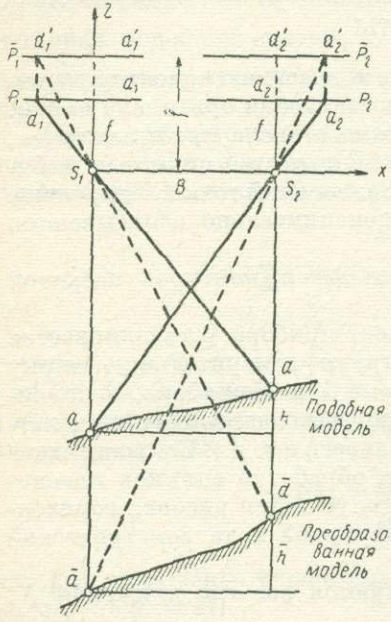


Рис. 242

Допустим, что снимки взаимно ориентированы и фокусное расстояние проектирующих камер равно f. Тогда любая пара соответственных лучей будет пересекаться и мы получим модель, подобную местности. Точки a и d принадлежат к этой модели.

Теперь изменим фокусное расстояние проектирующих камер, переместив снимки вдоль главных лучей в положение $\overline{P}_1$ и $\overline{P}_2$ ($\overline{f} \neq f$). В результате этого связки будут преобразованы. Однако каждая пара соответственных лучей преобразованных связок будет пересекаться, так как находится в одной базисной плоскости.

Геометрическое место пересечений соответственных лучей преобразованных связок называется *преобразованной моделью*. Точки $\overline{a}$ и $\overline{d}$ принадлежат к этой модели.

Рассмотрим свойства преобразованной модели.

Координаты точки подобной модели найдем по формулам (14.6)

$$X = B\frac{x_1}{p};\quad Y = B\frac{y_1}{p};\quad Z = -B\frac{f}{p}.$$

Координаты соответствующей точки преобразованной модели получим тоже по этим же формулам, подставив в них вместо f преобразованное значение фокусного расстояния камеры $\overline{f}$

$$\overline{X} = B\frac{x_1}{p};\quad \overline{Y} = B\frac{y_1}{p};\quad \overline{Z} = -B\frac{\overline{f}}{p}. \tag{19.26}$$

Сравнивая эти выражения с формулами (14.6), видим, что преобразованная модель деформируется по направлению оси Z: если $\overline{f}/f > 1$, то она вытягивается, если $\overline{f}/f < 1$, то модель сжимается.

Отношение фокусного расстояния проектирующей камеры к фокусному расстоянию снимка называется *коэффициентом преобразования связки*

$$k = \frac{\overline{f}}{f}. \tag{19.27}$$

Пусть пара наклонных снимков установлена в проектирующие камеры, фокусное расстояние которых не равно фокусному расстоянию снимков (рис. 243).

Получим в плоскости экрана E изображения стереопары, соответствующие горизонтальным снимкам. Таким образом, требуется решить задачу трансформирования пары снимков с преобразованными связками.

Как известно из теории трансформирования одиночного снимка, в этом случае должны быть выполнены следующие геометрические условия (рис. 244):

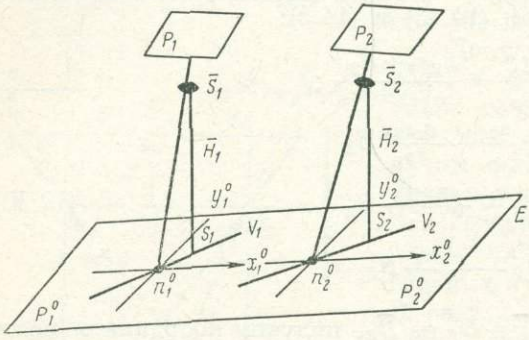


Рис. 243

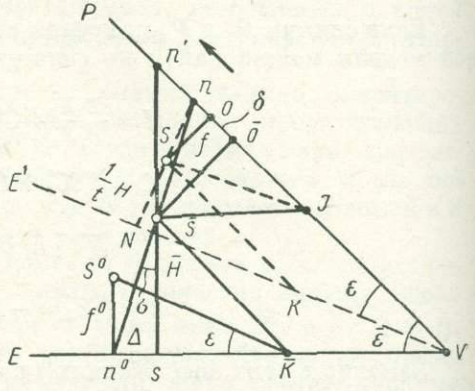


Рис. 244

1) центр проекции $\bar{S}$ преобразованной связки должен находиться на дуге, писанной в плоскости главного вертикала SoI из главной точки схода I радиусом

$$IS = \frac{f}{\sin \alpha_0},$$

где S — центр проекции подобной связки, а α_0 — угол наклона снимка в момент фотографирования;

2) плоскость экрана E должна быть перпендикулярна к плоскости главного вертикала и параллельна прямой $\bar{S}I$, соединяющей главную точку схода с центром проекции преобразованной связки;
при этом

$$SK = \frac{1}{t}\frac{H}{\sin \alpha_0},$$

где H — высота фотографирования, $1 : t$ — масштаб трансформированного изображения.

Величины $IS = I\bar{S}$ и $SK = \overline{SK}$ — инварианты трансформирования.

Из рисунка следует, что в общем случае надирный луч $n\bar{S}$ преобразованной связки не перпендикулярен к плоскости экрана E, а главная точка o снимка не совпадает с главной точкой $\bar{o}$ плоскости прикладной рамки. Проекция s точки $\bar{S}$ на экран не совмещается с точкой n^0, в которой надирный луч $n\bar{S}$ преобразованной связки встречает экран.

Смещение $\delta = o\bar{o}$ главной точки снимка относительно главной точки прикладной рамки проектирующей камеры называется д е ц е н т р а ц и е й с н и м к а, а смещение $\Delta = n^0S$ точки надира трансформированного изображе-

ния относительно проекции точки $\bar{S}$ на экран — *децентрацией трансформированного изображения*.

Величины, определяющие положение двух снимков, при котором в плоскости экрана получаются трансформированные изображения, соответствующие горизонтальным снимкам и ориентированные относительно геодезической системы координат, называются *элементами внешнего ориентирования пары снимков с преобразованными связками*.

В качестве этих величин выберем следующие:

X_0, Y_0 — геодезические координаты левой точки фотографирования;

T_B — дирекционный угол базиса фотографирования;

B_0 — проекция базиса фотографирования на горизонтальную плоскость;

T_1, T_2 — дирекционные углы линий направления съемки;

$\bar{H}_1$, $\bar{H}_2$ — высоты центров проекции $\bar{S}_1$ и $\bar{S}_2$ преобразованных связок над экраном E;

$\bar{\alpha}_{01}$, $\bar{\alpha}_{02}$ — углы наклона проектирующих камер относительно экрана;

$\varkappa_1$, $\varkappa_2$ — углы поворота снимков;

δ_1, δ_2 — децентрации снимков;

Δ_1, Δ_2 — децентрации трансформированных изображений.

Если эти элементы известны, то пару трансформированных изображений можно получить так.

Нанесем на экран (планшет) левую точку фотографирования по ее геодезическим координатам X_0 и Y_0 и проведем из этой точки направление съемки и направление базиса фотографирования по элементам T_1 и T_B. Отложим на направлении базиса его проекцию B_0, получим правую точку фотографирования n_2^0 на планшете. Из нее проведем направление съемки по элементу T_2. От точек n_1^0 и n_2^0 отложим децентрации трансформированных изображений Δ_1 и Δ_2. В результате найдем точки s_1 и s_2, над которыми должны быть центры проекции $\bar{S}_1$ и $\bar{S}_2$. Установим проектирующие камеры по элементам $\bar{H}_1$, $\bar{H}_2$, $\bar{\alpha}_{01}$ и $\bar{\alpha}_{02}$. Наконец, повернем и сместим каждый снимок в плоскости прикладной рамки камеры так, чтобы углы между главными вертикалями и осями y были равны $\varkappa_1$ и $\varkappa_2$, а смещения главных точек снимков относительно главных точек прикладных рамок — децентрациям δ_1 и δ_2.

Из приведенных выше элементов внешнего ориентирования пары снимков с преобразованными связками только элементы $\bar{H}$, $\bar{\alpha}_0$, δ и Δ отличаются от соответствующих элементов внешнего ориентирования снимков с подобными связками.

Найдем $\bar{H}$, $\bar{\alpha}_0$, δ и Δ, полагая, что элементы внешнего ориентирования снимков с подобными связками известны.

Из треугольников $\bar{S}s\bar{K}$ и $\bar{S}oI$ (см. рис. 243) следует

$$\bar{H} = \bar{S}\bar{K}\sin\bar{\alpha}_0; \quad \sin\bar{\alpha}_0 = \frac{\bar{f}}{I\bar{S}}.$$

Учитывая значения $\bar{S}\bar{K}$ и $I\bar{S}$, напишем

$$\bar{H} = \frac{1}{t}\frac{\bar{f}}{f}H, \tag{19.33}$$

$$\sin\bar{\alpha}_0 = \frac{\bar{f}}{f}\sin\alpha_0. \tag{19.34}$$

Пользуясь тем же рисунком, получим

$$\delta = Io - I\bar{o} = IS(\cos\alpha_0 - \cos\bar{\alpha}_0).$$

Так как $\cos^2\alpha_0 = 1 - \sin^2\alpha_0$, то, учитывая равенство (19.34), децентрацию снимка представим так:

$$\delta = \frac{\bar{f}}{\sin\bar{\alpha}_0}\left(\sqrt{1-\left(\frac{f}{\bar{f}}\sin\bar{\alpha}_0\right)^2} - \cos\bar{\alpha}_0\right). \tag{19.35}$$

Аналогично найдем децентрацию трансформированного изображения

$$\Delta = \frac{\bar{H}}{\sin\bar{\alpha}_0}\left(\sqrt{1-\left(\frac{f}{\bar{f}}\sin\bar{\alpha}_0\right)^2} - \cos\bar{\alpha}_0\right). \tag{19.36}$$

Сопоставляя выражения для децентраций Δ и δ, видим, что

$$\Delta = \frac{\bar{H}}{\bar{f}}\delta. \tag{19.37}$$

Восстановим перпендикуляр к экрану в точке n^0 и опишем дугу из точки $\bar{K}$ радиусом $\bar{K}S$. Пересечение дуги с перпендикуляром определяет положение центра проекции S^0 трансформированного изображения. Треугольники $S^0n^0\bar{K}$ и SNK одинаковы, поэтому фокусное расстояние трансформированного изображения

$$f^0 = \frac{1}{t}H = \frac{f}{\bar{f}}\bar{H}. \tag{19.38}$$

Из изложенного выше следует, что при внешнем ориентировании пары снимков с преобразованными связками количество элементов, определяющих положение снимков и связок, возрастает по сравнению с ориентированием подобных связок: появляются новые элементы — децентрации. Однако децентрации являются зависимыми величинами, т. е. функциями независимых элементов $\bar{\alpha}_0$ и $\bar{H}$. Поэтому общее число независимых элементов внешнего ориентирования пары снимков одинаково при обработке как с подобными связками, так и с преобразованными и равно 12.

В частном случае, когда фокусные расстояния проектирующих камер равны фокусному расстоянию снимка ($\bar{f} = f$), децентрации δ и Δ равны нулю, а элементы $\bar{H}$ и $\bar{\alpha}_0$ не отличаются от соответствующих элементов внешнего ориентирования снимков с подобными связками.

Таким образом, ориентирование снимков с подобными связками представляет собой частный случай ориентирования их с преобразованными связками.

Если углы наклона снимков малы, то полученные выше формулы для угла $\bar{\alpha}_0$ и децентраций можно представить в таком виде:

$$\left.\begin{aligned} \bar{\alpha}_0 &= \frac{\bar{f}}{f}\alpha_0 \\ \delta &= \frac{1}{2}\bar{f}\left(1-\frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\alpha}_0 \\ \Delta &= \frac{1}{2}\bar{H}\left(1-\frac{f}{\bar{f}^2}\right)\bar{\alpha}_0 = \frac{\bar{H}}{\bar{f}}\delta \end{aligned}\right\}. \tag{19.39}$$

Для плановых снимков в качестве угловых элементов используют обычно продольный и поперечный угол наклона α и ω и угол поворота $\varkappa$ снимка.

Следовательно, элементами внешнего ориентирования пары плановых снимков с преобразованными связками будут

$$X_0,\ Y_0,\ T_B,\ B_0,\ \overline{H}_1,\ \overline{H}_2,\ \bar{\alpha}_1,\ \bar{\omega}_1,\ \varkappa_1,\ \bar{\alpha}_2,\ \bar{\omega}_2\varkappa_2;$$

$$\delta_{x1},\ \delta_{y1},\ \delta_{x2},\ \delta_{y2},\ \Delta_{x1},\ \Delta_{y1},\ \Delta_{x2},\ \Delta_{y2}.$$

Здесь δ_x и δ_y — продольные и поперечные децентрации снимков, а Δ_x и Δ_y — продольные и поперечные децентрации трансформированных изображений.

Согласно (19.39)

$$\left.\begin{gathered}\bar{\alpha}=\frac{\bar{f}}{f}\alpha;\quad \bar{\omega}=\frac{\bar{f}}{f}\omega\\ \delta_x=\frac{1}{2}\bar{f}\left(1-\frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\alpha};\quad \delta_y=\frac{1}{2}\bar{f}\left(1-\frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\omega}\\ \Delta_x=\frac{\overline{H}}{\bar{f}}\delta_x;\quad \Delta_y=\frac{\overline{H}}{\bar{f}}\delta_y\end{gathered}\right\}. \tag{19.40}$$

Угол отклонения σ (см. рис. 244) надирного луча $n\overline{S}$ преобразованной связки от перпендикуляра к экрану найдем по формуле

$$\operatorname{tg}\sigma=\frac{\Delta}{\overline{H}} \tag{19.41}$$

Для планового снимка получим составляющие угла

$$\sigma_\alpha=\frac{1}{2}\left(1-\frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\alpha};\quad \sigma_\omega=\frac{1}{2}\left(1-\frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\omega}. \tag{19.42}$$

§ 140. ВЗАИМНОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ С ПРЕОБРАЗОВАННЫМИ СВЯЗКАМИ

Пусть плоскость трансформирования параллельна базису фотографирования. В этом случае трансформированные изображения можно получить путем взаимного ориентирования снимков с преобразованными связками, не зная *элементов внешнего ориентирования стереопары. Для этого достаточно* установить снимки так, чтобы в плоскости экрана (см. рис. 243) не было поперечных параллаксов.

Величины, определяющие взаимное положение снимков с преобразованными связками, при котором в плоскости экрана получаются два изображения, не имеющие поперечных параллаксов, называются п р е о б р а з о в а н н ы м и э л е м е н т а м и в з а и м н о г о о р и е н т и р о в а н и я с н и м к о в.

В качестве таких величин возьмем $\bar{\alpha}_1'$, $\varkappa_1'$, $\bar{\alpha}_2'$, $\bar{\omega}_2'$ и $\varkappa_2'$, аналогичные элементам взаимного ориентирования пары снимков с подобными связками (см. рис. 198). При этом будем считать, что плоскость трансформирования перпендикулярна главной базисной плоскости первого снимка ($\bar{\omega}_1' = 0$). К названным элементам необходимо добавить децентрации δ_{x1}, Δ_{x1}, δ_{x2}, Δ_{x2}, δ_{y2} и Δ_{y2} (см. рис. 244).

Итак, взаимное ориентирование пары снимков с преобразованными связками определяется пятью независимыми элементами и шестью зависимыми.

К зависимым элементам относятся децентрации снимков и трансформированных изображений.

Теперь составим уравнение взаимного ориентирования пары снимков с преобразованными связками.

Для этого воспользуемся выражениями (14.13) и (14.20)

$$y_1^0 - y_2^0 = 0;$$

$$y^0 = y + \frac{xy}{f}\alpha + \left(f + \frac{y^2}{f}\right)\omega + x\varkappa + R,$$

где R — сумма поправочных членов второго порядка малости.

Применяя формулу (14.20) для преобразованных связок, необходимо подставить в нее $y^0 - \Delta_y$ вместо y^0, $x - \delta_x$ вместо x, $y - \delta_y$ вместо y и $\bar{f}$, $\bar{\alpha}'$, $\bar{\omega}'$, $\bar{\varkappa}'$ вместо f, α, ω, $\varkappa$. Кроме того, будем считать, что $\bar{H} = \bar{f}$, а в этом случае согласно (19.37) $\Delta_y = \delta_y$. После подстановки получим

$$y^0 = y + \frac{xy}{\bar{f}}\bar{\alpha}' + \left(\bar{f} + \frac{y^2}{\bar{f}}\right)\bar{\omega}' + x\bar{\varkappa}' + R + R', \tag{19.43}$$

где R' — сумма членов второго порядка, зависящих от децентраций,

$$R' = -\frac{x\delta_y + y\delta_x}{\bar{f}}\bar{\alpha}' - 2\frac{y\delta_y}{\bar{f}}\bar{\omega}' - \delta_x\bar{\varkappa}'. \tag{19.44}$$

Следовательно,

$$y_1^0 = y_1 + \frac{x_1y_1}{\bar{f}}\bar{\alpha}_1' + x_1\bar{\varkappa}_1' + R_1 + R_1';$$

$$y_2^0 = y_2 + \frac{x_2y_2}{\bar{f}}\bar{\alpha}_2' + \left(\bar{f} + \frac{y_2^2}{\bar{f}}\right)\bar{\omega}_2' + x_2\bar{\varkappa}_2' + R_2 + R_2'.$$

Подставив эти значения y_1^0 и y_2^0 в выражение (14.13), получим уравнение взаимного ориентирования

$$\frac{x_1y_1}{\bar{f}}\bar{\alpha}_1' - \frac{x_2y_2}{\bar{f}}\bar{\alpha}_2' - \left(\bar{f} + \frac{y_2^2}{\bar{f}}\right)\bar{\omega}_2' + x_1\bar{\varkappa}_1' - x_2\bar{\varkappa}_2' + q + (R_1 - R_2) + (R_1' - R_2') = 0. \tag{19.45}$$

В этом уравнении пять независимых неизвестных. Одна точка стереопары дает одно уравнение. Таким образом, для определения элементов взаимного ориентирования пары снимков с преобразованными связками достаточно выбрать пять должным образом расположенных точек, измерить координаты и поперечные параллаксы этих точек, составить систему уравнений (19.45) и решить эти уравнения.

Уравнения (19.45) содержат вторые степени неизвестных и децентрации, входящие в суммы R и R'. Решить такие уравнения можно путем последовательных приближений. Сначала будем считать, что децентрации и члены второго порядка малости равны нулю. Исходя из этого составим систему уравнений (19.45) и решим ее, в результате чего получим первое приближение неизвестных. Затем подсчитаем по формулам (19.40) децентрации, найдем значения R и R' и вновь составим систему уравнений (19.45), учитывая поправки R и R'. Новое решение этой системы даст второе приближение независимых элементов, по которым найдем второе приближение децентраций. Этот процесс следует про-

должать до тех пор, пока разность между двумя последними приближениями не превысит заданных значений.

Уравнение (19.45) аналогично уравнению (16.26), составленному для подобных связок. Поэтому выводы, полученные в гл. 16 для подобных связок, относятся и к преобразованным связкам. Эти выводы заключаются в следующем.

1. Для определения элементов взаимного ориентирования пары снимков целесообразно пользоваться стандартно расположенными точками *1—6*, отмеченными на рис. 203.

2. Первое приближение элементов взаимного ориентирования пары снимков с преобразованными связками можно найти по формулам (16.41) — (16.44).

Положив $q_1 = q_2 = 0$, получим

$$\left.\begin{aligned} \bar{\alpha}'_1 &= \frac{\bar{f}}{2ab}(q_6 - q_4) \\ \bar{\alpha}'_2 &= \frac{\bar{f}}{2ab}(q_5 - q_3) \\ \bar{\omega}'_2 &= \frac{\bar{f}}{2a^2}(q_3 + q_5) = \frac{\bar{f}}{2a^2}(q_4 + q_6) \\ \bar{\varkappa}'_1 &= \bar{\varkappa}'_2 = \frac{\bar{f}}{b}\bar{\omega}'_2 \end{aligned}\right\}. \qquad (19.46)$$

Сопоставляя выражения (19.46) и с (16.41) — (16.44), находим зависимость между элементами взаимного ориентирования преобразованных и подобных связок

$$\left.\begin{aligned} \bar{\alpha}'_1 &= k\alpha'_1 \\ \bar{\alpha}'_2 &= k\alpha'_2 \\ \bar{\omega}'_2 &= k\omega'_2 \\ \bar{\varkappa}'_1 &= k^2\varkappa'_1 \\ \bar{\varkappa}'_2 &= k^2\varkappa'_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (19.47)$$

где $k = \bar{f} : f$ — коэффициент преобразования связки.

3. Для взаимного ориентирования пары снимков с преобразованными связками в универсальном стереоприборе достаточно устранить поперечные параллаксы на пяти точках в последовательности, указанной на рис. 236. При этом необходимо учитывать децентрации снимков и трансформированных изображений, а измерительную марку перемещать в плоскости трансформирования.

Эту задачу можно решить следующим образом.

Установим снимки в проектирующие камеры так, чтобы главные точки их совпали с главными точками прикладных рамок ($\delta = 0$). Приведем камеры в горизонтальное положение и установим величины b_X, $b_Y = b_Z = 0$, а также $Z = \bar{H} = \text{const}$. Затем устраним поперечные параллаксы, наблюдаемые в плоскости трансформирования, действуя поворотами $\varkappa_2$, $\varkappa_1$, α_2, α_1 и ω_1 в последовательности, указанной на рис. 235. При этом визировать на точки следует движениями X, Y, и b_X, не изменяя отстояния Z. В результате этих действий получим первое приближение взаимного ориентирования снимков с преобразованными связками.

Отсчитаем по шкалам элементы $\bar{\alpha}$ и $\bar{\omega}$ преобразованных связок, вычислим по формулам (19.40) децентрации δ и Δ и введем их в прибор путем смещения

снимка (δ) и изменения установок b_X и b_Y (Δ). После этого вновь устраним поперечные параллаксы на точках *1—5* теми же поворотами проектирующих камер. Если на точке *6* поперечный параллакс не исчезнет, то следует выполнить третье приближение.

В результате этих действий в приборе получим пару трансформированных изображений в плоскости, параллельной базису фотографирования и перпендикулярной главной базисной плоскости первого снимка.

Мы рассмотрели первый способ взаимного ориентирования пары снимков с преобразованными связками. Аналогично можно ориентировать пару снимков с преобразованными связками и вторым способом, т. е. движениями только одной камеры, например правой. В этом случае поперечные параллаксы устраняются движениями b_Y, $\varkappa_2$, b_Z, α_2, ω_2 в последовательности, указанной на рис. 237, а децентрации устанавливаются только для правого снимка и правого трансформированного изображения.

Подсчитаем допустимую ошибку установки децентрации. Ошибка децентрации вызывает искажение трансформированного изображения. Согласно выражению (19.44)

$$\Delta R' = \Delta y^0 = -\frac{x\,\Delta\delta_y - y\,\Delta\delta_x}{\bar{f}}\,\bar{\alpha}' - 2y\,\frac{\Delta\delta_y}{\bar{f}}\,\bar{\omega}'.$$

Аналогично

$$\Delta x^0 = -\frac{y\,\Delta\delta_x + x\,\Delta\delta_y}{\bar{f}}\,\bar{\omega}' - 2x\,\frac{\Delta\delta_x}{\bar{f}}\,\bar{\alpha}'.$$

Член $\Delta\delta_x\varkappa$ здесь не учитывается потому, что он характеризует не деформацию изображения, а сдвиг его вдоль оси y^0.

Пусть $x = y = a$, $\Delta\delta_y = \Delta\delta_x = \Delta\delta$, $\bar{\alpha}' = \bar{\omega}' = \bar{\alpha}$.

Опустив знак минус, получим

$$\Delta x^0 = \Delta y^0 = 4\,\frac{a}{\bar{f}}\,\bar{\alpha}\,\Delta\delta - 4\,\frac{a}{\bar{f}}\,\alpha\,\Delta\delta, \tag{19.48}$$

где Δx^0 и Δy^0 — ошибки трансформированного изображения в масштабе снимка ($\bar{H} = \bar{f}$).

Потребуем, чтобы эти ошибки не превышали погрешности устранения поперечного параллакса Δq. Тогда

$$\Delta\delta \leqslant \frac{f\,\Delta q}{4a\alpha}. \tag{19.49}$$

Если $\Delta q = 0{,}01$ мм, $f = 100$ мм, $a = 70$ мм и $\alpha = 1°$, то $\Delta\delta \leqslant 0{,}2$ мм.

§ 141. ПОСТРОЕНИЕ И ВНЕШНЕЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАННОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим способы построения преобразованной модели местности по трансформированным изображениям.

Первый способ заключается в проектировании трансформированных изображений.

Пусть в плоскости E получена пара трансформированных изображений P_1^0 и P_2^0 (рис. 245). Восстановим в точках надира n_1^0 и n_2^0 перпендикуляры к плоскости E и отложим на них фокусные расстояния трансформированных изображений. Таким образом получим центры проекции этих изображений S_1^0 и S_2^0.

Если проектирующие лучи, исходящие из точек трансформированных изображений P_1^0 и P_2^0, проходят соответственно через точки S_1^0 и S_2^0, то связки лучей подобны существовавшим во время съемки. В этом случае каждая пара соответственных лучей пересекается, в результате чего образуется модель, подобная местности.

В § 138 показано, что центры проектирования не обязательно совмещать с точками S_1^0 и S_2^0 — их можно выбирать и в других местах на прямых $n_1^0S_1^0$ и $n_2^0S_2^0$.

Выберем в качестве центров проектирования трансформированных изображений точки $S_1^{0\prime}$ и $S_2^{0\prime}$, равноудаленные от плоскости и лежащие на надирных лучах $n_1^0S_1^0$ и $n_2^0S_2^0$. Тогда связки будут преобразованы, но каждая пара соответственных лучей, например $a_1^0S_1^0$ и $a_2^0S_2^0$, и в этом случае будет пересекаться. Таким образом, мы получим преобразованную модель местности. Вертикальный масштаб этой модели найдем по формуле (19.28). Как известно, коэффициент преобразования связки $k = \bar{f} : f$. В данном случае $\bar{f} = n_1^0S_1^0 = n_2^0S_2^0$, а $f = f_0$, т. е. фокусному расстоянию трансформированного изображения.

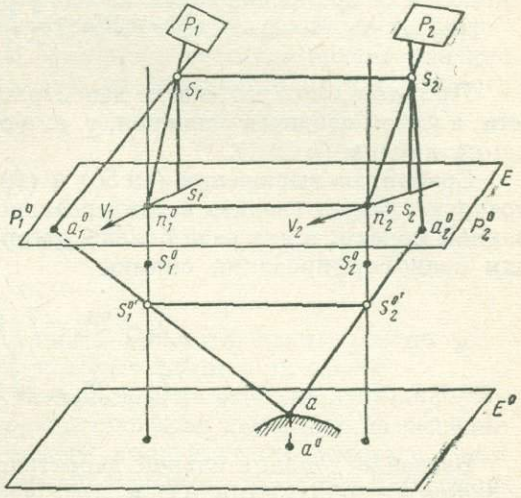


Рис. 245

Внешнее ориентирование преобразованной модели выполним по опорным точкам. Для этого найдем горизонтальный и вертикальный масштабы и углы наклона модели, изменим установки проектирующих камер и получим в плоскости экрана E новые трансформированные изображения, соответствующие горизонтальным снимкам. Модель, построенную по этим изображениям, используем в дальнейшем для составления карты.

Построить преобразованную модель первым способом можно не только оптическими средствами, но и с помощью механизмов. Механизмы для решения этой задачи применяются в стереопроекторе. Снимки в этом приборе находятся в горизонтальной плоскости E и перемещаются относительно неподвижной наблюдательной системы. При движении снимков вводятся с помощью корреционных механизмов поправки за углы наклона α и ω. Благодаря этому осуществляется трансформирование плановых снимков. Преобразованная модель строится по результатам трансформирования снимков. Для этого используются рычаги, вращающиеся вокруг центров $S_1^{0\prime}$ и $S_2^{0\prime}$. Верхние концы рычагов связаны со снимками (см. гл. 18).

Второй способ. Конструкция мультиплекса, стереопланиграфа и некоторых других универсальных стереоприборов не позволяет проектировать трансформированные изображения так, как показано на рис. 245 и осуществлено в стереопроекторе. Однако и в этих приборах можно построить модель по преобразованным связкам, если углы наклона снимков малы.

Соответственные лучи преобразованных связок, по которым получаются трансформированные изображения, не пересекаются, так как надирные лучи

этих связок $S_1 n_1^0$ и $S_2 n_2^0$ не вертикальны. Продольный и поперечный углы σ_α и σ_ω отклонения надирного луча связки от прямой, перпендикулярной плоскости трансформирования, можно найти по формулам (19.42).

Чтобы получить модель в мультиплексе, необходимо установить надирные лучи в отвесное положение. Эту задачу можно решить путем введения дополнительной децентрации снимков.

Согласно рис. 244 дополнительные децентрации

$$\left.\begin{aligned} \Delta\delta_x &= \bar{f}\sigma_\alpha = \frac{1}{2}\bar{f}\left(1-\frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\alpha} \\ \Delta\delta_y &= \bar{f}\sigma_\omega = \frac{1}{2}\bar{f}\left(1-\frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\omega} \end{aligned}\right\}. \tag{19.50}$$

При этом дополнительную децентрацию следует вводить в том же направлении, в каком вводится основная, т. е. в сторону приподнятой части прикладной рамки камеры ($k > 1$).

Сравнивая выражения (19.50) и (19.40), видим, что децентрация снимка, которую следует вводить в универсальном приборе при построении преобразованной модели, в два раза больше по сравнению с децентрацией, необходимой для трансформирования снимка

$$\left.\begin{aligned} \bar{\delta}_x &= 2\delta_x = \bar{f}\left(1-\frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\alpha} \\ \bar{\delta}_y &= 2\delta_y = \bar{f}\left(1-\frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\omega} \end{aligned}\right\}. \tag{19.51}$$

Введение дополнительной децентрации вызывает искажение трансформированного изображения Δx^0 и Δy^0, что приводит к остаточным поперечным параллаксам Δq и к искажению продольных параллаксов Δp в пространстве модели. Эти искажения можно подсчитать по формуле (19.48)

$$\Delta x^0 = \Delta y^0 = \Delta p = \Delta q = 4\frac{a}{f}\alpha\,\Delta\delta.$$

Подставив сюда значение $\Delta\delta$ из равенства (19.50), учитывая при этом что $\alpha = k\alpha$, получим

$$\Delta x^0 = \Delta y^0 = \Delta p = \Delta q = 2a\left(\frac{\bar{f}^2}{f^2}-1\right)\alpha^2, \tag{19.52}$$

где a — максимальное значение координаты x или y точки снимка.

Искажения, вычисленные по формуле (19.52), выражены в масштабе снимка.

Пусть $\bar{f} = 100$ мм, $f = 70$ мм, $\alpha = 30'$ и $a = 70$ мм. Тогда максимальное значение остаточного поперечного параллакса $\Delta q = 0{,}01$ мм. Максимальные значения ошибок определения координат точек местности, вызванных дополнительной децентрацией, можно подсчитать по формулам

$$\left.\begin{aligned} \Delta X = \Delta Y &= H\frac{\Delta x^0}{f} \\ \Delta Z &= H\frac{\Delta p}{b} \end{aligned}\right\}, \tag{19.53}$$

где H — высота фотографирования над опорной точкой, а b — базис фотографирования в масштабе снимка.

Если $H = 10\,000$ м, $f = b = 70$ мм, $\Delta x^0 = \Delta p = 0{,}01$ мм, то ошибки определения координат точек местности не превысят 1,4 м.

Таким образом, ошибки, вызванные введением дополнительной децентрации, незначительны, если углы наклона снимков малы. В этом случае в мультиплексе и в других универсальных приборах пару снимков можно взаимно ориентировать с преобразованными связками путем устранения поперечных параллаксов не в плоскости трансформирования, а в пространстве модели. Это означает, что при взаимном ориентировании преобразованных связок, как и при установке подобных связок, можно пользоваться движениями X, Y и Z для перехода с одной точки на другую, но необходимо вводить двойную децентрацию, определяя ее по формуле (19.51). В остальном взаимное ориентирование пары снимков с преобразованными связками не отличается от изложенного в предыдущем параграфе.

Глава 20

ВНЕШНЕЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКА

§ 142. КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ

Способы определения элементов внешнего ориентирования можно разделить на две группы, исходя из средств, которые лежат в их основе.

Первую группу составляют способы, основанные на использовании координат опорных точек. Элементы внешнего ориентирования находятся из решения уравнений, выражающих зависимость между координатами опорных точек и соответствующих им точек снимка. Эта задача в общем виде может быть сформулирована как о б р а т н а я з а с е ч к а [27, 49].

Вторую группу составляют способы получения элементов внешнего ориентирования, основанные на использовании специальных приборов, обслуживающих аэросъемку. При этом исключено или сведено к минимуму использование опорных точек на поверхности объекта съемки [21].

Специальные приборы, установленные на борту летательного аппарата при съемке, фиксируют положение съемочной камеры относительно объектов. Такими объектами являются инерциональные и изобарические поля, поверхность объекта съемки или отдельные его точки, линия горизонта, звезды и т. д.

Приборы для определения элементов внешнего ориентирования снимков построены на принципах измерения физических явлений в окружающей среде (изменение давления атмосферы, времени распространения радиоволн и света и т. д.) или приспособлены для получения фотографий ее объектов: звезд, горизонта и др. В этом случае элементы ориентирования для каждого снимка получаются независимо от других снимков и свободны от накопления ошибок фотограмметрических преобразований.

Определение элементов ориентирования снимков по показаниям специальных приборов приобретает особое значение в космической фотограмметрии при изучении пока недоступных геодезистам объектов. Они могут оказаться е д и н с т в е н н ы м средством для внешнего ориентирования космических съемок. Комплекс приборов для получения элементов ориентирования снимков в полете в совокупности со съемочной аппаратурой позволяет произвести полное геометрическое описание поверхности любого объекта.

В настоящее время имеются приборы, позволяющие получить данные, достаточные для определения всех шести элементов внешнего ориентирования снимков. Эти приборы используют достижения многих областей науки и техники: физики, электроники, радиолокации, оптики, фотографии, механики и др. и постоянно совершенствуются.

Для определения углов наклона снимков, полученных основной фотокамерой, фотографируют горизонт или звезды дополнительными фотокамерами. Та же задача решается при помощи гироскопических устройств.

Высоты фотографирования над поверхностью объекта определяют по показаниям радио или лазерных высотомеров, измеряющих время распространения радиоволн или света от самолета до поверхности объекта.

По показаниям статоскопов находят превышения точек фотографирования над поверхностью равных давлений.

Если движение носителя съемочной камеры прямолинейно и равномерно и известна его скорость, то можно вычислить длины базисов фотографирования. Для этого используются данные временного отметчика моментов фотографирования.

Наконец, с помощью радиогеодезических станций определяют плановые координаты точек фотографирования.

При выборе технических средств для получения элементов внешнего ориентирования снимков учитывают условия выполнения комплекса работ при съемке поверхности объекта и в процессе фотограмметрической обработки снимков, а также требования к точности результатов и экономическую эффективность.

§ 143. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКА ПО ОПОРНЫМ ТОЧКАМ

Рассмотрим способ, относящийся к первой группе и позволяющий найти не только элементы внешнего ориентирования, но и элементы внутреннего ориентирования снимка [26, 27].

Для теоретического обоснования способа используем формулы (14.17), выражающие зависимость между координатами x, y точки снимка и координатами X, Y, и Z соответственной точки местности.

Пусть известны приближенные значения элементов ориентирования снимка. Тогда по формулам (14.17) можно вычислить координаты x и y изображений опорных точек на снимке. Обозначим вычисленные значения этих величин через (x) и (y). Очевидно, вычисленные координаты будут отличаться от измеренных x и y. Обозначим поправки к приближенным значениям элементов ориентирования через δX_S, δY_S, δZ_S, $\delta\alpha$, $\delta\omega$, $\delta\varkappa$, δf, δx_0 и δy_0. Полагая, что мы имеем избыточные измерения, составим уравнения поправок

$$(x)+\frac{\partial x}{\partial X_S}\delta X_S+\frac{\partial x}{\partial Y_S}\delta Y_S+\frac{\partial x}{\partial Z_S}\delta Z_S+\frac{\partial x}{\partial\alpha}\delta\alpha+\frac{\partial x}{\partial\omega}\delta\omega+$$

$$+\frac{\partial x}{\partial\varkappa}\delta\varkappa+\frac{\partial x}{\partial f}\delta f+\frac{\partial x}{\partial x_0}\delta x_0+\frac{\partial x}{\partial y_0}\delta y_0-x=v;$$

$$(y)+\frac{\partial y}{\partial X_S}\delta X_S+\frac{\partial y}{\partial Y_S}\delta Y_S+\frac{\partial y}{\partial Z_S}\delta Z_S+\frac{\partial y}{\partial\alpha}\delta\alpha+\frac{\partial y}{\partial\omega}\delta\omega+$$

$$+\frac{\partial y}{\partial\varkappa}\delta\varkappa+\frac{\partial y}{\partial f}\delta f+\frac{\partial y}{\partial x_0}\delta x_0+\frac{\partial y}{\partial y_0}\delta y_0-y=v'.$$

Найдем частную производную от x по X, обозначив числители и знаменатель в равенствах (14.17) через X^*, Y^* и Z^* соответственно,

$$a=\frac{\partial x}{\partial X_S}=-f\frac{-a_1Z+a_3X}{Z^*}=\frac{1}{Z^*}[a_1f+a_3(x-x_0)].$$

Производную от x по α обозначим через d. Из (14.17) следует

$$d=\frac{\partial x}{\partial\alpha}=f\frac{X^{*\prime}Z^*-Z^{*\prime}X^*}{Z^{*2}}.$$

Учитывая (14.4), найдем

$$X^{*\prime}=(X-X_S)(-\sin\alpha\cos\varkappa-\cos\alpha\sin\omega\sin\varkappa)+(Y-Y_S)0+$$
$$+(Z-Z_S)(\cos\alpha\cos\varkappa-\sin\alpha\sin\omega\sin\varkappa)=c_1(X-X_0)+a_1(Z-Z_S);$$
$$Z^{*\prime}=(X-X_S)(-\cos\alpha\cos\omega)+(Y-Y_S)0+(Z-Z_S)(-\sin\alpha\cos\omega)=$$
$$=c_3(X-X_S)+a_3(Z-Z_S).$$

Следовательно,

$$d=\frac{f}{Z^*}[c_1(X-X_S)-a_1(Z-Z_S)]+\frac{x-x_0}{Z^*}[c_3(X-X_S)-a_3(Z-Z_S)].$$

Аналогично получим остальные частные производные. В результате будем иметь

$$\left.\begin{aligned}
a&=\frac{\partial x}{\partial X_S}=\frac{1}{Z^*}[a_1f+a_3(x-x_0)]\\
b&=\frac{\partial x}{\partial Y_S}=\frac{1}{Z^*}[b_1f+b_3(x-x_0)]\\
c&=\frac{\partial x}{\partial Z_S}=\frac{1}{Z^*}[c_1f+c_3(x-x_0)]\\
d&=\frac{\partial x}{\partial\alpha}=\frac{f}{Z^*}[c_1(X-X_S)-a_1(Z-Z_S)]+\frac{x-x_0}{Z^*}[c_3(X-X_S)-a_3(Z-Z_S)]\\
e&=\frac{\partial x}{\partial\omega}=-f\sin\varkappa+(x-x_0)\left[\operatorname{tg}\omega+\frac{Y-Y_S}{Z^*\cos\omega}\right]\\
f&=\frac{\partial x}{\partial\varkappa}=y-y_0\\
g&=\frac{\partial x}{\partial f}=\frac{x-x_0}{f}\\
h&=\frac{\partial x}{\partial x_0}=1\\
i&=\frac{\partial x}{\partial y_0}=0\\
a'&=\frac{\partial y}{\partial X_S}=\frac{1}{Z^*}[a_2f+a_3(y-y_0)]\\
b'&=\frac{\partial y}{\partial Y_S}=\frac{1}{Z^*}[b_2f+b_3(y-y_0)]\\
c'&=\frac{\partial y}{\partial Z_S}=\frac{1}{Z^*}[c_2f+c_3(y-y_0)]
\end{aligned}\right\}.\quad(20.1)$$

$$d' = \frac{\partial y}{\partial \alpha} = \frac{f}{Z^*}[c_2(X - X_S) - a_2(Z - Z_S)] + \frac{y - y_0}{Z^*}[c_3(X - X_0) - a_3(Z - Z_S)]$$

$$\left.\begin{aligned} e' &= \frac{\partial y}{\partial \omega} = -f\cos\varkappa + (y - y_0)\left(\operatorname{tg}\omega + \frac{Y - Y_S}{Z^*\cos\omega}\right) \\ f' &= \frac{\partial y}{\partial \varkappa} = -(x - x_0) \\ g' &= \frac{\partial y}{\partial f} = \frac{1}{f}(y - y_0) \\ h' &= \frac{\partial y}{\partial x_0} = 0 \\ i' &= \frac{\partial y}{\partial y_0} = 1 \end{aligned}\right\}$$

Таким образом, уравнения поправок можно представить в виде

$$\left.\begin{aligned} a\delta X_S + b\delta Y_S + c\delta Z_S + d\delta\alpha + e\delta\omega + f\delta\varkappa + g\delta f + h\delta x_0 + i\delta y_0 + (x) - x = v \\ a'\delta X_S + b'\delta Y_S + c'\delta Z_S + d'\delta\alpha + e'\delta\omega + f'\delta\varkappa + g'\delta f + \\ + h'\delta x_0 + i'\delta y_0 + (y) - y = v' \end{aligned}\right\}. \quad (20.2)$$

Одна опорная точка дает два уравнения с весами p и p' и девятью неизвестными. Следовательно, для решения задачи необходимо не менее пяти опорных точек.

Уравнения (20.2) решаются по условию

$$[pv^2 + p'v'^2] = \min$$

методом последовательных приближений. Для этого сначала измеряют координаты опорных точек на снимке. Затем по приближенным значениям элементов ориентирования (начальное приближение) вычисляют координаты (x) и (y) тех же опорных точек на снимке и коэффициенты уравнений поправок. Составляют уравнения поправок и нормальные уравнения. Решают нормальные уравнения, в результате чего получают поправки к начальному приближению. Введя эти поправки, находят первое приближение неизвестных. Используя первое приближение элементов, вновь вычисляют величины (x) и (y) и коэффициенты уравнений поправок. Составляют и решают нормальные уравнения. Таким образом получают поправки к первому приближению и второе приближение неизвестных.

Вычисления продолжают до тех пор, пока разность значений каждого неизвестного, полученных в двух последних приближениях, не будет меньше установленного допуска. При подсчете этого допуска учитываются требуемая точность определения элементов ориентирования, а также точность построения и измерения снимков.

Для оценки точности решения задачи в последнем приближении вычисляют весовые коэффициенты Q и поправки v. Находят ошибку единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{pv^2 + p'v'^2}{2n - 9}}, \quad (20.3)$$

где n — число опорных точек.

Затем вычисляют средние квадратические ошибки элементов

$$\left.\begin{array}{lll} m_{X_S}=\mu\sqrt{Q_{11}}; & m_\alpha=\mu\sqrt{Q_{44}}; & m_f=\mu\sqrt{Q_{77}} \\ m_{Y_S}=\mu\sqrt{Q_{22}}; & m_\omega=\mu\sqrt{Q_{55}}; & m_{x_0}=\mu\sqrt{Q_{88}} \\ m_{Z_S}=\mu\sqrt{Q_{33}}; & m_\varkappa=\mu\sqrt{Q_{66}}; & m_{y_0}=\mu\sqrt{Q_{99}} \end{array}\right\}. \qquad (20.4)$$

Если элементы внутреннего ориентирования снимка известны с достаточной точностью, то в уравнениях (20.2) будет только шесть неизвестных, для определения которых достаточно трех опорных точек.

Изложенный выше способ пригоден для снимка с любыми элементами ориентирования. Если угловые элементы внешнего ориентирования малы, то уравнения (20.2) можно представить в таком виде:

$$\left.\begin{array}{c} \frac{f}{Z_S-Z}\delta X_S+\frac{x}{Z_S-Z}\delta Z_S+\left(f+\frac{x^2}{f}\right)\alpha+\frac{xy}{f}\omega- \\ -y\varkappa-\frac{x}{f}\delta f-x_0+x-(x)=v \\ \frac{f}{Z_S-Z}\delta Y_S+\frac{y}{Z_S-Z}\delta Z_S+\frac{xy}{f}\alpha+\left(f+\frac{y^2}{f}\right)\omega+ \\ +x\varkappa-\frac{y}{f}\delta f-y_0+y-(y)=v' \end{array}\right\}. \qquad (20.5)$$

Задачу и в этом случае целесообразно решать путем последовательных приближений. При этом в начальном приближении считают, что элементы α, ω, $\varkappa$, δf, x_0, y_0 равны нулю.

Способ, рассмотренный в данном параграфе, позволяет при определении элементов внешнего ориентирования снимка учесть влияние элементов внутреннего ориентирования, величины которых в полете могут отличаться от значений, полученных в лабораторных условиях.

В случае равнинной местности системы уравнений (20.2) и (20.5) плохо обусловлены и точность определения элементов f, x_0, y_0 недостаточна.

§ 144. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКА С ПОМОЩЬЮ ГИРОСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ПО СНИМКАМ ГОРИЗОНТА И ЗВЕЗД

Гиростабилизирующие устройства построены на базе гироскопа и используют способность сохранять в пространстве заданное направление оси вращения его ротора. Для придания гироскопу определенной ориентации относительно Земли гиростабилизирующие устройства снабжаются коррекционными механизмами.

Гиростабилизирующие устройства могут быть использованы в двух режимах: стабилизации положения съемочной камеры в момент фотографирования или индикации (считывания) ее углов наклона. В первом случае получаются снимки с малыми углами наклона, во втором — фиксируются угловые элементы.

Гиростабилизирующие устройства выгодно использовать в режиме стабилизации: упрощаются методы и приборы для фотограмметрической обработки снимков.

В Советском Союзе применяются гиростабилизирующие установки Н-55 и НМ, разработанные в ЦНИИГАиК под руководством М. Д. Коншина [21]. Они позволяют получить снимки с углами наклона в среднем 10—15′.

Такие углы наклона снимков, стабилизированных устройствами, построенными на базе механических гироскопов, упрощают фотограмметрическую обработку одиночных снимков, но существенно не изменяют процессы обработки стереопар. Поэтому ведется поиск новых способов стабилизации камеры при съемке.

Заслуживают внимания разработки по созданию оптических (лазерных) гироскопов. Последние основаны на сравнении световых колебаний, направленных по кольцевому пути в двух противоположных направлениях. В месте встречи колебаний наблюдается интерференционная картина. Характер интерференционной картины изменяется в зависимости от скорости вращения деталей гироскопа, задающих направление распространению световых колебаний. Изменения постоянно фиксируются регистратором, построенным на базе фотоэлектронных умножителей. Регистратор может выдавать результаты в цифровой форме.

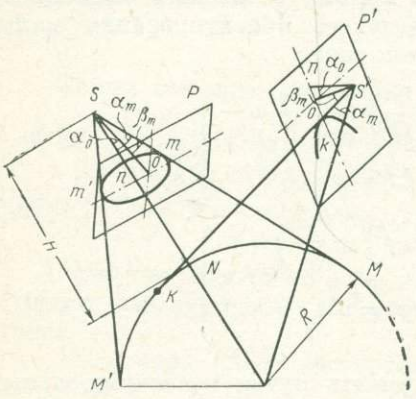


Рис. 246

Лазерные гироскопы имеют более высокие характеристики по сравнению с механическими: чувствительность 10°/час, дрейф 5″ в сутки, время готовности к работе 1—2 с.

В космических съемках возможны случаи, когда съемочная камера ориентируется относительно объектов мирового пространства (обычно звезд или Солнца). В таких случаях гиростабилизирующие установки используются совместно с устройствами слежения небесных светил.

Линия горизонта при определенных условиях фотографирования поверхности Земли или других планет изображается на основном снимке (рис. 246). Иногда снимок горизонта P' получается дополнительной камерой, оптическая ось которой ориентирована под углом 90° относительно оси основной камеры.

Изображение линии горизонта на снимке, как сечение светового конуса плоскостью, является кривой второго порядка. Пусть фотографируемая поверхность имеет сферическую форму. Тогда горизонт на снимке изобразится: окружностью, если оптическая ось камеры совпадает с местной вертикалью; эллипсом, если углы наклона оси камеры не превышают наклона образующих конуса и параболой или гиперболой для остальных положений оптической оси. При этом большая ось эллипса и оси симметрии других кривых лежат в плоскости главного вертикала.

Обозначим абсолютный угол наклона основного снимка через α_0, угол наклона визирного луча в плоскости главного вертикала на линию горизонта — α_m и угол наклона того же луча относительно оптической оси — β_m. Тогда

$$\alpha_0 = \alpha_m - \beta_m, \tag{20.6}$$

если линия горизонта изобразилась на основном снимке, и

$$\alpha_0 = \alpha_m - \beta_m - 90°, \tag{20.7}$$

если используется дополнительный снимок.

В свою очередь, углы α_m и β_m могут быть найдены по формулам

$$\left.\begin{aligned} \sin\alpha_m &= \frac{R}{R+H} \\ \operatorname{tg}\beta_m &= \frac{om}{f} = \frac{ok}{f} \end{aligned}\right\}, \tag{20.8}$$

где R — радиус сферической поверхности, H — высота фотографирования, ok — расстояние на снимке от главной точки до линии горизонта вдоль главного вертикала.

Формулы (20.6), (20.7) и (20.8) пригодны для определения углов наклона снимков, если известны величины R и H, а кривизна линии горизонта хорошо выражена. Второе условие необходимо для отыскания линии главного вертикала на снимках с целью последующего измерения отрезков om или ok.

Линия главного вертикала является осью симметрии для изображения горизонта. Если совместить ее с одной из осей прибора (например, yy), то для любых двух точек горизонта с одинаковыми по величине и разными по знаку абсциссами ординаты должны быть одинаковыми. В этом случае длина отрезка om получается как разность отсчетов при наведении на главную точку и точку горизонта, лежащую на оси y.

Зная ориентирование линии главного вертикала относительно осей системы координат, можно найти составляющие абсолютного угла наклона α и ω.

Как следует из формул, с уменьшением высоты фотографирования H значение $\sin\alpha_m$ приближается к единице. Поэтому для малых высот фотографирования формулу для определения угла наклона основного снимка можно записать так:

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{2} - \beta_m, \tag{20.9}$$

а для дополнительного

$$\alpha_0 = \beta_m. \tag{20.10}$$

При этом горизонт на основном снимке не изобразится вообще, а на дополнительном получится в виде линии весьма малой кривизны (рис. 247).

Если съемка горизонта производится по направлению полета, то наклон линии горизонта tt относительно координатной оси x на дополнительном снимке равен поперечному углу наклона ω основной камеры, а отрезок om позволяет найти ее продольный угол наклона.

Для определения этих углов достаточно измерить на снимке отрезки h, h' и om. Тогда

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \operatorname{arctg}\frac{om}{f} \approx \frac{om}{f} \\ \omega &= \operatorname{arctg}\frac{h'-h}{l} \approx \frac{h'-h}{l} \end{aligned}\right\}, \tag{20.11}$$

где f — фокусное расстояние дополнительной камеры, а l — расстояние между координатными метками оси x на снимке горизонта.

Для значительных высот фотографирования можно использовать способы определения углов наклона снимка, не требующие знания высот фотографирования и размеров планет.

Ранее показано, что на снимках, оптическая ось которых направлена на центр планеты (т. е. не имеющих углов наклона), линия горизонта изображается окружностью относительно главных точек снимков. Исходя из этого условия, можно для любой точки изображения горизонта на трансформированном снимке записать равенство

$$x_t^2 + y_t^2 = r_t^2 = \text{const},$$

где x_t и y_t — координаты точки, измеренные в прямоугольной системе координат с началом в главной точке снимка, r_t — радиус окружности.

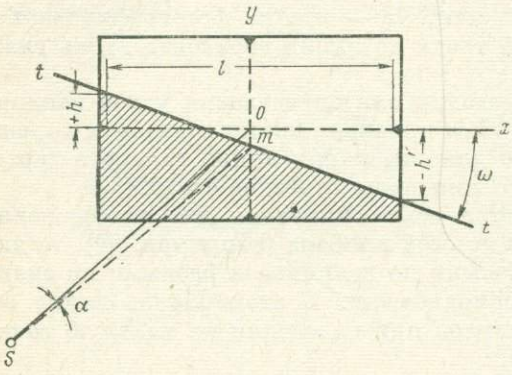


Рис. 247

Чтобы это равенство выполнялось для координат точек горизонта на наклонном снимке, необходимо в измеренные координаты x и y у каждой точки ввести поправки $\Delta x = F_1(\alpha\omega)$ и $\Delta y = F_2(\alpha\omega)$, известные из теории трансформирования одиночного снимка.

В результате можно переписать равенство

$$(x + \Delta x)^2 + (y + \Delta y)^2 = r_t^2 = \text{const}.$$

Для определения углов наклона снимков α и ω в системе координат, принятой для измерения снимков, необходимо перейти к уравнениям, связывающим угловые элементы с измеренными по снимкам координатами.

Поскольку уравнения, в которых строго раскрыты значения поправок Δx и Δy, будут трансцендентны, следует их записать в лианизированном виде, пользуясь приемами, которые применялись при выводе уравнений взаимного ориентирования. Так, сохраняя в уравнениях соотношения величин α и ω первого порядка малости, получим выражение

$$\left[x\left(f + \frac{x^2}{f}\right) + \frac{xy^2}{f}\right]\alpha + \left[\frac{x^2y}{f} + y\left(f + \frac{y^2}{f}\right)\right]\omega + \frac{r^2 - r_t^2}{2} = 0,$$

где

$$r_t^2 = x^2 + y^2.$$

Можно записать систему таких уравнений для множества точек, расположенных на линии горизонта, и решить ее несколько раз по способу наименьших квадратов для определения α и ω последовательными приближениями.

В качестве трансформированного значения r_t для вычисления свободного члена уравнений погрешности берется в каждом приближении среднее значение r из определений по всем точкам, т. е. решается равенство

$$r_t \approx r_{\text{ср}} = \frac{[r]}{n}$$

Если углы наклона снимков значительны, рекомендуется вначале грубо определить углы наклона снимков [например, по формулам (20.8)] и произвести предварительное трансформирование измеренных по снимку координат.

Точность определения углов наклона снимков по изображению линии горизонта равна 0,5—3′ и зависит в значительной степени от четкости изобра-

жения линии горизонта на снимках, рефракции атмосферы и отклонений реальной поверхности объекта от принятой для математических расчетов. Ошибки достигают нескольких минут.

Фотографии звездного неба позволяют найти углы наклона ночных и космических снимков. Звезды фотографируют дополнительной камерой, жестко связанной с основным аппаратом.

Положение звезды на любое время известно с большой степенью точности (до 1″) и определяется угловыми координатами α (прямое восхождение) и δ (склонением) в небесной геоцентрической прямоугольной системе координат. Значения α и δ видимых звезд публикуются в справочниках.

Начало небесной системы координат совмещено с центром Земли, ось Z направлена через Северный полюс, ось X в точку весеннего равноденствия γ, ось Y перпендикулярна плоскости XZ (рис. 248).

Звезды находятся на громадных расстояниях от Земли. Поэтому углы между направлениями на звезды сохраняются практически одинаковыми для любой точки космического пространства солнечной системы и можно считать, что любой снимок неба произведен из центра Земли, как это показано на рисунке.

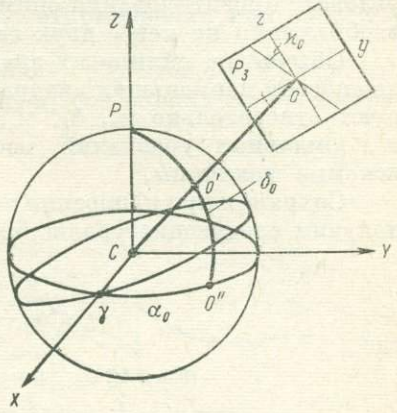


Рис. 248

Решение задачи внешнего ориентирования снимка звезд сводится к определению трех углов Эйлера в системе координат XYZ: α_0 — прямого восхождения оптической оси фотокамеры, δ_0 — ее склонения и $\varkappa_0$ — угла поворота снимка.

Если обозначить координатные оси на снимке соответственно осям пространственной системы координат XYZ, можно записать соотношения координат y, z каждой звезды, измеренных по снимку, с ее прямым восхождением α и склонением δ [26].

Для идеального снимка, когда $\alpha_0 = \delta_0 = \varkappa_0 = 0$, эти соотношения выразятся формулами

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg}\alpha &= \frac{y^0}{f} \\ \operatorname{tg}\delta &= \frac{z^0}{f}\cos\alpha \end{aligned}\right\}, \tag{20.12}$$

где y^0 и z^0 — координаты изображения звезды в системе координат снимка.

Те же соотношения для снимка звезд, произвольно расположенного относительно пространственной системы координат XYZ, можно записать так:

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg}\alpha &= \frac{Y'}{X'} \\ \operatorname{tg}\delta\sec\alpha &= \frac{Z'}{X'} \end{aligned}\right\}, \tag{20.13}$$

где X', Y', Z' — координаты изображения звезды в пространственной системе координат.

Последние можно выразить через измеренные на снимках координаты изображения звезд в соответствии с формулами

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x=f \\ y \\ z \end{pmatrix}, \tag{20.14}$$

в которых направляющие косинусы a_i, b_i, c_i — функции углов α_0, δ_0, $\varkappa_0$.

Формулы (20.13) и (20.14) служат исходными для определения элементов углового ориентирования снимка звезд. Для этого достаточно иметь на снимке изображения не менее двух звезд.

Обычно на снимке их значительно больше, что позволяет решить задачу по способу наименьших квадратов. С этой целью выражения (20.13) линеализируют относительно α_0, δ_0, $\varkappa_0$, составляют систему уравнений погрешностей и нормальных уравнений, последовательным решением которых определяют искомые величины.

Сохраняя при написании уравнений только члены первого порядка малости, получим следующие уравнения погрешностей:

$$\left.\begin{aligned} a\alpha_0 + b\delta_0 + c\varkappa_0 + l = v \\ a'\alpha_0 + b'\delta_0 + c'\varkappa_0 + l' = v' \end{aligned}\right\}, \tag{20.15}$$

где

$$\left.\begin{aligned} a = z\operatorname{tg}\alpha; \quad b = -z; \quad c = y\operatorname{tg}\alpha; \quad l = y - f\operatorname{tg}\alpha \\ a' = f + z\operatorname{tg}\delta\sec\alpha; \quad b' = y; \quad c' = y\operatorname{tg}\delta\sec\alpha \\ l' = z - f\operatorname{tg}\delta\sec\alpha. \end{aligned}\right\}. \tag{20.16}$$

Для определения углов наклона основной фотокамеры по фотографии звезд необходимо выполнить следующий комплекс работ:

— определить координаты α и δ на момент фотографирования всех звезд, хорошо опознанных на снимке;

— измерить координаты y и z изображений звезд на снимке и исправить их за дисторсию объектива, деформацию пленки, рефракцию атмосферы;

— определить угловые элементы α_0, δ_0, $\varkappa_0$ оптической оси вспомогательной камеры;

— зная ориентацию основной фотокамеры относительно вспомогательной, найти угловые элементы внешнего ориентирования основного снимка.

Ошибки определения элементов ориентирования по звездам при благоприятных условиях съемки и строгих методах обработки не превышают 30″.

Фотографирование звезд основной камерой используется иногда для ее калибровки, при которой определение элементов внешнего ориентирования является промежуточным процессом.

§ 145. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТЕЙ ВЫСОТ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ ПО ПОКАЗАНИЯМ СТАТОСКОПА

Статоскопы представляют собой дифференциальные барометры для измерения разности давления атмосферы с целью определения колебаний высоты полета.

В Советском Союзе широкое распространение получили разработанные в ЦНИИГАиК Ю. С. Доброхотовым и К. П. Бычковским двухкаскадные статоскопы С-50 и С-51, упрощенная схема которых представлена на рис. 249, *а*.

Каждый из каскадов содержит манометрическую трубку, залитую жидкостью. Один конец трубки сообщается с окружающей средой, а другой — с термоизолированным баллоном. Разность давлений наружного воздуха и заключенного в баллоне вызывает изменение уровней жидкости в манометрической трубке. Наличие двух одинаковых каскадов позволяет проследить изменение давления воздуха в любом диапазоне колебания высот. Текущие изменения давления фиксируются по одному из работающих в данный момент каскадов (на рисунке — правому). Другой включается, если уровень жидкости в трубке достигает критического положения. Первый при этом отключается. Переключение осуществляется с помощью клапанов $К_1К_2$, открывающих или закрывающих доступ воздуха в баллоны.

Уровень жидкости в манометрических трубках подсвечивается, а возникающие при этом блики проектируются на движущуюся пленку фоторегистратора.

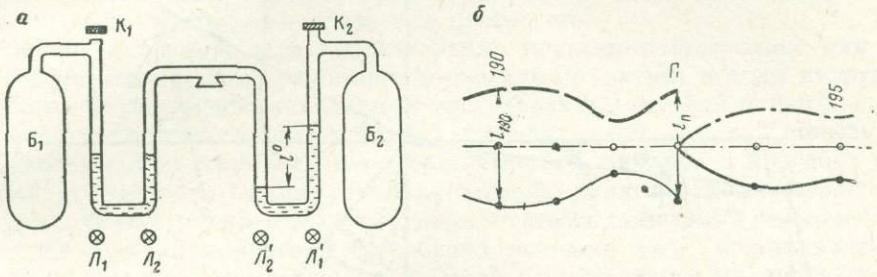


Рис. 249

Одна пара каналов двух трубок подсвечивается лампочками $Л_1$ и $Л'_1$, которые горят в полный накал между моментами фотографирования и гаснут, когда производится съемка. Другая — подсвечивается лампочками $Л_2$ и $Л'_2$, горящими в полнакала в интервале между съемками и вспыхивающими при экспонировании. В результате получают статограмму, изображенную на рис. 249, *б*.

Расстояние l на статограмме между прерывистой и сплошной линиями в моменты фотографирования соответствует разности уровней жидкости в трубке работающего каскада. Переключения каскадов отражаются характерной картиной, показанной на рисунке состоянием П.

От величин l можно перейти к превышениям $\Delta H'$ центров фотографирования относительно изобарической поверхности, проходящей через точку пространства, в которой данный каскад статоскопа был включен в работу. Для этого необходимо знать нормирующий коэффициент Q, связывающий l и $\Delta H'$. Тогда

$$\Delta H' = Ql. \tag{20.17}$$

Коэффициент Q вычисляется по формуле

$$Q = \frac{7991}{vB_н} = (1 + \alpha t)\,[k_0(1 - \beta t) + 0{,}5\omega B_H],$$

где B_H—давление воздуха на высоте съемки, v — увеличение фоторегистратора, $\alpha = 1/273$ — коэффициент объемного расширения воздуха, k_0 — отношение плотности жидкости в манометрической трубке и плотности ртути,

β — коэффициент объемного расширения жидкости, t — температура воздуха на высоте съемки, ω — постоянная статоскопа.

Если учесть все переключения каскадов от момента включения статоскопа в работу $l_П$ до текущего момента съемки, можно вычислить превышение ΔH любой точки фотографирования над единой изобарической поверхностью по формуле

$$\Delta H = Q\left(l_i + \sum l_n\right). \tag{20.18}$$

Разности величины ΔH для любых точек фотографирования определяют их взаимное превышение B_Z. Если изобарические поверхности параллельны уровенной, то величины ΔH и B_Z получаются в геодезической системе координат, т. е. являются элементами внешнего ориентирования снимков.

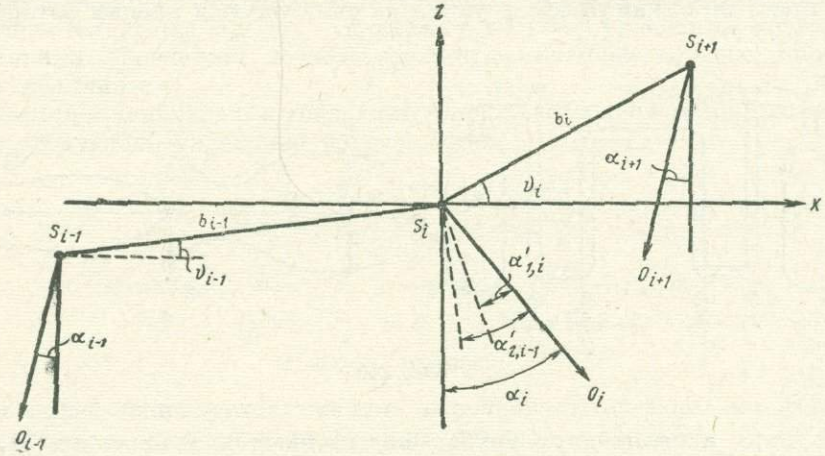


Рис. 250

Показания статоскопа и элементы взаимного ориентирования снимков позволяют вычислить продольные углы наклона снимков.

На рис. 250 изображены точки фотографирования и оптические оси трех последовательных снимков, спроектированные на плоскость XZ. Продольные углы, обозначенные на рисунке индексом α', с небольшими допущениями соответствуют углам взаимного ориентирования в базисной системе координат, а α — абсолютным углам наклона снимков.

Из построений рисунка следуют соотношения

$$\alpha_i = \nu_i + \alpha'_{1,\,i} = \nu_{i-1} + \alpha'_{2,\,i-1}, \tag{20.19}$$

где ν — углы наклона базисов фотографирования.

Последние можно найти по показаниям статоскопа, используя формулу

$$\nu = \arcsin\frac{B_Z}{B} \approx \frac{B_Z}{bt}, \tag{20.20}$$

в которой b — базис, измеренный на снимке, t — знаменатель масштаба снимков, а B_Z — разность величин ΔH для соседних точек фотографирования.

Абсолютный угол наклона каждого снимка, кроме первого и последнего, в маршруте получается дважды из предыдущей и последующей стереопар. По расхождению двух значений угла судят о правильности работы статоскопа.

Вычисленные углы наклона α и ν в дальнейшем используют в различных целях, например при обработке снимков на стереометрах.

По показаниям статоскопа можно произвести продольное горизонтирование модели, созданной в результате взаимного ориентирования снимков стереопары на универсальных приборах. Для этого достаточно сначала установить на приборе величину базисного компонента b_Z, равную превышению центров проектирования B_Z в вертикальном масштабе модели, т. е.

$$b_Z = \frac{1}{t_b} B_Z, \tag{20.21}$$

а затем выполнить взаимное ориентирование угловыми движениями снимков.

Вычисление и установка базисных компонентов для каждой стереопары маршрута съемки широко используются при сгущении опорного геодезического обоснования на универсальных приборах. Поскольку установочные значения b_Z независимы друг от друга, удается ослабить накопление ошибок, сопровождающих фотограмметрические построения.

Решение о возможности использования показания статоскопа для фотограмметрической обработки снимков должно приниматься исходя из точности его работы. Согласно многочисленным исследованиям ошибки определений ΔH по показаниям статоскопа колеблются в пределах $\pm 0{,}6$—$1{,}5$ м. Точность показаний зависит от инструментальных погрешностей, наклона и прогибов изобарической поверхности относительно уровенной, динамических ошибок статоскопа и др. С уменьшением высоты полета точность показаний снижается.

Считая ошибки показаний статоскопа равными $m_{\Delta H}$, можно подсчитать ожидаемую точность результатов для любой разновидности их использования. На основании формул (20.19), (20.20) и (20.21) можно записать

$$\left.\begin{aligned} m_{b_Z} &= \frac{1}{t_b} m_{\Delta H} \sqrt{2} \\ m_\alpha &= \sqrt{\frac{m_\nu^2 + m_{\alpha'}^2}{2}} \\ m_\nu &= \frac{1}{B} \sqrt{2m_{\Delta H}^2 + \nu^2 m_B^2} \approx \frac{m_{\Delta H}}{B} \sqrt{2} \end{aligned}\right\}. \tag{20.22}$$

§ 146. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОКАЗАНИЙ РАДИОВЫСОТОМЕРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ

Для определения высот точек фотографирования на борту самолета устанавливаются радиовысотомеры, построенные на принципе измерения времени прохождения радиоволн от самолета к местности и обратно. Поскольку скорость распространения радиоволн известна, измеренное время просто перевести в расстояния.

В Советском Союзе наибольшее распространение получили разработанные в ЦНИИГАиК радиовысотомеры РВТД и РВТД-А, показания которых представлены на рис. 251 [21].

При работе радиовысотомера в сторону фотографируемой местности непрерывно посылаются импульсы радиоколебаний, что фиксируется всплеском a круговой развертки электронно-лучевой трубки индикатора. Отразившись от Земли, радиоимпульсы возвращаются к самолету последовательностью колебаний с относительным временным запаздыванием в зависимости от отстояния отдельных участков поверхности объекта.

Радиовысотомером может быть зафиксировано только начало этой последовательности, т. е. радиоимпульс, отраженный от ближайшей к самолету точки. Этот момент на круговой развертке индикатора отмечается вторым всплеском *б*.

Время движения электронного луча вдоль круговой развертки индикатора согласовано со временем распространения радиоволн и тарируется в метрах расстояний шкалой с наименьшим делением 5 м.

Развертка индикатора РВТД рассчитана на измерение расстояний в пределах 500 м. Если высоты фотографирования превышают эту величину, необходимо знать сумму полных циклов по 500 м, к которой добавляется расстояние, полученное по шкале индикатора.

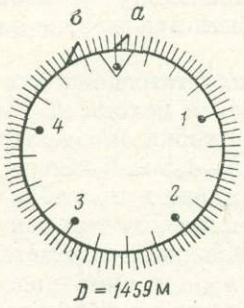


Рис. 251

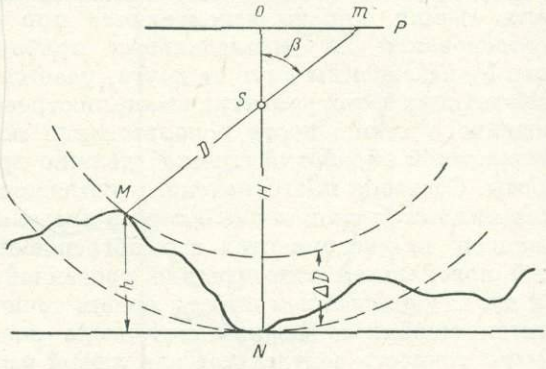


Рис. 252

Показания шкалы-индикатора фотографируются устройством только в момент съемки местности.

Расстояние до ближайшей точки заснятой на снимке поверхности, которое считывается с индикатора радиовысотомера, в общем случае не будет высотой фотографирования. Радиоволны распространяются во все стороны от самолета в пределах конуса с углом при вершине, равном для РВТД около 120°. Поэтому для рельефной местности, как это изображено на рис. 252, кратчайшее расстояние D будет соответствовать некоторой точке M, не совпадающей с проекцией точки надира.

Следовательно, в процессе обработки данных радиовысотомера необходимо сначала найти ближайшую к самолету точку на поверхности объекта. Если она не совпадает с точкой N, возникает дополнительная задача перехода от расстояний до ближайшей точки D к действительным высотам фотографирования.

Точку отраженного импульса можно найти с помощью измерительной марки в виде сферы переменного радиуса, центр которой совмещен с точкой фотографирования.

Наблюдая сферическую марку на фоне модели объекта и изменяя радиус сферы, можно найти такое положение, когда марка будет касаться точки поверхности объекта. Эта точка и будет ближайшей к самолету. На рис. 252 показаны два положения сферической марки.

Переход от расстояний до ближайшей точки к высотам фотографирования осуществляется по формуле

$$H = D + \Delta D, \tag{20.23}$$

если фиксируется изменение радиуса сферы при наведении сферической марки на точки M и N, или

$$H = D\cos\beta + h, \tag{20.24}$$

где h — превышение точки M над N и β — угол между направлениями на эти точки, который определяется из соотношения

$$\beta = \operatorname{arctg}\frac{om}{f}.$$

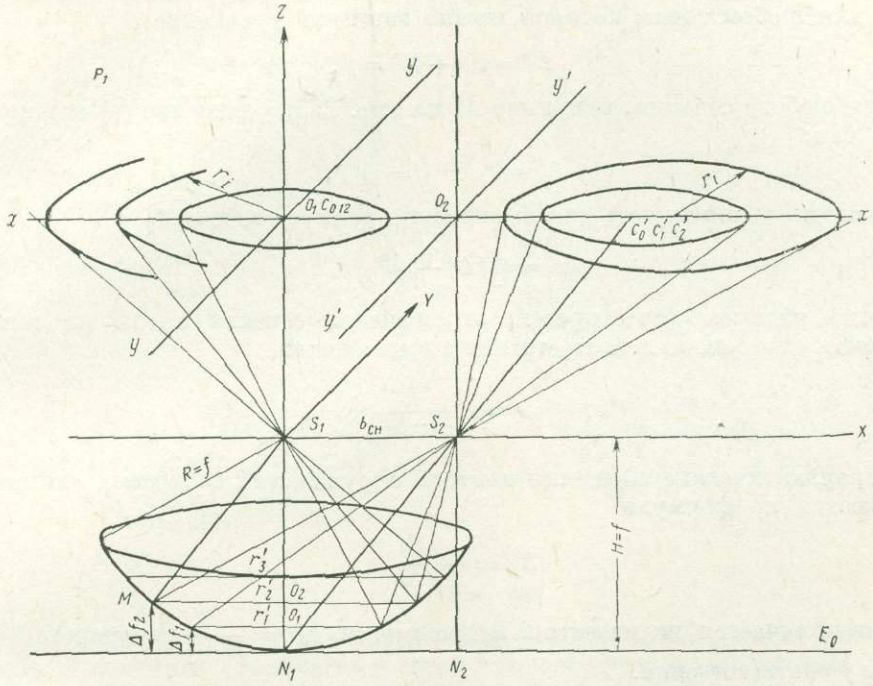


Рис. 253

Существует несколько способов отождествления ближайшей к самолету точки с помощью сферических марок.

Наибольшее распространение получил предложенный М. Д. Коншиным способ «сферических сеток», в котором сферическая марка задается изображениями на правом и левом снимках стереопары ее плоских сечений. Густота и направление сечений сферы выбраны таким образом, чтобы были обеспечены пространственное восприятие и достаточная точность измерения.

Сферические сетки изготовляются для ряда дискретных значений фокусных расстояний и базисов фотографирования.

Рассмотрим метод построения сферических сеток и их расчет. Предположим, что сферическая поверхность рассечена семейством плоскостей, а линии сечений фотографируются на пару снимков P_1 и P_2 (рис. 253).

Параметры фотографирования выбираются так, чтобы изображения сечений получились в тех же условиях, что и снимки местности. Для этого высота фотографирования и радиус сферы приравниваются фокусному расстоянию аэроснимков, а базис фотографирования — базису, измеренному по снимкам.

Если секущие плоскости параллельны плоскости снимков, изображения на левом и правом снимках будут представлять собой одинаковые окружности, центры которых на левом снимке совпадут, а на правом будут сдвинуты относительно друг друга вдоль оси x. Величина смещения зависит от высоты сечений сферы Δf над исходной плоскостью E_0.

Для построения сферических сеток произвольно выбирают величины Δf, находят радиусы окружностей r_i на снимках и сдвиг центра каждой окружности правого снимка относительно изображения основания сферы C_0'.

Сечение сферы главной базисной плоскостью представляет собой окружность, для любой точки которой можно записать уравнение

$$R^2 = X^2 + Y^2 = f^2. \qquad \text{(а)}$$

Для любого сечения, например M на рис. 253, уравнение (а) можно переписать так:

$$f^2 = r'^2 + (f - \Delta f)^2,$$

откуда следует зависимость для вычисления радиуса сечений

$$r' = (2f\Delta f - \Delta f^2)^{1/2}. \qquad (20.25)$$

Тогда радиусы окружностей, отражающих сечения сферы на снимках, могут быть определены в соответствии с выражением

$$r = r' \frac{f}{f - \Delta f}. \qquad (20.26)$$

Параллактические смещения центров окружностей на правом снимке рассчитываются по формуле

$$\Delta p = \frac{\Delta f}{f - \Delta f} b, \qquad (20.27)$$

которая получается из известной зависимости $\Delta p = \frac{h}{H - h} b$ заменой h и H на Δf и f соответственно.

Чтобы построить сетку для левого снимка, достаточно вычертить семейство концентрических окружностей, радиусы которых подсчитываются по формуле (20.26). Для правого снимка те же окружности вычерчиваются со сдвигом Δp вдоль оси x.

Помимо сечений сферы плоскостями, параллельными плоскостям снимков, при изготовлении сеток используются сечения сферы плоскостями, перпендикулярными базису фотографирования. В окончательном виде сетки оформляются на стеклянных пластинках и имеют вид, представленный рис. 254.

Измерение с помощью сферических сеток обычно производят на стереометре СМ-4, оборудованном специальным держателем сеток. В начальной стадии соответственно совмещают центральные точки сеток с главной точкой левого снимка и ее изображением на правом снимке стереопары. Наблюдая пространственную модель местности и объемно воспринимаемую сферу, поступательным смещением правой сетки вдоль оси XX прибора «приподнимают» сферическую марку, пока она не будет касаться точки модели. Эта точка и будет соответствовать отсчету расстояния по радиовысотомеру.

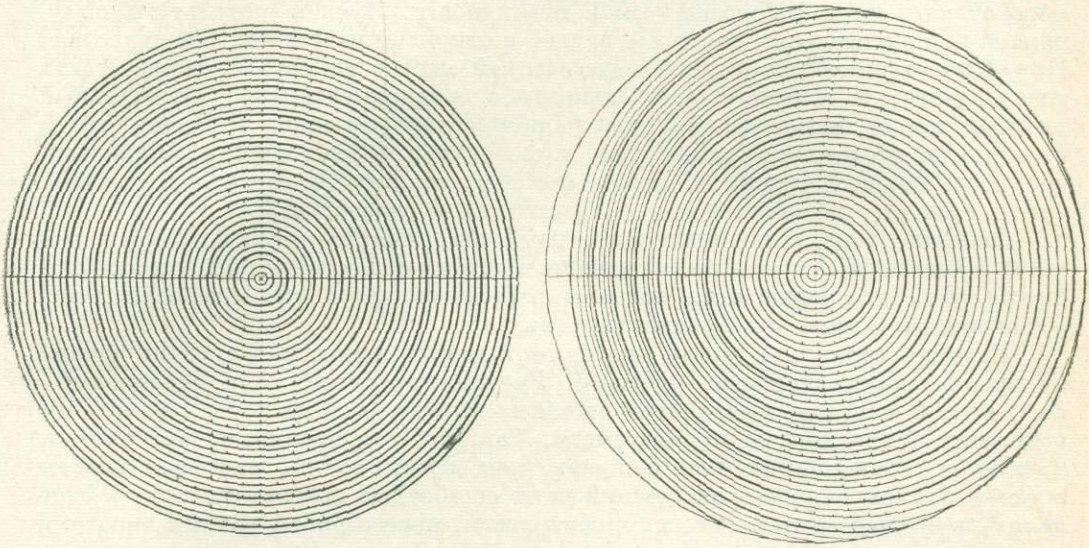
Если вычисления высот фотографирования производятся по формуле (20.23), то по винту продольных параллаксов определяют разность отсче-

тов Δp_c при визировании сферической маркой на «ближайшую» и главную точку снимков. Величина ΔD подсчитывается по формуле

$$\Delta D = D\frac{\Delta p_0}{b}. \qquad (20.28)$$

Когда используют формулу (20.24), величину Δp определяют наведением измерительной марки на те же точки, а величина ΔD служит превышением h.

При вычислениях с помощью таблиц учитывают поправки за отступление реальных параметров съемки f и b от принятых для расчетов.



а *б*

Рис. 254

Нетрудно заметить, что определение действительных высот фотографирования с помощью сферических сеток сопровождается некоторыми методическими ошибками. Отождествление «ближайшей» точки выполняется сферической маркой постоянного радиуса по стереоскопической, а не геометрической модели.

М. Д. Коншиным предложен способ определения высот фотографирования на универсальных приборах, свободный от этих недостатков. Он предусматривает аналитическое задание сечений сферы переменного радиуса для последовательности дискретных положений радиофронта в пространстве.

Для множества положений любого сечения в пространстве модели объекта, которая строится на универсальном приборе, заранее рассчитывают и сводят в таблицу превышения относительно исходной плоскости отсчета. Сечения закрепляют палеткой концентрических окружностей, укладываемой на левый снимок стереопары.

В дальнейшем последовательно устанавливают по счетчику высот превышения каждого сечения при каждом дискретном положении сферы. При установке обводят марку вокруг концентрической окружности, соответствующей анализируемому сечению. В результате находят такое положение сферы, при котором точка геометрической модели местности будет касаться одного из сечений сферы. Она и будет искомой. Поскольку модель объекта всегда строится

в одном масштабе, для вычисления действительных высот фотографирования используют формулу

$$H = \frac{Z_0}{Z_i} D, \tag{20.29}$$

где Z_0 — высота проектирования в исходном положении сферы, т. е. перед началом анализа, Z_i — высота проектирования, при которой найдена ближайшая точка.

Точность определения высот фотографирования зависит в значительной мере от характера фотографируемой поверхности. Лучшие результаты получаются при определении высот над водной и открытой равнинной поверхностью. При фотографировании горной пересеченной местности трудно отождествить точку, которой соответствуют показания радиовысотомера. Отраженный импульс может быть зафиксирован радиовысотомером лишь в случае, когда он обладает достаточной мощностью, т. е. получен от некоторой площадки поверхности объекта съемки. В горах, особенно скалистого характера, ближайшие к самолету точки часто не обладают такой способностью.

Ошибки отождествления точек отраженного импульса тем вероятнее, чем шире фронт распространения радиоволн. Поэтому существует тенденция сокращения угла направленности антенны радиовысотомера, что сопровождается уменьшением длины волн радиоизлучений.

Радиовысотомеры с узкой диаграммой направленности радиоволн нашли больше распространение за рубежом. Уменьшение длины волн радиоизлучений, в свою очередь, приводит к ошибкам отождествления точек, к которым относятся показания радиовысотомера. Так как радиоволны отражаются от предметов, соизмеримых или больших, чем длины волны, радиовысотомеры с узкой направленностью излучений дают ошибочные результаты при определении высот над местностью, покрытой лесом, пересеченной узкими оврагами и т. д. Считается, что ошибки определения высот фотографирования с помощью радиовысотомера не менее 1,2 м.

В настоящее время ведутся разработки высотомеров, построенных на лазерах. Эти высотомеры будут иметь узкую направленность действия и большую точность определения расстояний.

§ 147. АЭРОРАДИОНИВЕЛИРОВАНИЕ

Если при топографической аэросъемке каждый снимок обеспечен показаниями статоскопа и радиовысотомера, то можно определить превышения точек местности, т. е. провести аэрорадионивелирование [21].

На рис. 255 изображена схема маршрута съемки, в котором для каждой точки фотографирования определены превышение ΔH над некоторой изобарической поверхность E_n и высота фотографирования H.

Разность

$$H_и = H - \Delta H \tag{20.30}$$

равна отстоянию точки надира на местности относительно изобарической поверхности $E_п$, которая параллельна уровенной поверхности E_0.

Величины $H_и$ позволяют получить взаимные превышения точек надира. Например, принимая точку N_1 за исходную, превышения любой другой точки над ней получим по формуле

$$h_{i-1} = H_{и1} - H_{и\,i}. \tag{20.31}$$

Если известна геодезическая отметка исходной точки, можно получить высоты всех остальных

$$Z_{г\,i} = Z_{г1} + h_{i-1}. \tag{20.32}$$

Желательно знать геодезическую отметку и конечной точки $Z_{г\,n}$ в маршруте съемки, по которой можно выявить и исключить систематические ошибки, вызванные непараллельностью уровенной и изобарической поверхностей.

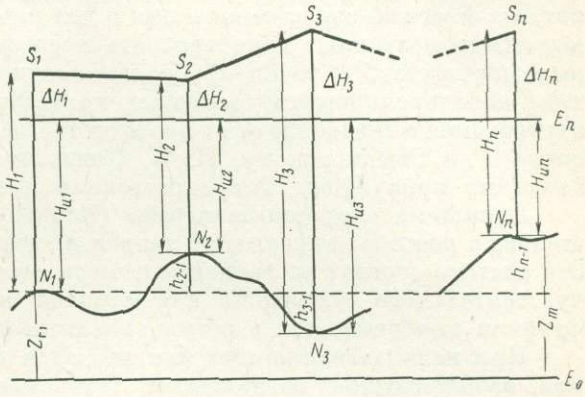


Рис. 255

Расхождение $\Delta Z_{г\,n}$ высот, полученных из аэрорадионивелирования и по геодезическим данным в конце маршрута, является в основном следствием непараллельности плоскостей $E_н$ и E_0, так как накопления ошибок в ходах аэрорадионивелирования практически не происходит. Для учета непараллельности величину ΔZ_n обычно распределяют по линейному закону в соответствии с формулой

$$Z^{0}_{г\,i} = Z_{г\,i} + \Delta Z_{г\,i} = Z_{г\,i} + \frac{i-1}{n-1}\delta Z_{г\,n}, \tag{20.33}$$

где $Z_{г\,i}$ — отметка точки из аэронивелирования; i, n — номера текущего и последнего центров фотографирования.

Суммарная погрешность определения высот из аэрорадионивелирования колеблется в пределах $\pm 1{,}5$—4 м для различных условий. Сравнительно низкая точность результатов позволяет использовать аэрорадионивелирование для картографирования в мелких масштабах (1 : 50 000 и меньше) труднодоступных и малообжитых районов, а также для уменьшения количества потребного геодезического обоснования при проведении различного рода изысканий, при которых используются материалы аэросъемки (геофизических, геологических, дорожных и т. д.). Результаты аэрорадионивелирования можно использовать для составления фотопланов методом дифференциального трансформирования снимков, если они являются окончательной продукцией.

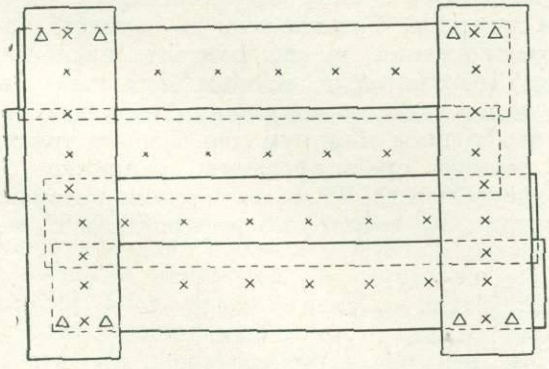


Рис. 256

На рис. 256 изображена примерная схема обеспечения аэросъемки результатами аэронивелирования.

Аэросъемка, обеспеченная показаниями статоскопа и радиовысотомера, проводится основными маршрутами с 60%-ным продольным перекрытием аэроснимков. Помимо основных через заданные интервалы прокладываются поперечные (каркасные) маршруты с 80%-ным перекрытием аэроснимков. Каркасные маршруты опираются концами на точки с известными геодезическими координатами; масштаб аэросъемки в них в два раза крупнее, чем в основных. Опорные точки позволяют ориентировать хода аэрорадионивелирования в каркасных маршрутах, а точки аэрорадионивелирования каркасных маршрутов — хода аэронивелирования основных маршрутов. За разработку аэрорадионивелирования и внедрение его в аэрофотогеодезическое производство М. Д. Коншину, Г. В. Романовскому, Н. П. Кожевникову, Н. А. Соколовой, Л. А. Лукашевичу присуждена Государственная премия.

В системе «Аэропрофилограф» (Канада) аэрорадионивелирование осуществлено в режиме непрерывной записи профиля местности вдоль линии полета. Эта система состоит из радиовысотомера с узконаправленной антенной (до 1°), чувствительного статоскопа и самописца для регистрации профиля. Линия профиля вычерчивается в результате решения зависимости (20.32).

При использовании профиля вводятся поправки, учитывающие возмущения изобарической поверхности. Поправки вычисляются по эмпирической формуле, учитывающей помимо других факторов угол сноса самолета. Чтобы привязать линию профиля к местности, последняя фотографируется малоформатной камерой, укрепленной на параболическом рефлекторе антенны радиовысотомера. Моменты фотографирования фиксируются метками. Рекомендуется выборочно использовать данные профиля, имея в виду, что радиовысотомеры с узкой диаграммой направленности не обеспечивают достаточной точности при полете над залесенными участками и в узких долинах.

§ 148. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧЕК ФОТОГРАФИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ РАДИОГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Радиогеодезические системы позволяют измерять расстояния от самолета до нескольких фиксированных (базовых) точек земной поверхности.

Если координаты базовых точек известны, а расстояния до самолета измерены для каждого момента фотографирования, можно получить плановые координаты точек фотографирования. Дополнительно должны быть известны высоты фотографирования, которые определяют по показаниям радиовысотомера. Для определения координат необходимы минимум две базовые точки.

Плановые координаты любого центра проектирования, например S_i (рис. 257), находятся из решения треугольника AS_iB, вершинами которого служат базовые точки A и B и проекция S_{0i} точки фотографирования S_i на плоскость XY:

$$\left.\begin{aligned} X_i &= X_A + \frac{D_{0i}^2 + B^2 - D_{0i}'^2}{2B}\cos\alpha + \\ &+ \frac{(2D_{0i}^2 D_{0i}'^2 + 2D_{0i}^2 B^2 + 2D_{0i}'^2 B^2 - D_{0i}^4 - D_{0i}'^4 - B^4)^{1/2}}{2B}\sin\alpha \\ Y_i &= Y_A + \frac{D_{0i}^2 + B^2 - D_{0i}'^2}{2B}\sin\alpha + \\ &+ \frac{(2D_{0i}^2 D_{0i}'^2 + 2D_{0i}^2 B^2 + 2D_{0i}'^2 B^2 - D_{0i}^4 - D_{0i}'^4 - B^4)^{1/2}}{2B}\cos\alpha \end{aligned}\right\}, \qquad (20.34)$$

где B — расстояние между базовыми точками, α — дирекционный угол линии $АБ$; X_A, Y_A — координаты базовой точки A.

Редуцирование наклонных расстояний D_i и D'_i на плоскость XY производится двумя последовательными преобразованиями. Сначала вычисляются расстояния между точками, спроецированными на поверхность референц-эллипсоида, а затем расстояния D_{0i} и D'_{0i} между теми же точками в системе XYZ Эти преобразования выполняются приемами, известными из геодезии.

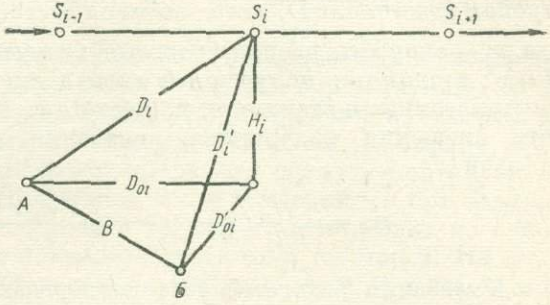


Рис. 257

Для топографических целей в СССР имела распространение радиогеодезическая система ЦНИИГАиК (РГСЦ), реализующая фазовый метод измерения расстояний. В основе фазового метода лежит закон пропорциональности разностей фаз электромагнитных колебаний постоянной частоты и времени их распространения между различными точками пространства [45, 46].

В последние годы в производство внедрен самолетный радиодальномер, разработанный в ЦНИИГАиК под руководством И. Л. Гилля. Самолетный радиовысотомер (РДС), так же как и РГСЦ, построен на фазовом принципе измерения расстояний. В отличие от РГСЦ, измеряющего приращения расстояний, РДС позволяет получать их абсолютную длину.

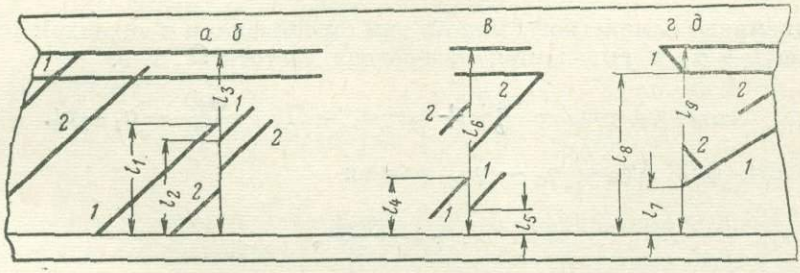


Рис. 258

В комплект РДС входят одна самолетная и три наземные станции. Одно временно работают две из них, третья, резервная, включается для охвата большей площади измерений. В результате работы РДС получают фотограмму (рис. 258), после дешифрирования которой находят дальности самолета в момент фотографирования от двух базовых точек.

Согласно производственным испытаниям точность определения плановых координат точек фотографирования по данным РДС получается не ниже 5 м [$\Delta D = \pm (1\ м + 10^{-5} D)$], что позволяет использовать их при составлении карт до масштаба 1 : 10 000 включительно. Предельная дальность действия 350 км.

Результаты измерения расстояний фиксируются индикатором самолетной станции в виде штрихового кода. Для перехода к численным значениям

штриховой код расшифровывается по определенным правилам (ключу). Эти правила исходят из принципа измерения расстояний фазовым дальномером и порядка отражения результатов.

Самолетная (ведущая) станция постоянно излучает электромагнитные колебания с фазой $\gamma_1 = \omega_1 t + \alpha_1$, где α_1 — постоянная составляющая фазы. Пройдя расстояние D, эти колебания отстанут по фазе на величину $\Delta\varphi_1 = \frac{\omega_1 D}{v}$, где v — скорость распространения излучения. При приеме наземными (ведомыми) станциями полученный сигнал смешивается с сигналом, вырабатываемым наземными станциями на частоте ω_2 и в фазе $\Delta\gamma_2 = \omega_2 t + \alpha_2$. В результате смешения излучаются колебания разностей частоты $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ с фазой

$$\varphi_\Omega = \omega_1 t + \alpha_1 - \omega_2 t - \alpha_2 - \frac{\omega_1 D}{v} = \Omega t + \alpha_1 - \alpha_2 - \frac{\omega_1 D}{v}.$$

Колебания разностей частоты передаются с наземных станций вспомогательными передатчиками и принимаются самолетной станцией с фазой

$$\varphi_{\Omega 1} = \Omega t - \frac{\omega_1 D}{v} - \frac{\Omega D}{v} + \alpha_1 - \alpha_2. \qquad (б)$$

Одновременно поступают собственные колебания наземных станций с запаздыванием $\Delta\varphi = \frac{\omega_2 D}{v}$, т. е.

$$\varphi_{21} = \omega_2 t + \alpha_2 - \frac{\omega_1 D}{v}.$$

В приемнике самолетной станции они смешиваются с сигналом радиопередатчика $\omega_1 t + \alpha_1$ и выделяется разностная частота Ω, т. е.

$$\varphi_{\Omega 2} = \omega_2 t - \omega_1 t - \frac{\omega_2 D}{v} + \alpha_2 - \alpha_1 = \Omega t + \frac{\omega_2 D}{v} + \alpha_1 - \alpha_2. \qquad (в)$$

Разность фаз $\Delta\gamma_\Omega = \gamma_2 - \gamma_1$, равная

$$\Delta\varphi_\Omega = \frac{2\omega_1 D}{v}, \qquad (20.35)$$

позволяет записать формулу для определения расстояний

$$D = \frac{v}{2\omega_1}\Delta\varphi_\Omega. \qquad (20.36)$$

Разность фаз $\Delta\gamma$ измеряется на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ).

Из формулы (20.36) видно, что точность определения расстояний зависит от ошибок измерения фазы и частоты сигнала. В свою очередь, если частота сигнала достаточно большая, то изменением фазы будет зафиксирована только часть расстояния, т. е. целые периоды формулой не учтены. В результате возникает неоднозначность результатов.

Чтобы избежать неоднозначности решения, кроме основной частоты в передатчиках используются две дополнительные, отличающиеся от основной так, чтобы вычисленные по каждой частоте расстояния давали правильное значение только в определенных разрядах общего числа, а именно: в единицах,

десятках, сотнях, тысячах метров. Тогда формулу для определения расстояний, опуская значки у $\Delta\varphi$, можно записать так:

$$D' = \frac{v}{2}\left[\frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_i}{\omega_1 - \omega_i} k_i + \ldots + \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_3}{\omega_1 - \omega_3} k_3 + \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{\omega_1 - \omega_2} k_2 + \frac{\varphi_1}{\omega_1}\right], \quad (20.37)$$

где ω_1 — частота для наименьшего разряда, k — коэффициенты для выбора разряда.

Исключение погрешностей, вызываемых фазовыми задержками в электронных цепях, производится введением двух разных частот в передатчиках наземных станций. Полуразность результатов измерений дает величину поправки.

В процессе работы РДС с двумя наземными станциями на экране ЭЛТ высвечиваются пять точек, которые фотографируются на транспортируемую пленку (см. рис. 258). Три из них неподвижны, а две отклоняются при изменении фазы сигналов, поступающих от одной и другой станций. Одна из неподвижных точек базовая, две других принадлежат к своим станциям. На движущейся пленке неподвижные точки вычертят параллельные прямые, а подвижные — и наклонные. Расстояния между базовой прямой и параллельными прямыми для каждой станции соответствуют 100 м измеряемой длины.

В момент фотографирования получаются разрывы непрерывной картины и образуется несколько характерных диаграмм. Диаграммой «а» фиксируется измерение расстояния D на одной частоте, «б» на другой и «в» на третьей. Диаграммы «г» и «д» дают возможность вычислить поправку Δ в результаты за задержку фаз в электронных блоках.

Для получения полного расстояния необходимо измерить отрезки $l_1 - l_9$, как показано на рис. 258. Тогда, следуя формуле (20.37), будем иметь

$$D' = 100\left(\frac{l_4 - l_5}{l_6} k;\ \frac{l_1 - l_2}{l_3} k;\ \frac{l_1}{l_3}\right), \quad (20.38)$$

если $l_1 > l_2$ и $l_4 > l_5$ или

$$D' = 100\left[\left(\frac{l_4 - l_5}{l_6} + 1\right) k;\ \left(\frac{l_1 - l_2}{l_3} + 1\right) k;\ \frac{l_1}{l_3}\right], \quad (20.39)$$

если $l_1 < l_2$ и $l_4 < l_5$.

Коэффициент k здесь показывает, с какого разряда выписываются числа. Низшие разряды отбрасываются. Для РДС $k = 10$.

Например, когда без учета k получены цифры (5) 6,8; (6) 8,8 и 82,2, общее расстояние будет равно 5682,2.

Поправка Δ к вычисленному расстоянию определяется по формуле

$$\Delta = 50\left(\frac{l_7 + l_8}{l_9} + 1\right). \quad (20.40)$$

Вычисленные по расшифрованным данным расстояния исправляются еще рядом поправок и редуцируются на плоскость или в другую проекцию, а именно

$$D_0 = D' + \Delta_0 + \Delta_f + \Delta_v + \Delta_\rho + \Delta_c + \Delta_н + \Delta_п, \quad (20.41)$$

где Δ_0, Δ_f — аппаратурные поправки, Δ_v — поправки из-за изменения скорости распространения радиоволн, Δ_ρ — за кривизну радиолуча, Δ_c — за приведение изменений к моменту фотографирования, $\Delta_н$ и $\Delta_п$ — за редуцирование линий.

Глава 21

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

§ 149. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

Пространственная фототриангуляция позволяет сгущать по снимкам опорную геодезическую сеть, т. е. определять опорные точки, необходимые для составления топографических карт и фотопланов.

Основная цель пространственной фототриангуляции — максимально сократить трудоемкие полевые геодезические работы, заменив их камеральными.

Пространственная фототриангуляция применяется и для решения нетопографических задач, например для определения траектории, скорости и других параметров самолета.

Сущность пространственной фототриангуляции, как показано во введении, состоит в построении модели местности по снимкам, принадлежащим к одному или нескольким маршрутам, и ориентировании ее относительно геодезической системы координат.

В зависимости от количества маршрутов, используемых для построения модели местности, пространственную фототриангуляцию разделяют на одномаршрутную, или маршрутную, и многомаршрутную, или блочную.

Маршрутная фототриангуляция строится по снимкам, принадлежащим к одному маршруту. При этом маршрут должен иметь опорные точки, необходимые для ориентирования модели относительно геодезической системы координат.

Блочная фототриангуляция развивается по снимкам, принадлежащим к двум и более маршрутам. Для построения ее нет необходимости обеспечивать опорными точками каждый маршрут, достаточно иметь несколько опорных точек на весь блок. Поэтому блочная фототриангуляция позволяет в большей степени сократить полевые геодезические работы, чем маршрутная, что имеет исключительно важное значение, особенно при картографировании труднодоступных и недоступных территорий.

В зависимости от применяемых технических средств различают два вида пространственной фототриангуляции — аналоговую, или инструментальную, и аналитическую.

В основу аналоговой фототриангуляции положено использование универсальных стереоприборов, позволяющих строить одиночные модели или общую модель в пределах каждого маршрута.

В аналитической фототриангуляции координаты определяемых точек вычисляются по измеренным координатам точек снимков. Современная аналитическая фототриангуляция основана на применении высокоточных автоматизированных стереокомпараторов и электронных вычислительных машин.

Аналоговую фототриангуляцию иногда сочетают с аналитической. Например, на универсальных стереоприборах создают независимые модели, а затем с помощью электронной вычислительной машины соединяют эти модели в общую модель и ориентируют ее внешне.

Аналитическая фототриангуляция является наиболее точной, производительной и универсальной по сравнению с аналоговой и аналого-аналитической.

В зависимости от назначения фототриангуляцию разделяют на каркасную и заполняющую.

Каркасная фототриангуляция развивается обычно по маршрутам, проложенным перпендикулярно направлению заполняющих маршрутов с целью обеспечения опорными точками для заполняющих маршрутов. Заполняющая фототриангуляция обеспечивает опорными точками каждую стереопару для обработки ее при составлении топографической карты.

Различают еще фототриангуляцию без использования элементов внешнего ориентирования снимков и фототриангуляцию с использованием элементов внешнего ориентирования снимков, зарегистрированных в полете. Применение в фототриангуляции дополнительных данных, например разностей высот фотографирования, высот фотографирования, координат центров проекции, углов наклона снимков, приводит к значительному сокращению полевых геодезических работ.

§ 150. ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРАХ

Для аналоговой фототриангуляции применяются различные универсальные стереоприборы: мультиплекс, стереопланиграф, стереопроектор, стереограф и др.

Фототриангуляция на мультиплексе. В отличие от стереопланиграфа и других универсальных стереоприборов мультиплекс имеет, как известно, не две, а ряд проектирующих камер. Эта особенность мультиплекса позволяет не только построить общую модель маршрута в приборе, но и ориентировать ее внешне, а также использовать для составления карты.

Основными процессами фототриангуляции на мультиплексе являются:

1) подготовительные работы,
2) построение модели,
3) определение масштаба и горизонтирование модели,
4) измерение модели,
5) редуцирование свободной сети,
6) определение геодезических высот точек местности.

1. В подготовительные работы входят: составление технического проекта фототриангуляции, поверки мультиплекса и уменьшителя и изготовление диапозитивов.

2. Построение модели. Диапозитивы устанавливают в проектирующие камеры и центрируют их. Камеры приводят приблизительно в горизонтальное положение и размещают так, чтобы центры объективов находились на прямой, параллельной оси X прибора ($b_Y = b_Z = 0$), а расстояния между центрами соседних объективов

$$b_X = \frac{1}{t} B, \tag{21.1}$$

где B — базис фотографирования, а $1 : t$ — масштаб модели.

Приближенное значение базиса фотографирования можно найти, если измерить на снимке расстояние между главной точкой и точкой, соответствующей главной точке соседнего снимка, а затем умножить эту величину на знаменатель масштаба снимка.

Масштаб модели рассчитывают так, чтобы модель оказалась в зоне практически резкого изображения диапозитива. Это условие выполняется, если

$$\frac{1}{t} = \frac{D_0}{H}, \tag{21.2}$$

где D_0 — расстояние от объектива проектирующей камеры до плоскости резкого изображения, H — высота фотографирования над средней плоскостью участка местности, изобразившегося на снимках данного маршрута.

Величина b_X должна быть всегда несколько больше минимального расстояния между центрами объективов соседних проекторов.

Модель местности, изобразившейся на снимках данного маршрута, образуется путем последовательного построения по стереопарам отдельных моделей и приведения их к одному масштабу. Для этого взаимно ориентируют каждую пару снимков и изменяют установленное значение каждого базиса фотографирования, кроме первого, так, чтобы общие точки смежных моделей совпали.

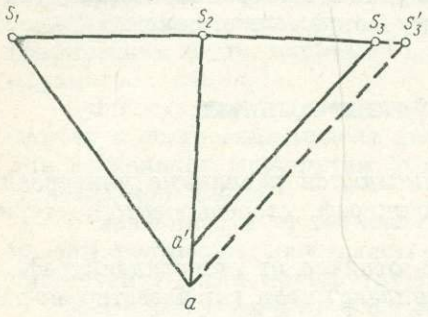


Рис. 259

Взаимное ориентирование начинают с первой пары и выполняют его первым или вторым способом, как изложено в гл. 19.

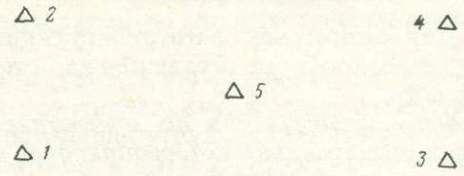


Рис. 260

В результате взаимного ориентирования первой пары образуется первая модель. Затем взаимно ориентируют вторую стереопару вторым способом, т. е. получают вторую модель.

Масштаб второй модели не равен масштабу первой, так как базисы фотографирования установлены в приборе приближенно. Вследствие этого общие точки двух моделей не совпадают друг с другом (рис. 259). Несовпадение общих точек, вызванное неравенством масштабов смежных моделей, характеризуют отсчеты по шкале измерительного столика, сделанные после визирования на эти точки. Для приведения второй модели к масштабу первой наблюдают сначала первую модель и совмещают марку измерительного столика с точкой a. Затем, не нарушая этого визирования на точку a, наблюдают вторую модель и движением b_X третьей камеры совмещают точку a' с маркой.

Чтобы привести последующую модель к масштабу предыдущей, достаточно одной связующей точки. С целью контроля и повышения точности построения сети эту задачу решают обычно по трем связующим точкам: одну выбирают приблизительно на оси маршрута, а две — слева и справа от оси на возможно большем удалении.

После совмещения точек a и a' движением b_X могут возникнуть поперечные параллаксы в пространстве второй модели, т. е. может быть нарушено взаимное ориентирование второй пары. Для восстановления взаимного ориентирования устраняют поперечные параллаксы на стандартно расположенных точках соответствующими движениями третьего проектора. Затем вновь визируют на связующие точки первой и второй моделей. Таким образом получают два отсчета по шкале высот для каждой связующей точки. Если разности отсчетов допустимы, то вторая модель приведена к масштабу первой.

Аналогично создают каждую последующую модель и приводят ее к масштабу предыдущей. В результате этих действий образуется модель местности, изобразившейся на стереопарах данного маршрута.

3. Для определения масштаба модели и горизонтирования ее используют опорные точки, расположенные на концах маршрута и в середине (рис. 260).

Сначала находят приближенное значение масштабного коэффициента

$$\lambda = \frac{d}{d_к}, \tag{21.3}$$

где d — расстояние между крайними опорными точками на экране, $d_к$ — расстояние между опорными точками на планшете.

Опорные точки на экране получают путем проектирования опорных точек модели с помощью измерительного столика.

Масштабный коэффициент определяют по двум-трем расстояниям между наиболее удаленными друг от друга опорными точками. В качестве вероятнейшего значения этой величины берут среднее из результатов нескольких определений.

Затем вычисляют знаменатель масштаба модели

$$t = \frac{t_к}{\lambda}, \tag{21.4}$$

где $t_к$ — знаменатель масштаба, выбранного для нанесения опорных точек *на планшет.*

Горизонтирование модели выполняют по крайним опорным точкам. Одну из этих точек, например точку *1*, принимают за начальную и вычисляют геодезические превышения опорных точек над начальной

$$h = \frac{1}{t}(Z - Z_1). \tag{21.5}$$

С помощью измерительного столика находят фотограмметрические превышения h' тех же точек. Подсчитывают разности $\delta h = h' - h$ и, учитывая их величины, поворачивают модель с помощью штурвалов и подъемных винтов. Далее вновь находят масштабный коэффициент, измеряют фотограмметрические превышения и вычисляют разности δh. Так продолжают до тех пор, пока модель не будет приведена в горизонтальное положение.

Подсчитаем допустимую ошибку горизонтирования модели. Для этого используем формулы (17.38), по которым можно найти изменения координат точек модели, вызванные ее наклоном

$$\left.\begin{aligned} \delta X &= -h\xi \\ \delta Y &= -h\eta \\ \delta Z &= X\xi + Y\eta \end{aligned}\right\}, \tag{21.6}$$

где h — превышение определяемой точки над начальной, ξ и η — продольный и поперечный углы наклона модели, X, Y, Z — координаты определяемой *точки сети.*

Ошибка δZ исключается, как увидим ниже, путем введения высотных поправок. Следовательно, необходимая точность горизонтирования модели определяется допустимыми погрешностями δX и δY и превышением h. При этом чем крупнее рельеф, тем точнее нужно приводить модель в горизонтальное

положение. Например, если $\delta X = \delta Y \simeq 5$ м, $h = 200$ м, то ошибка горизонтирования модели не должна превышать 1,5° в продольном и поперечном направлениях.

4. Измерение модели. Марку измерительного столика последовательно наводят на точки модели, включенные в маршрутную сеть. После каждого визирования накалывают точку на основе и отсчитывают по шкале высот. Модель измеряют двумя приемами. В каждом приеме на точки визируют дважды. За вероятнейшее положение точек принимают среднее из результатов двух приемов. Затем вертикальным измерителем определяют высоту передней узловой точки объектива каждого проектора относительно начальной точки, т. е. высоту фотографирования. С помощью уровня находят продольные и поперечные углы наклона снимков. Результаты измерения модели заносят в журнал.

Определяют превышения точек сети над начальной точкой

$$h = t(h' - h'_1), \tag{21.7}$$

где h' и h'_1 — отсчеты по шкале высот, соответствующие определяемой и данной начальной) точкам, t — знаменатель масштаба модели.

5. Редуцирование свободной сети заключается в переносе точек с основы на планшет. Оно выполняется оптическим или другими способами, применяемыми в графической фототриангуляции.

6. Определение геодезических высот точек местности. По превышениям точек сети относительно начальной находят их фотограмметрические высоты

$$Z = Z_{г1} + h, \tag{21.8}$$

где Z_1 — геодезическая высота начальной точки.

Вследствие влияния различных ошибок фотограмметрические высоты отличаются от геодезических. Поэтому при определении геодезических высот учитывают поправки за продольный и поперечный углы наклона модели, а также за ее прогиб и кручение. Высотная поправка за продольный наклон модели пропорциональна координате X определяемой точки, а поправка за поперечный наклон пропорциональна координате Y. Поправки за прогиб и кручение модели пропорциональны соответственно X^2 и XY. Поэтому высотные поправки находят по формуле

$$\delta Z = c_1 X + c_2 Y + c_3 X^2 + c_4 XY, \tag{21.9}$$

где c_1 и c_2 — продольный и поперечный углы наклона модели, выраженные в радианах, c_3 и c_4 — коэффициенты, характеризующие прогиб и кручение модели.

Каждая опорная точка, кроме начальной, дает одно уравнение (21.9), содержащее четыре неизвестных коэффициента. Следовательно, для определения этих коэффициентов необходимо иметь не менее пяти точек. Зная фотограмметрические и геодезические высоты опорных точек, составляют и решают систему уравнений (21.9).

Определив коэффициенты c_i, вычисляют по формуле (21.9) высотные поправки и вводят их в фотограмметрические высоты определяемых точек. Таким образом получают геодезические высоты этих точек.

Фототриангуляция на стереопроекторе. Фотограмметрические сети можно строить и на универсальных стереоприборах, содержащих только две проекти-

рующие камеры. Наиболее приспособлены для решения этой задачи приборы, снабженные устройствами для переключения осей визирования и установки положительных и отрицательных базисов. Если в универсальном приборе таких приспособлений нет, то маршрутные сети можно строить путем перестановки снимков или путем создания независимых моделей и соединения их в общую модель аналитическим способом.

Рассмотрим построение маршрутной сети на стереопроекторе способом перестановки снимков. Этот способ состоит в том, что после обработки на приборе каждой пары, например P_1—P_2, левый снимок P_1 удаляется и на его место переносится правый снимок P_2, который устанавливается по элементам, полученным в результате ориентирования пары P_1—P_2. На место снимка P_2 в правый снимкодержатель закладывается снимок P_3. Этот снимок ориентируется относительно снимка P_2, в результате чего получается вторая модель. По связующим точкам вторая модель приводится к масштабу первой. После измерения второй модели аналогично создается третья: левый снимок P_2 удаляется и на его место переносится правый снимок P_3, затем в правый снимкодержатель устанавливается снимок P_4, который ориентируется относительно снимка P_3, и т. д. При этом особое внимание обращается на сохранение элементов ориентирования при перестановке снимков, так как ошибки, допущенные в установке этих величин, нельзя обнаружить при построении ряда.

Основные процессы фототриангуляции на стереопроекторе:

1) подготовительные работы,
2) построение и измерение моделей,
3) вычисление геодезических координат точек сети.

1. Подготовительные работы включают составление проекта сети, рабочие поверки прибора, изготовление диапозитивов, выбор масштаба построения сети и составляющих первого базиса фотографирования.

Горизонтальный масштаб сети выбирают обычно в полтора раза крупнее масштаба снимка, чтобы уменьшить влияние инструментальных ошибок на точность фототриангулирования. Для этого фокусное расстояние $\overline{f}$ прибора устанавливают равным 270 мм. В данном случае вертикальный масштаб сети

$$\frac{1}{t_в} = \frac{270}{f t_г}, \tag{21.10}$$

где f — фокусное расстояние снимков в мм, а $t_г$ — знаменатель горизонтального масштаба сети.

Если разности высот точек местности значительны, то масштабы построения сети выбирают так, чтобы модель оказалась в пределах возможных перемещений по высоте верхней базисной каретки. Пусть на участке местности, изобразившемся на снимках одного или нескольких маршрутов, наибольшая и наименьшая высоты точек равны Z_{max} и Z_{min}. Тогда средняя высота фотографирования

$$H_{ср} = H_0 - \frac{1}{2}(Z_{max} - Z_{min}), \tag{21.11}$$

где H_0 — абсолютная высота фотографирования, $Z_{max} - Z_{min} = \Delta Z$ — диапазон изменения высот точек местности.

Очевидно, что величина $\Delta Z : t_в$ не должна превышать смещения h' верхней части базисной каретки вдоль оси Z прибора

$$\frac{1}{t_в}\Delta Z \leqslant h', \tag{21.12}$$

где ΔZ и h' должны быть выражены в м. Отсюда

$$\frac{1}{t_в} \leqslant \frac{h'}{\Delta Z}. \tag{21.13}$$

Выбрав вертикальный масштаб сети, находят фокусное расстояние

$$\overline{f} = D_c - \frac{1}{t_в} H_c \tag{21.14}$$

и устанавливают его в приборе. Здесь D_c — среднее значение разности высот верхнего и нижнего шарниров пространственного рычага.

Составляющая базиса

$$b_X = \frac{1}{t_г} B. \tag{21.15}$$

Составляющие базиса b_Y и b_Z для первой стереопары можно считать равными нулю, если маршрут короткий. Если же маршрут длинный, то их определяют, учитывая взаимное положение точек фотографирования в плане и по высоте, так, чтобы при построении сети центры проекции не вышли за пределы возможных движений b_Y и b_Z в приборе. Приближенное положение точек фотографирования в плане характеризуют, например, главные точки снимков на накидном монтаже.

2. Для построения первой модели левый снимок P_1 устанавливают в левый снимкодержатель, а правый P_2 — в правый снимкодержатель. Снимки центрируют. Устанавливают составляющие базиса b_X, $b_Y = b_Z = 0$, децентрации снимков $\Delta_x = \Delta_y = 0$ и децентрации коррекционных механизмов $\delta_x = \delta_y = 0$. Затем снимки ориентируют взаимно первым или вторым способом, как изложено в гл. 19. Если первая модель имеет опорные точки или урезы вод, то ее приближенно горизонтируют в поперечном направлении движениями d_{y1} и d_{y2}.

Построив первую модель, отсчитывают по шкалам и счетчикам величины, характеризующие ориентирование снимков, и записывают их в журнал. Затем измеряют двумя приемами координаты точек первой модели, входящих в сеть. Результаты измерений фиксируют в том же журнале. С целью контроля после измерения модели вновь отсчитывают элементы ориентирования снимков.

Построение второй модели начинают с установки в левой части прибора элементов ориентирования, которые получены для правого снимка первой стереопары. Левый снимкодержатель со снимком P_1 удаляют. На его место переносят правый снимкодержатель со снимком P_2. На правую каретку устанавливают снимкодержатель с центрированным на нем снимком P_3 второй пары. Затем устанавливают для снимка P_3 величины $d_x = d_y = 0$, децентрации $\Delta_x = \Delta_y = \delta_x = \delta_y = 0$ и взаимно ориентируют вторую пару вторым способом, т. е. движениями b_Y $\varkappa_п$, b_Z, $d_{x\,п}$, $d_{y\,п}$. При этом вводят децентрации правого снимка и правого коррекционного механизма.

Вторую модель приводят к масштабу первой по связующим точкам путем изменения установленной величины базиса фотографирования.

Далее фиксируют отсчеты, характеризующие ориентирование второй пары, и измеряют координаты точек второй модели, включенных в сеть. Аналогично строят третью и другие модели. В результате этих построений получают общую модель, имеющую единый масштаб и единую систему координат, начало которой обычно совмещают с опорной точкой, находящейся на первой стереопаре.

3. Геодезические координаты точек сети получают так:

— определяют масштаб модели и фотограмметрические координаты точек сети,

— вычисляют геодезические высоты точек,

— находят геодезические плановые координаты.

Знаменатель горизонтального масштаба модели

$$t_г = \frac{D_г}{D}, \tag{21.16}$$

где $D_г$ — расстояние между опорными точками на местности, D — расстояние между соответствующими точками на модели.

При этом

$$D_г = \sqrt{\Delta X_г^2 + \Delta Y_г^2 + \Delta Z_г^2}, \tag{21.17}$$

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \frac{1}{k^2}\Delta Z^2}, \tag{21.18}$$

где $\Delta X_г$, $\Delta Y_г$, $\Delta Z_г$ — разности геодезических координат опорных точек, ΔX, ΔY, ΔZ — разности координат соответствующих точек модели, k — коэффициент преобразования связки.

Фотограмметрические координаты точек сети

$$\left.\begin{aligned} X' &= t_г X \\ Y' &= t_г Y \\ Z' &= Z_{г1} + \frac{1}{k} Z \end{aligned}\right\}, \tag{21.19}$$

где X, Y, Z — координаты точки модели, $Z_{г1}$ — геодезическая высота начала системы координат XYZ.

Для вычисления геодезических высот сначала находят коэффициенты c_i, характеризующие наклон и искажение модели, а затем определяют поправки к фотограмметрическим высотам. Коэффициенты c_i находят по опорным точкам путем составления и решения уравнений (21.9).

$$\delta Z = c_1 X' + c_2 Y' + c_3 X'^2 + c_4 X' Y',$$

где X', Y', Z' — фотограмметрические координаты опорной точки, $\delta Z = Z_г - Z'$ — разность геодезической и фотограмметрической высот опорной точки.

Поправки к фотограмметрическим высотам определяемых точек сети вычисляют по формуле (21.9), используя фотограмметрические координаты этих точек.

Геодезическая высота точки сети

$$Z_г = Z' + \delta Z. \tag{21.20}$$

Вычисление геодезических плановых координат начинают с исправления координат X' и Y' за наклон модели

$$\left.\begin{aligned} X'' &= X' - Z'\xi - \frac{1}{2} X'\xi^2 \\ Y'' &= Y' - Z\eta \end{aligned}\right\}, \tag{21.21}$$

где $\xi = -c_1$ и $\eta = -c_2$ — продольный и поперечный углы наклона модели.

После введения поправок за наклон модели система координат $X''Y''Z''$ занимает горизонтальное положение. Теперь следует повернуть эту систему вокруг оси Z'', чтобы ее координатные оси были параллельны соответствующим осям геодезической системы координат. Угол поворота системы $X''Y''Z''$ можно вычислить по двум наиболее удаленным друг от друга опорным точкам (рис. 261)

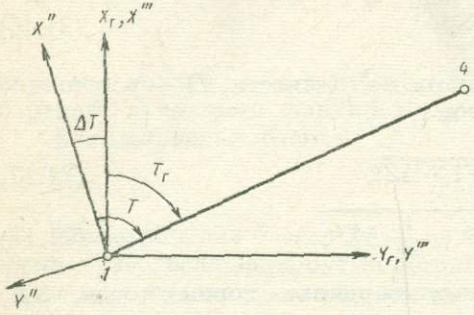


Рис. 261

$$\left.\begin{aligned} \Delta T &= T - T_г \\ \operatorname{tg} T_г &= \frac{\Delta Y_г}{\Delta X_г} \\ \operatorname{tg} T &= -\frac{\Delta Y''}{\Delta X''} \end{aligned}\right\}, \qquad (21.22)$$

где $T_г$ и T — дирекционные углы направления, проходящего через опорные точки, в геодезической и фотограмметрической системах координат, $\Delta X_г$, $\Delta Y_г$ и ΔX, ΔY — разности геодезических и разности фотограмметрических координат опорных точек.

Новые фотограмметрические координаты точек сети

$$\left.\begin{aligned} X''' &= X'' \cos \Delta T - Y'' \sin \Delta T \\ Y''' &= -X'' \sin \Delta T - Y'' \cos \Delta T \end{aligned}\right\}, \qquad (21.23)$$

а геодезические

$$\left.\begin{aligned} X_г &= X_{г1} + X''' \\ Y_г &= Y_{г1} + Y''' \end{aligned}\right\}, \qquad (21.24)$$

где $X_{г1}$ и $Y_{г1}$ — геодезические координаты начала фотограмметрической системы координат.

Точность фототриангуляции на стереопроекторе, стереографе и других универсальных приборах первого класса в 1,5—2 раза выше, чем на мультиплексе, а производительность во столько же раз меньше.

§ 151. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МАРШРУТНАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

Рассмотрим два наиболее распространенных способа аналитической маршрутной фототриангуляции. Первый способ основан на последовательном построении частично зависимых моделей и соединении их в общую модель. Второй способ позволяет сначала построить независимые модели, а затем соединить их в общую модель. Общая модель, полученная первым или вторым способом, ориентируется по опорным точкам и используется для вычисления геодезических координат определяемых точек.

Первый способ. Для построения первой модели произвольно выбирают элементы внешнего ориентирования левого снимка, т. е. первого снимка маршрута. Затем определяют элементы взаимного ориентирования первой стереопары и вычисляют дирекционный угол и угол наклона базиса фотографирования, а также элементы внешнего ориентирования второго снимка. При этом длину базиса фотографирования выбирают произвольно. Зная элементы ориентирования снимков и координаты соответственных точек стереопары, находят координаты точек первой модели путем решения прямых засечек. Аналогично создают вторую и последующие модели. Однако в качестве элемен-

тов внешнего ориентирования левого снимка второй (последующей) стереопары принимают не произвольные величины, а полученные в результате обработки первой (предыдущей) стереопары. Масштаб последующей модели отличается от масштаба предыдущей, так как длину базиса фотографирования выбирают *произвольно при построении каждой модели. Последующую модель приводят* к масштабу предыдущей по связующим точкам.Созданную таким образом общую модель ориентируют по опорным точкам, устраняя ее деформацию.

Элементы взаимного ориентирования пары снимков α_1', $\varkappa_1'$, α_2', ω_2', $\varkappa_2'$ определяют способом, изложенным в гл. 16.

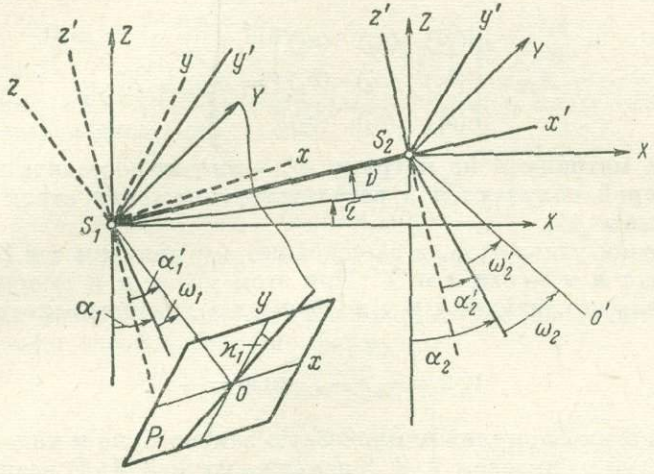


Рис. 262

Дирекционный угол и угол наклона базиса фотографирования найдем по угловым элементам внешнего ориентирования левого снимка α_1, ω_1, $\varkappa_1$ и элементам взаимного ориентирования α_1' и $\varkappa_1'$ (рис. 262).

Как известно, углы α_1, ω_1, $\varkappa_1$ определяют положение системы координат S_1xyz относительно системы S_1XYZ. Этим системам соответствует матрица

$$A_{\alpha_1\omega_1\varkappa_1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ b_{11} & b_{21} & b_{31} \\ c_{11} & c_{21} & c_{31} \end{bmatrix}, \tag{21.25}$$

коэффициенты которой можно найти по формулам (14.4), подставив в них α_1, ω_1, $\varkappa_1$ вместо α, ω, $\varkappa$.

Углы τ и ν получим по направляющим косинусам как углы Эйлера. Для этого систему координат S_1xyz установим в положение $S_1x'y'z'$, при котором ось x' совпадает с базисом фотографирования, а ось z' находится в главной базисной плоскости левого снимка S_1oS_2. Чтобы придать системе S_1xyz такое положение, повернем ее на углы α_1' и $\varkappa_1'$. Этим поворотам соответствует матрица

$$A'_{\alpha_1'\varkappa_1'} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}, \tag{21.26}$$

которая получается путем транспонирования матрицы

$$A_{\alpha_1'\varkappa_1'} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \tag{21.27}$$

Элементы этих матриц найдем по тем же формулам (14.4), считая $\omega = 0$ $\alpha = \alpha_1'$, $\varkappa = \varkappa_1'$.

Взаимное положение систем координат $S_1x'y'z'$ и S_1XYZ определяет матрица

$$A_{\tau\nu} = \begin{bmatrix} (a_1) & (a_2) & (a_3) \\ (b_1) & (b_2) & (b_3) \\ (c_1) & (c_2) & (c_3) \end{bmatrix} = A_{\alpha_2\omega_1\varkappa_1} A'_{\alpha_1'\varkappa_1'}. \tag{21.28}$$

Умножить матрицу A на матрицу A' — значит составить новую матрицу, элементы которой получаются в результате умножения строк матрицы A на столбцы матрицы A'.

При введении углов α, ω, $\varkappa$ за основные оси приняты z и Z, а при использовании углов τ и ν — оси x и X. При этом углам α и ω соответствуют $-\tau$ и $-\nu$. Учитывая это, найдем τ и ν по формулам, которые следуют из равенств (14.4)

$$\operatorname{tg}\alpha = -\frac{a_3}{c_3}, \quad \sin\omega = -b_3. \tag{21.29}$$

Сделаем в этих формулах циклическую замену букв и индексов: a заменим на b, b на c,c, на a; индексы 1, 2, 3 заменим на 2, 3, 1. В результате получим

$$\operatorname{tg}\tau = \frac{(b_1)}{(a_1)}, \quad \sin\nu = (c_1). \tag{21.30}$$

Если угловые элементы ориентирования снимков малы, то эти формулы можно представить в виде

$$\left.\begin{aligned} \tau &= \varkappa_1 - \varkappa_1' + \omega_1\alpha_1' \\ \nu &= \alpha_1 - \alpha_1' + \omega_1(\varkappa_1 - \varkappa_1') \end{aligned}\right\}. \tag{21.31}$$

Угловые элементы внешнего ориентирования правого снимка α_2 ω_2, $\varkappa_2$ найдем по угловым элементам внешнего ориентирования левого снимка α_1, ω_1, $\varkappa_1$ и элементам взаимного ориентирования α_1', $\varkappa_1'$, α_2', ω_2', $\varkappa_2'$.

Перенесем систему координат $S_1x'y'z'$ параллельно из левого конца базиса S_1 в правый S_2 и повернем ее на углы α_2', ω_2', $\varkappa_2'$ (см. рис. 262). Тогда она совпадет с системой S_2xyz правого снимка. При этом ось z будет совмещена с главным лучом S_2o' правой связки. Положение системы координат S_2xyz относительно S_2XYZ определяет матрица

$$A_{\alpha_2\omega_2\varkappa_2} = A_{\tau\nu} A_{\alpha_2'\omega_2'\varkappa_2'}, \tag{21.32}$$

где

$$A_{\alpha_2'\omega_2'\varkappa_2'} = \begin{bmatrix} a_1' & a_2' & a_3' \\ b_1' & b_2' & b_3' \\ c_1' & c_2' & c_3' \end{bmatrix}. \tag{21.33}$$

Элементы этой матрицы найдем по формулам (14.4), подставив α_2', ω_2', $\varkappa_2'$ вместо α, ω, $\varkappa$.

Учитывая (21.28), напишем

$$A_{\alpha_2\omega_2\varkappa_2} = A_{\alpha_1\omega_1\varkappa_1} A'_{\alpha_1'\varkappa_1'} A_{\alpha_2'\omega_2'\varkappa_2'} = \begin{bmatrix} a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} \\ c_{12} & c_{22} & c_{32} \end{bmatrix}. \tag{21.34}$$

Теперь можно применить формулы (21.29) и получить

$$\operatorname{tg} a_2 = -\frac{a_{32}}{c_{32}}, \quad \sin\omega_2 = -b_{32}, \quad \operatorname{tg}\varkappa_2 = \frac{b_{12}}{b_{22}}. \tag{21.35}$$

Если угловые элементы ориентирования снимков малы, то эти формулы можно представить в виде

$$\left.\begin{aligned} \alpha_2 &= \alpha_1 + \alpha_2' - \alpha_1' - (\varkappa_1 - \varkappa_1')\,\omega_2' \\ \omega_2 &= \omega_1 + \omega_2' + (\varkappa_1 - \varkappa_1')(\alpha_2' - \alpha_1') \\ \varkappa_2 &= \varkappa_1 + \varkappa_2' - \varkappa_1' - \omega_1(\alpha_2' - \alpha_1') \end{aligned}\right\}. \tag{21.36}$$

Приращения фотограмметрических координат правой точки фотографирования относительно левой найдем по формулам

$$\left.\begin{aligned} B_X &= B\cos\nu\cos\tau \\ B_Y &= B\cos\nu\sin\tau \\ B_Z &= B\sin\nu \end{aligned}\right\}, \tag{21.37}$$

где B — базис фотографирования.

Координаты правой точки фотографирования получим так:

$$\left.\begin{aligned} X_{S_2} &= Y_{S_1} + B_X \\ Y_{S_2} &= Y_{S_1} + B_Y \\ Z_{S_2} &= Z_{S_1} + B_Z \end{aligned}\right\}. \tag{21.38}$$

Для построения модели приведем координаты соответственных точек стереопары к горизонтальным снимкам. Согласно (14.18)

$$\left.\begin{aligned} x_1^0 &= -f\frac{X_1'}{Z_1'}; \quad x_2^0 = -f\frac{X_2'}{Z_2'} \\ y_1^0 &= -f\frac{Y_1'}{Z_1'}; \quad y_2^0 = -f\frac{Y_2'}{Z_2'} \end{aligned}\right\}, \tag{21.39}$$

где X_1', Y_1', Z_1' — пространственные координаты точки левого снимка, вычисленные по формулам (14.5) как функции плоских координат x_1, y_1 и элементов a_{i1}, b_{i1}, c_{i1} матрицы (21.25); X_2', Y_2', Z_2' — пространственные координаты точки правого снимка, вычисленные по формулам (14.5) как функции плоских координат x_2, y_2 и элементов a_{i2}, b_{i2}, c_{i2} матрицы (21.34).

Теперь вычислим приращения координат каждой точки модели относительно левой точки фотографирования. Для этого преобразуем формулы (14.5)

и (14.13). Учитывая, что в данном случае $X_0 = B_X$ и $Z_0 = B_Z$, $X' = x^0$, $Y' = y^0$, $Z' = -f$ ($x_0 = y_0 = 0$), получим

$$\Delta X = Nx_1^0;\ \Delta Y = Ny_1^0;\ \Delta Z = -Nf; \tag{21.40}$$

$$N = \frac{Z_0X_2' - X_0Z_2'}{Z_1'X_2' - X_1'Z_2'} = \frac{B_X + \frac{x_2^0}{f}B_Z}{x_1^0 - x_2^0}. \tag{21.41}$$

Фотограмметрические координаты точек модели найдем по формулам

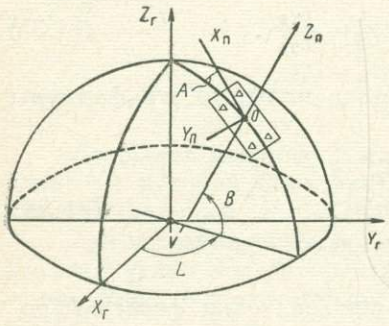


Рис. 263

$$\left.\begin{aligned} X &= X_{S_1} + \Delta X \\ Y &= Y_{S_1} + \Delta Y \\ Z &= Z_{S_1} + \Delta Z \end{aligned}\right\}. \tag{21.42}$$

Аналогично построим вторую модель по второй стереопаре.

Для приведения второй модели к масштабу первой найдем масштабный коэффициент

$$k = \frac{D}{D'}, \tag{21.43}$$

где D и D' — расстояния от точки фотографирования S_2 до связующей точки на первой и второй моделях (см. рис. 259).

Эти расстояния вычисляют по разностям координат связующей точки и точки S_2.

Масштабный коэффициент определяют обычно по центральной и двум боковым связующим точкам. В качестве вероятнейшего значения этой величины берут среднее весовое.

Координаты точки фотографирования S_3 и всех точек второй модели в системе координат первой модели найдем по формулам

$$\left.\begin{aligned} X_{S_3} &= X_{S_2} + kB_X; \quad X = X_{S_2} + k\Delta X \\ Y_{S_3} &= Y_{S_2} + kB_Y; \quad Y = Y_{S_2} + k\Delta Y \\ Z_{S_3} &= Z_{S_2} + kB_Z; \quad Z = Z_{S_2} + k\Delta Z \end{aligned}\right\}. \tag{21.44}$$

Аналогично построим и приведем к масштабу третью и остальные модели. В результате получим модель маршрута, имеющую одинаковый масштаб и единую систему координат.

Теперь перейдем к внешнему ориентированию маршрутной сети по опорным точкам.

Положение точек местности определяется обычно в системе координат Гаусса. Начало и направления координатных осей этой системы устанавливают отдельно для каждой зоны. Однако фототриангуляционная сеть может иметь значительную длину и располагаться в нескольких зонах. Для внешнего ориентирования такой сети необходимо определить положение опорных точек в единой системе координат. В качестве такой системы используют систему геоцентрических координат $X_г Y_г Z_г$ с началом в центре земного эллипсоида (рис. 263).

Переход от координат Гаусса к геоцентрическим координатам опорных точек выполняют по формулам, известным из курса высшей геодезии. При этом

сначала вычисляют геодезические координаты L, B, H, а затем геоцентрические $X_г$, $Y_г$, $Z_г$.

При внешнем ориентировании модели исключаются деформации ее, возникшие в процессе построения сети. Поправки за деформацию вводятся обычно с помощью полиномов, для применения которых необходимо, чтобы фотограмметрическая и геоцентрическая системы были приблизительно параллельны. В общем случае это невозможно. Поэтому используем промежуточную систему координат $X_п Y_п Z_п$, установив ее так, чтобы координаты опорных точек в этой системе отличались возможно меньше от фотограмметрических. Затем найдем элементы ориентирования модели относительно промежуточной системы координат и вычислим координаты определяемых точек в этой системе. Используя полиномы, внесем поправки в вычисленные координаты за деформацию модели. От исправленных координат точек в промежуточной системе перейдем к геоцентрическим, а затем к координатам Гаусса.

За начало промежуточной системы примем центр тяжести опорных точек. Координаты его

$$\left.\begin{aligned} L_0 &= \frac{\sum L}{n}; \quad X_{г0} = \frac{\sum X_г}{n} \\ B_0 &= \frac{\sum B}{n}; \quad Y_{г0} = \frac{\sum Y_г}{n} \\ H_0 &= \frac{\sum H}{n}; \quad Z_{г0} = \frac{\sum Z_г}{n} \end{aligned}\right\}, \tag{21.45}$$

где n — число опорных точек. Ось Z совместим с нормалью к эллипсоиду, а ось X направим так, чтобы ее азимут A был приблизительно равен азимуту оси X фотограмметрической системы координат. Направляющие косинусы, характеризующие ориентирование промежуточной системы координат относительно геоцентрической, обозначим через a_{i0}, b_{i0}, c_{i0} и найдем их по формулам

$$\left.\begin{aligned} a_{10} &= -\cos L_0 \sin B_0 \cos A_0 - \sin A_0 \sin L_0 \\ a_{20} &= -\cos L_0 \sin B_0 \sin A_0 - \sin L_0 \cos A_0 \\ a_{30} &= \cos L_0 \cos B_0 \\ b_{10} &= -\sin L_0 \sin B_0 \cos A_0 - \cos L_0 \sin A_0 \\ b_{20} &= -\sin L_0 \sin B_0 \sin A_0 - \cos L_0 \cos A_0 \\ b_{30} &= \sin L_0 \cos B_0 \\ c_{10} &= \cos B_0 \cos A_0 \\ c_{20} &= \cos B_0 \sin A_0 \\ c_{30} &= \sin B_0 \end{aligned}\right\}. \tag{21.46}$$

По геоцентрическим координатам опорных точек вычислим координаты их в промежуточной системе

$$\left.\begin{aligned} X_п &= a_{10}(X_г - X_{г0}) + b_{10}(Y_г - Y_{г0}) + c_{10}(Z_г - Z_{г0}) \\ Y_п &= a_{20}(X_г - X_{г0}) + b_{20}(Y_г - Y_{г0}) + c_{20}(Z_г - Z_{г0}) \\ Z_п &= a_{30}(X_г - X_{г0}) + b_{30}(Y_г - Y_{г0}) + c_{30}(Z_г - Z_{г0}) \end{aligned}\right\}. \tag{21.47}$$

Начало фотограмметрических координат перенесем также в центр тяжести опорных точек. Координаты его

$$\left.\begin{aligned} X_0 &= \frac{\sum X}{n} \\ Y_0 &= \frac{\sum Y}{n} \\ Z_0 &= \frac{\sum Z}{n} \end{aligned}\right\}. \tag{21.48}$$

Новые значения фотограмметрических координат

$$\left.\begin{aligned} X' &= X - X_0 \\ Y' &= Y - Y_0 \\ Z' &= Z - Z_0 \end{aligned}\right\}. \tag{21.49}$$

Найдем масштабный коэффициент по опорным точкам

$$r = \frac{D_\Gamma}{D'} = \frac{\sqrt{\Delta X_\Gamma^2 + \Delta Y_\Gamma^2 + \Delta Z_\Gamma^2}}{\sqrt{\Delta X'^2 + \Delta Y'^2 + \Delta Z'^2}}. \tag{21.50}$$

Величину r получим по нескольким парам опорных точек. Вероятнейшее значение ее выведем как среднее весовое и используем для приведения фотограмметрической сети к масштабу промежуточной системы

$$\left.\begin{aligned} X'' &= X'r \\ Y'' &= Y'r \\ Z'' &= Z'r \end{aligned}\right\}. \tag{21.51}$$

Полагая, что модель подобна местности, найдем элементы ориентирования ее $X_{\text{п}0}$, $Y_{\text{п}0}$, $Z_{\text{п}0}$, ξ, η, θ, t относительно промежуточной системы координат. Эту задачу решим по опорным точкам, применив способ, изложенный в гл. 17.

Затем вычислим координаты определяемых точек сети в промежуточной системе

$$\left.\begin{aligned} X_{\text{п}} &= X_{\text{п}0} + (a_1X'' + a_2Y'' - a_3Z'')\,t \\ Y_{\text{п}} &= Y_{\text{п}0} + (b_1X'' + b_2Y'' + b_3Z'')\,t \\ Z_{\text{п}} &= Z_{\text{п}0} + (c_1X'' + c_2Y'' + c_3Z'')\,t \end{aligned}\right\}, \tag{21.52}$$

где a_i, b_i, c_i — направляющие косинусы, полученные по формулам (14.4), в которых углы α, ω, $\varkappa$ заменяются на ξ, η, θ.

Используя полиномы, найдем исправленные за деформацию модели координаты определяемых точек в промежуточной системе

$$\left.\begin{aligned} X'_{\text{п}} &= X_{\text{п}} + A_0 + A_1X_{\text{п}} + A_2Y_{\text{п}} + A_3X_{\text{п}}Y_{\text{п}} + A_4X_{\text{п}}^2 + A_5X_{\text{п}}^3 \\ Y'_{\text{п}} &= Y_{\text{п}} + B_0 + B_1X_{\text{п}} + B_2Y_{\text{п}} + B_3X_{\text{п}}Y_{\text{п}} + B_4X_{\text{п}}^2 + B_5X_{\text{п}}^3 \\ Z'_{\text{п}} &= Z_{\text{п}} + C_0 + C_1X_{\text{п}} + C_2Y_{\text{п}} + C_3X_{\text{п}}Y_{\text{п}} + C_4X_{\text{п}}^2 + C_5X_{\text{п}}^3 \end{aligned}\right\}. \tag{21.53}$$

Коэффициенты A_i, B_i, C_i получим по опорным точкам, составив и решив уравнения

$$\left.\begin{aligned} A_0+X_\text{п}A_1+Y_\text{п}A_2+X_\text{п}Y_\text{п}A_3+X_\text{п}^2A_4+X_\text{п}^3A_5+X_\text{п}-X'_\text{п}=v_X\\ B_0+X_\text{п}B_1+Y_\text{п}B_2+X_\text{п}Y_\text{п}B_3+X_\text{п}^2B_4+X_\text{п}^3B_5+Y_\text{п}-Y'_\text{п}=v_Y\\ C_0+X_\text{п}C_1+Y_\text{п}C_2+X_\text{п}Y_\text{п}C_3+X_\text{п}^2C_4+X_\text{п}^3C_5+Z_\text{п}-Z'_\text{п}=v_Z \end{aligned}\right\}. \quad (21.54)$$

Каждая опорная точка позволяет составить три уравнения (21.54) с 18 неизвестными. Следовательно, для определения неизвестных A_i, B_i, C_i необходимо иметь не менее шести опорных точек.

От исправленных координат определяемых точек сети в промежуточной системе перейдем к геоцентрическим координатам

$$\left.\begin{aligned} X_\text{г}=X_\text{г0}+a_1X'_\text{п}+a_2Y'_\text{п}+a_3Z'_\text{п}\\ Y_\text{г}=Y_\text{г0}+b_1X'_\text{п}+b_2Y'_\text{п}+b_3Z'_\text{п}\\ Z_\text{г}=Z_\text{г0}+c_1X'_\text{п}+c_2Y'_\text{п}+c_3Z'_\text{п} \end{aligned}\right\}. \quad (21.55)$$

Наконец, по геоцентрическим координатам получим геодезические координаты L, B, H, а затем координаты Гаусса определяемых точек сети.

Если маршрут короткий, то при внешнем ориентировании его нет необходимости применять геоцентрическую систему. В этом случае можно использовать только систему координат Гаусса, учитывая, что эта система левая, а система фотограмметрических координат правая. Кроме того, после приведения сети к масштабу фотограмметрические высоты точек необходимо исправить за влияние кривизны Земли

$$Z'=Z+\frac{D^2}{2R}, \quad (21.56)$$

где D — расстояние от середины сети до точки, R — радиус Земли.

Второй способ аналитической маршрутной фототриангуляции основан, как отмечено выше, на построении по стереопарам независимых моделей и соединении их в общую модель. Для построения каждой независимой модели измеряют координаты точек стереопары, включенных в фотограмметрическую сеть, определяют элементы взаимного ориентирования снимков и вычисляют координаты точек модели. Созданные таким образом одиночные модели соединяют в общую модель по связующим точкам. По этим точкам находят элементы ориентирования последующей модели относительно предыдущей. Зная эти элементы, вычисляют координаты точек последующей модели в системе координат, принятой при построении предыдущей модели. Поэтому общая модель имеет единую систему координат, принятую при построении первой модели. Общая модель ориентируется по опорным точкам относительно геодезической системы координат.

Для построения одиночной модели используется система координат, ось X которой совмещена с базисом фотографирования, а плоскость XZ — с главной базисной плоскостью левого снимка (см. рис. 199). Элементы взаимного ориентирования снимков — α'_1, $\varkappa'_1$, α'_2, ω'_2, $\varkappa'_2$ определяются способом, изложенным в гл. 16.

Фотограмметрические координаты точек модели вычисляют по трансформированным координатам x_1^0, y_1^0 и x_2^0, y_2^0 точек стереопары, применяя формулы (14.6),

$$X=B\frac{x_1^0}{p^0};\quad Y=B\frac{y_1^0}{p^0};\quad Z=-B\frac{f}{p^0},$$

где $p^0 = x_1^0 - x_2^0$. При этом длина базиса фотографирования выбирается произвольно для каждой стереопары, т. е. каждая модель строится в произвольном масштабе. Величины x^0 и y^0 вычисляют по формулам (14.18). Направляющие косинусы находят по формулам (14.4): для левого снимка по элементам взаимного ориентирования α_1', $\omega_1' = 0$, $\varkappa_1'$, а для правого по α_2', ω_2', $\varkappa_2'$.

Вторую модель присоединяют к первой следующим образом.

Пусть X, Y, Z — координаты связующей точки в системе S_1XYZ первой модели, а X', Y', Z' — координаты соответствующей точки второй модели в системе $S_2X'Y'Z'$ (рис. 264). Элементами ориентирования второй модели относительно первой служат: координаты точки S_2 в системе S_1XYZ, т. е. величины X_0, Y_0, Z_0; углы ξ, η, θ, определяющие направления осей координат системы $S_2X'Y'Z'$ относительно S_1XYZ, и масштабный коэффициент t.

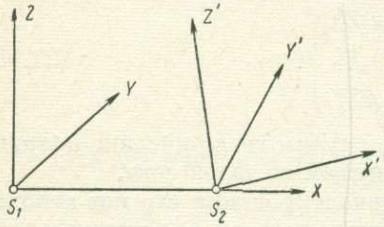


Рис. 264

Пусть известны приближенные значения этих элементов. Можно считать, что для плановых снимков начальные приближения углов ξ, η, θ равны нулю. Приближенные значения $X_0 = B$, $Y_0 = Z_0 = 0$, а t найдем как отношение соответственных отрезков D и D' для какой-либо связующей точки.

Используем способ внешнего ориентирования модели, изложенный в гл. 17. Составим уравнения поправок (17.6) для связующих точек. Решив эти уравнения, найдем вероятнейшие значения элементов ориентирования второй модели относительно первой. Очевидно, что в данном случае вместо геодезических координат $X_г$, $Y_г$, $Z_г$ нужно использовать координаты связующих точек в системе первой модели — S_1XYZ.

Координаты точек второй модели в системе координат первой модели вычислим по формулам (17.1). Аналогично определяют координаты точек третьей и других моделей в системе координат первой модели.

Построенную таким образом общую модель ориентируют относительно геодезической системы координат методом, изложенным выше для первого способа маршрутной фототриангуляции.

Точность и производительность рассмотренных в этом параграфе двух способов маршрутной фототриангуляции практически одинаковы.

Элементарным звеном маршрутной сети в этих способах служит одиночная модель, построенная по стереопаре. Во втором способе элементарным звеном может быть и двойная модель, созданная по двум смежным стереопарам, т. е. по трем снимкам (триплет).

В качестве элементарного звена можно использовать и одиночный снимок или связку лучей. В этом случае общая модель строится одновременно по всем снимкам данного маршрута. Такой способ построения маршрутной сети является частным случаем блочной фототриангуляции, излагаемой в следующем параграфе.

§ 152. АНАЛИТИЧЕСКАЯ БЛОЧНАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

Рассмотрим строгий способ блочной фототриангуляции, позволяющий произвести одновременно построение и уравнивание многомаршрутной сети с использованием фотограмметрических и геодезических измерений, а также элементов внешнего ориентирования снимков, зафиксированных во время полета носителя фотоаппарата, т. е. результатов бортовых измерений.

Построение и уравнивание блочной сети выполняется в прямоугольной, например геоцентрической, системе координат под условием $[pv^2] = \min$, где p — веса измеренных величин, а v — поправки к результатам измерений.

Элементарным звеном сети служит снимок или квазиснимок. Для построения блочной сети необходима вычислительная машина большой мощности. С целью использования машины средней мощности большой блок можно разбить на подблоки. В этом случае подблоки создаются по снимкам, а блок — по квазиснимкам, что позволяет применить один и тот же математический аппарат как для построения подблоков, так и для объединения их в блок. Квазиснимки получаются аналитически и представляют собой центральные проекции подблоков [27].

Пусть известны приближенные значения элементов внешнего ориентирования снимков и координат определяемых точек местности. Тогда построение и уравнивание блочной фототриангуляции можно свести к составлению и решению уравнений, содержащих в качестве неизвестных поправки к приближенным значениям элементов внешнего ориентирования снимков и координат определяемых точек, а также поправки к фотограмметрическим, геодезическим и бортовым измерениям.

Уравнения поправок для фотограмметрических измерений. К фотограмметрическим измерениям относится получение координат точек снимков. Используя формулы (14.17), представим координаты точки снимка в виде функций неизвестных

$$\left.\begin{aligned} x_{ij} &= -f\frac{a_{1i}(X_j - X_{S_i}) + b_{1i}(Y_j - Y_{S_i}) + c_{1i}(Z_j - Z_{S_i})}{a_{3i}(X_j - X_{S_i}) + b_{3i}(Y_j - Y_{S_i}) + c_{3i}(Z_j - Z_{S_i})} \\ y_{ij} &= -f\frac{a_{2i}(X_j - X_{S_i}) + b_{2i}(Y_j - Y_{S_i}) + c_{2i}(Z_j - Z_{S_i})}{a_{3i}(X_j - X_{S_i}) + b_{3i}(Y_j - Y_{S_i}) + c_{3i}(Z_j - Z_{S_i})} \end{aligned}\right\}, \qquad (21.57)$$

где x_{ij}, y_{ij} — координаты точки j на снимке i (начало координат — в главной точке), X_j, Y_j, Z_j — координаты соответствующей точки местности, f — фокусное расстояние аэрофотоаппарата, X_{S_i}, Y_{S_i}, Z_{S_i} — координаты точки фотографирования снимка i, a, b, c — направляющие косинусы, зависящие от угловых элементов внешнего ориентирования α_i, ω_i и $\varkappa_i$ и вычисляемые по формулам (14.4).

Пусть

$$X^0_{S_i},\ Y^0_{S_i},\ Z^0_{S_i},\ \alpha^0_i,\ \omega^0_i,\ \varkappa^0_i,\ X^0_j,\ Y^0_j,\ Z^0_j$$

— приближенные значения элементов внешнего ориентирования снимка i и координат точки j, а

$$\delta X_{S_i},\ \delta Y_{S_i},\ \delta Z_{S_i},\ \delta\alpha_i,\ \delta\omega_i,\ \delta\varkappa_i,\ \delta X_j,\ \delta Y_j,\ \delta Z_j$$

— поправки к ним. Тогда уравнения (21.57) можно привести к линейному виду

$$\left.\begin{aligned} &a_{ij}\delta X_{S_i} + b_{ij}\delta Y_{S_i} + c_{ij}\delta Z_{S_i} + d_{ij}\delta\alpha_i + e_{ij}\delta\omega_i + f_{ij}\delta\varkappa_i + g_{ij}\delta X_j + \\ &\qquad + h_{ij}\delta Y_j + i_{ij}\delta Z_j + l_{ij} = v_{ij} \\ &a'_{ij}\delta X_{S_i} + b'_{ij}\delta Y_{S_i} + c'_{ij}\delta Z_{S_i} + d'_{ij}\delta\alpha_i + e'_{ij}\delta\omega_i + f'_{ij}\delta\varkappa_i + g'_{ij}\delta X_j + \\ &\qquad + h'_{ij}\delta Y_j + i'_{ij}\delta Z_j + l'_{ij} = v_{ij} \end{aligned}\right\}, \qquad (21.58)$$

где a_{ij}, b_{ij}, . . . , i'_{ij} — частные производные от функций (21.57) по соответствующим переменным, а l_{ij} и l'_{ij} — свободные члены, равные разностям вычисленных по формулам (21.57) и измеренных координат точки j на снимке i —

$$\left.\begin{aligned} l_{ij} &= (x_{ij}) - x_{ij} \\ l'_{ij} &= (y_{ij}) - y_{ij} \end{aligned}\right\}. \tag{21.59}$$

Производные a_{ij}, b_{ij}, . . . , f_{ij} и a'_{ij}, b'_{ij}, . . . , f'_{ij} находятся по формулам (20.1), а остальные производные имеют следующие значения:

$$\left.\begin{aligned} g_{ij} &= \frac{\partial x_{ij}}{\partial X_j} = -\frac{1}{Z^*_{ij}}(a_{1i}f + a_{3i}x_{ij}) \\ h_{ij} &= \frac{\partial x_{ij}}{\partial Y_j} = -\frac{1}{Z^*_{ij}}(b_{1i}f + b_{3i}x_{ij}) \\ i_{ij} &= \frac{\partial x_{ij}}{\partial Z_j} = -\frac{1}{Z^*_{ij}}(c_{1i}f + c_{3i}x_{ij}) \\ g'_{ij} &= \frac{\partial y_{ij}}{\partial X_j} = -\frac{1}{Z^*_{ij}}(a_{2i}f + a_{3i}y_{ij}) \\ h'_{ij} &= \frac{\partial y_{ij}}{\partial Y_j} = -\frac{1}{Z^*_{ij}}(b_{2i}f + b_{3i}y_{ij}) \\ i'_{ij} &= \frac{\partial y_{ij}}{\partial Z_j} = -\frac{1}{Z^*_{ij}}(c_{2i}f + c_{3i}y_{ij}) \end{aligned}\right\}, \tag{21.60}$$

где Z^* — знаменатель в равенствах (21.57).

Введем обозначения:

$$\left.\begin{aligned} \bar{B}'_{ij} &= \begin{bmatrix} a_{ij} & b_{ij} & c_{ij} & d_{ij} & e_{ij} & f_{ij} \\ a'_{ij} & b'_{ij} & c'_{ij} & d'_{ij} & e'_{ij} & f'_{ij} \end{bmatrix} \\ \bar{B}''_{ij} &= \begin{bmatrix} g_{ij} & h_{ij} & i_{ij} \\ g'_{ij} & h'_{ij} & i'_{ij} \end{bmatrix} \\ \bar{\delta}_i &= \begin{bmatrix} \delta X_{S_i} \\ \delta Y_{S_i} \\ \delta Z_{S_i} \\ \delta\alpha_i \\ \delta\omega_i \\ \delta\varkappa_i \end{bmatrix}, \qquad \bar{\delta}'_j = \begin{bmatrix} \delta X_j \\ \delta Y_j \\ \delta Z_j \end{bmatrix} \\ \bar{l}_{ij} &= \begin{bmatrix} l_{ij} \\ l'_{ij} \end{bmatrix}, \qquad \bar{v}_{ij} = \begin{bmatrix} v_{ij} \\ v'_{ij} \end{bmatrix} \end{aligned}\right\}. \tag{21.61}$$

Тогда уравнения поправок (21.58) можно представить в матричной форме

$$\bar{B}'_{ij}\bar{\delta}_i + \bar{B}''_{ij}\bar{\delta}_j + \bar{l}_{ij} = \bar{v}_{ij}. \tag{21.62}$$

Пусть точка j изобразилась на m снимках. В этом случае получим уравнения

$$\begin{bmatrix} \overline{B}'_{1j} & 0 \dots 0 \\ 0 & \overline{B}'_{2j} \dots 0 \\ \cdot & \\ \cdot & \\ \cdot & \\ 0 & 0 \dots \overline{B}'_{mj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}_1 \\ \bar{\delta}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{\delta}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{B}''_{1j} \\ \overline{B}''_{2j} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \overline{B}''_{mj} \end{bmatrix} \bar{\delta}_j + \begin{bmatrix} \bar{l}_{1j} \\ \bar{l}_{2j} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{l}_{mj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_{1j} \\ \bar{v}_{2j} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{v}_{mj} \end{bmatrix}. \tag{21.63}$$

Запишем их так:

$$\overline{B}'_j\bar{\delta} + \overline{B}''_j\bar{\delta}_j + \bar{l}_j = \bar{v}_j. \tag{21.64}$$

Пусть в блоке k определяемых точек. Тогда можно составить систему уравнений

$$\begin{bmatrix} \overline{B}'_1 \\ \overline{B}'_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \overline{B}'_k \end{bmatrix} \bar{\delta} + \begin{bmatrix} \overline{B}''_1 & 0 \dots 0 \\ 0 & \overline{B}''_2 \dots 0 \\ \cdot & \\ \cdot & \\ \cdot & \\ 0 & 0 \dots \overline{B}''_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}_1 \\ \bar{\delta}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{\delta}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{l}_1 \\ \bar{l}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{l}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{v}_k \end{bmatrix}. \tag{21.65}$$

Представим эти уравнения в виде

$$\overline{B}'\bar{\delta}' + \bar{l}' = \bar{v}'. \tag{21.66}$$

Это выражение содержит все уравнения поправок для фотограмметрических измерений.

Уравнения поправок для геодезических измерений. Для внешнего ориентирования блочной фототриангуляции можно использовать координаты опорных точек, превышения точек местности, расстояния между точками на местности и другие геодезические измерения.

Уравнения поправок для координат опорных точек. Пусть X_j, Y_j, Z_j — истинные координаты опорной точки j. Обозначим через X'_j, Y'_j, Z'_j измеренные координаты, а через X^0_j, Y^0_j, Z^0_j — приближенные значения координат этой точки. Тогда

$$\left.\begin{aligned} X_j &= X'_j + v_{X_j} = X^0_j + \delta X_j \\ Y_j &= Y'_j + v_{Y_j} = Y^0_j + \delta Y_j \\ Z_j &= Z'_j + v_{Z_j} = Z^0_j + \delta Z_j \end{aligned}\right\}, \tag{21.67}$$

где v_{X_j}, v_{Y_j}, v_{Z_j} — поправки к измеренным координатам и δX_j, δY_j, δZ_j — поправки к приближенным координатам.

Таким образом, получаем следующие уравнения поправок:

$$\left.\begin{aligned} \delta X_j + X^0_j - X'_j &= v_{X_j} \\ \delta Y_j + Y^0_j - Y'_j &= v_{Y_j} \\ \delta Z_j + Z^0_j - Z'_j &= v_{Z_j} \end{aligned}\right\} \tag{21.68}$$

или в матричной форме

$$\bar{\delta}_j + \bar{l}_j = \bar{v}_j, \tag{21.69}$$

где

$$\bar{\delta}_j = \begin{bmatrix} \delta X_j \\ \delta Y_j \\ \delta Z_j \end{bmatrix}, \quad \bar{l}_j = \begin{bmatrix} X_j^0 - X_j' \\ Y_j^0 - Y_j' \\ Z_j^0 - Z_j' \end{bmatrix}, \quad \bar{v}_j = \begin{bmatrix} v_{X_j} \\ v_{Y_j} \\ v_{Z_j} \end{bmatrix}. \tag{21.70}$$

Напишем уравнения поправок для t опорных точек

$$\begin{bmatrix} \bar{\delta}_1 \\ \bar{\delta}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{\delta}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{l}_1 \\ \bar{l}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{l}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{v}_t \end{bmatrix} \tag{21.71}$$

и представим их в обобщенном виде

$$\bar{\delta} + \bar{l} = \bar{v}. \tag{21.72}$$

Уравнения поправок для превышений точек местности. Пусть H_k и H_i — истинные высоты точек местности k и i соответственно. Тогда истинное превышение этих точек

$$h_{ik} = H_i - H_k. \tag{21.73}$$

Пусть h_{ik} — измеренное превышение. Тогда

$$h_{ik} = h_{ik}' + v_{ik}, \tag{21.74}$$

где v_{ik} — поправка к измеренному превышению.

Следовательно,

$$H_i - H_k - h_{ik}' = v_{ik}. \tag{21.75}$$

Обозначим через H_k^0 и H_i^0 приближенные высоты точек k и i, а через δH_k и δH_i — поправки к ним. Очевидно,

$$\left.\begin{aligned} H_i &= H_i^0 + \delta H_i \\ H_k &= H_k^0 + \delta H_k \end{aligned}\right\}. \tag{21.76}$$

Подставим эти значения H_i и H_k в выражение (21.75)

$$\delta H_i - \delta H_k + H_i^0 - H_k^0 - h_{ik} = v_{ik}, \tag{21.77}$$

Теперь приведем поправки δH_i и δH_k к прямоугольной системе координат. Для этого используем зависимость между высотой точки и ее геоцентрическими координатами X, Y, Z:

$$H = F(X, Y, Z). \tag{21.78}$$

Отсюда

$$\delta H = a\,\delta X + b\,\delta Y + c\,\delta Z, \tag{21.79}$$

где a, b, c — частные производные от функции (21.78) по соответствующим переменным.

Следовательно,

$$\left.\begin{aligned}\delta H_i &= a_i \delta X_i + b_i \delta Y_i + c_i \delta Z_i \\ \delta H_k &= a_k \delta X_k + b_k \delta Y_k + c_k \delta Z_k\end{aligned}\right\}. \tag{21.80}$$

Подставим эти значения δH_i и δH_k в равенство (21.77)

$$a_i \delta X_i + b_i \delta Y_i + c_i \delta Z_i - a_k \delta X_k - b_k \delta Y_k - c_k \delta Z_k + H_i^0 + H_k^0 - h'_{ik} = v_{ik}. \tag{21.81}$$

Запишем это уравнение в матричной форме

$$\overline{B}_{h_{ik}} \overline{\delta} + l_{h_{ik}} = v_{ik}, \tag{21.82}$$

где $B_{h_{ik}}$ — матрица коэффициентов, а

$$l_{h_{ik}} = H_i^0 - H_k^0 - h_{ik}. \tag{21.83}$$

Пусть измерено r превышений. Тогда можно составить для них систему уравнений поправок

$$\overline{B}_h \overline{\delta} + \overline{l}_h = \overline{v}_h. \tag{21.84}$$

Уравнения поправок для расстояний между точками на местности. Расстояние между точками i и k на местности представим как функцию координат этих точек

$$s_{ik} = (X_k - X_i)^2 + (Y_k - Y_i)^2 + (Z_k - Z_i)^2. \tag{21.85}$$

Пусть s'_{ik} — измеренное расстояние, а s^0_{ik} — приближенное. Тогда

$$s'_{ik} + v_{s_{ik}} = s^0_{ik} + \delta s_{ik}, \tag{21.86}$$

где $v_{s_{ik}}$ и δs_{ik} — поправки. Согласно (21.85)

$$\delta s_{ik} = a \delta X_i + b \delta Y_i + c \delta Z_i + a' \delta X_k + b' \delta Y_k + c' \delta Z_k, \tag{21.87}$$

где a, b, . . . , c' — частные производные от функции (21.85) по соответствующим переменным. Подставив значение δs_{ik} в равенство (21.86), найдем

$$a \delta X_i + b \delta Y_i + c \delta Z_i + a' \delta X_k + b' \delta Y_k + c' \delta Z_k + l_{s_{ik}} = v_{s_{ik}}. \tag{21.88}$$

Запишем это уравнение в матричной форме

$$\overline{B}_{s_{ik}} \overline{\delta} + l_{s_{ik}} = v_{s_{ik}}, \tag{21.89}$$

где $\overline{B}_{s_{ik}}$ — матрица коэффициентов, а

$$l_{s_{ik}} = s^0_{ik} - s'_{ik}. \tag{21.90}$$

Пусть измерено d расстояний. Тогда получим следующие уравнения поправок:

$$\overline{B}_s \overline{\delta} + l_s = v_s. \tag{21.91}$$

Аналогично можно получить уравнения поправок для других геодезических измерений, например для горизонтальных и вертикальных углов и азимутов.

Собирая уравнения поправок для всех геодезических измерений напишем

$$\overline{B}''\overline{\delta}''+\overline{l}''=\overline{v}''. \tag{21.92}$$

Уравнения поправок для бортовых измерений. К бортовым измерениям, выполняемым в процессе фотографирования местности, относятся элементы внешнего ориентирования снимков: координаты точек фотографирования, углы наклона и углы поворота снимков, превышения точек фотографирования, длины базисов фотографирования, расстояния от точек фотографирования до точек местности.

Уравнения поправок для координат точки фотографирования, углов наклона и угла поворота снимка i можно написать в виде

$$\left.\begin{aligned}
&X'_{S_i}+v_{X_i}=X^0_{S_i}+\delta X_i\\
&Y'_{S_i}+v_{Y_i}=Y^0_{S_i}+\delta Y_i\\
&Z'_{S_i}+v_{Z_i}=Z^0_{S_i}+\delta Z_i\\
&\alpha'_i+v_{\alpha_i}=\alpha^0_i+\delta\alpha_i\\
&\omega'_i+v_{\omega_i}=\omega^0_i+\delta\omega_i\\
&\varkappa'_i+v_{\varkappa_i}=\varkappa^0_i+\delta\varkappa_i
\end{aligned}\right\}, \tag{21.93}$$

где X'_{Si}, Y'_{S_i}, . . . , $\varkappa'_i$ — измеренные, а $X^0_{S_i}$, $Y^0_{S_i}$, . . . , $\varkappa^0_i$ — приближенные элементы внешнего ориентирования снимка i; v_{X_i}, v_{Y_i}, . . . , $\delta\varkappa_i$ — поправки к ним.

Представим уравнения (21.93) в матричном виде

$$\overline{\delta}_i+\overline{l}_i=\overline{v}_i, \tag{21.94}$$

где

$$\overline{\delta}_i=\begin{bmatrix}\delta X_{S_i}\\ \delta Y_{S_i}\\ \delta Z_{S_i}\\ \delta\alpha_i\\ \delta\omega_i\\ \delta\varkappa_i\end{bmatrix};\qquad \overline{l}_i=\begin{bmatrix}X^0_{S_i}-X'_{S_i}\\ Y^0_{S_i}-Y'_{S_i}\\ Z^0_{S_i}-Z'_{S_i}\\ \alpha^0_i-\alpha'_i\\ \omega^0_i-\omega'_i\\ \varkappa^0_i-\varkappa'_i\end{bmatrix};\qquad \overline{v}_i=\begin{bmatrix}v_{X_i}\\ v_{Y_i}\\ v_{Z_i}\\ v_{\alpha_i}\\ v_{\omega_i}\\ v_{\varkappa_i}\end{bmatrix}. \tag{21.95}$$

Если элементы внешнего ориентирования измерены для m снимков, то получим

$$\begin{bmatrix}\overline{\delta}_{S_1}\\ \overline{\delta}_{S_2}\\ \vdots\\ \overline{\delta}_{S_m}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\overline{l}_{S_1}\\ \overline{l}_{S_2}\\ \vdots\\ \overline{l}_{S_m}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}v_{S_1}\\ v_{S_2}\\ \vdots\\ v_{S_m}\end{bmatrix} \tag{21.96}$$

или в более общей форме

$$\overline{\delta}_S+\overline{l}_S=\overline{v}_S. \tag{21.97}$$

Уравнение поправки для измеренного превышения $\Delta H'$ точки фотографирования S_i над точкой фотографирования S_k можно получить из выражения (21.81) и представить так:

$$a_{S_i}\delta X_{S_i}+b_{S_i}\delta Y_{S_i}+c_{S_i}\delta Z_{S_i}-a_{S_k}\delta X_{S_k}-b_{S_k}\delta Y_{S_k}-c_{S_k}\delta Z_{S_k}+$$
$$+H^0_{S_i}-H^0_{S_k}-\Delta H'_{S_iS_k}=v_{S_iS_k}, \qquad (21.98)$$

где δX_{S_i}, δY_{S_i}, . . . , δZ_{S_k} — поправки к приближенным координатам точек S_i и S_k, $v_{\Delta H_{S_iS_k}}$ — поправка к измеренному превышению, $H^0_{S_i}$ и $H^0_{S_k}$ — приближенные высоты точек S_i и S_k.

Представим уравнение (21.98) в матричной форме

$$\overline{B}\overline{\delta}+l_{\Delta H_{S_iS_k}}=v_{\Delta H_{S_iS_k}}, \qquad (21.99)$$

где

$$l_{\Delta H_{S_iS_k}}=H^0_{S_i}-H^0_{S_k}-\Delta H'_{S_iS_k}. \qquad (21.100)$$

Пусть измерено c превышений. Тогда получим

$$\overline{B}\overline{\delta}+\overline{l}_{\Delta H}=\overline{v}_{\Delta H}. \qquad (21.101)$$

Уравнение поправки для измеренного базиса фотографирования B'_k аналогично уравнению (21.88)

$$a\delta X_{S_i}+b\delta Y_{S_i}+c\delta Z_{S_i}+a'\delta X_{S_k}+b'\delta Y_{S_k}+c'\delta Z_{S_k}+l_{B_{ik}}=v_{B_{ik}}. \qquad (21.102)$$

Запишем его так:

$$\overline{B}\overline{\delta}+l_{B_{ik}}=v_{B_{ik}}. \qquad (21.103)$$

Пусть измерено g базисов фотографирования. Тогда можно составить g уравнений вида

$$\overline{B}\overline{\delta}+\overline{l}_B=\overline{v}_B. \qquad (21.104)$$

Уравнение поправки для измеренного расстояния D'_{S_iK} от точки фотографирования S_i до точки K местности аналогично уравнению (21.102)

$$a\delta X_{S_i}+b\delta Y_{S_i}+c\delta Z_{S_i}+a'\delta X_K+b'\delta Y_K+c'\delta Z_K-l_{D_{S_iK}}=v_{D_{S_iK}}. \qquad (21.105)$$

Представим это уравнение в такой форме:

$$\overline{B}\overline{\delta}+l_{D_{S_iK}}=v_{D_{S_iK}}. \qquad (21.106)$$

Пусть измерено h расстояний от точек фотографирования до точек местности. Тогда получим

$$\overline{B}\overline{\delta}+\overline{l}_D=\overline{v}_D. \qquad (21.107)$$

Запишем все уравнения для бортовых измерений в обобщенном виде

$$\overline{B}'''\overline{\delta}'''+\overline{l}'''=\overline{v}'''. \qquad (21.108)$$

Общая математическая модель блочной фототриангуляции и ее параметры. Итак, для построения блочной сети достаточно составить и решить три группы уравнений поправок для фотограмметрических, геодезических и бортовых измерений

$$\left.\begin{aligned} \bar{B}'\bar{\delta}' + \bar{l}' &= \bar{v}' \\ \bar{B}''\bar{\delta}'' + \bar{l}'' &= \bar{v}'' \\ \bar{B}'''\bar{\delta}''' + \bar{l}''' &= \bar{v}''' \end{aligned}\right\}. \tag{21.109}$$

Представим эти уравнения в более общем виде

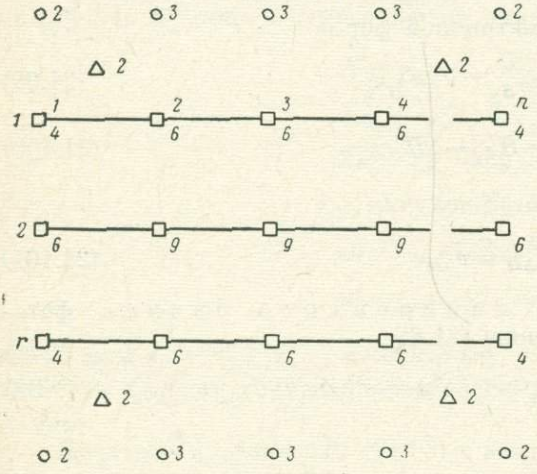


Рис. 265

$$\bar{B}\bar{\delta} + \bar{l} = \bar{v}. \tag{21.110}$$

Решая эту систему уравнений по способу наименьших квадратов, перейдем к нормальным уравнениям

$$\bar{B}'\bar{P}\bar{B}\bar{\delta} + \bar{B}'\bar{P}\bar{l} = 0, \tag{21.111}$$

где

$$P = \begin{bmatrix} \bar{P}' & 0 & 0 \\ 0 & \bar{P}'' & 0 \\ 0 & 0 & \bar{P}''' \end{bmatrix} \tag{21.112}$$

— весовая матрица измеренных величин.

Пусть блочная сеть создается по r маршрутам, в каждом из которых n снимков (рис. 265). Продольное и поперечное перекрытия снимков 60%. Определяемые точки расположены стандартно, на рисунке они обозначены квадратами и кружками с указанием количества изображений каждой точки на снимках. Опорные точки изображены треугольниками. Для построения сети используются: координаты точек снимков, координаты опорных точек, превышения точек местности, расстояния между точками на местности и элементы внешнего ориентирования снимков.

К основным параметрам блочной сети относятся:

количество определяемых точек в блоке

$$K = 2(r+n) + rn; \tag{21.113}$$

общее число неизвестных

$$N = 6(r+n) + 9rn + 3t, \tag{21.114}$$

где t — число опорных точек;

количество изображений определяемых точек на снимках

$$F_1 = 9nr - 4; \tag{21.115}$$

число уравнений поправок

$$M = 27nr - 2r + 2F_2 + 3t + a + d - 8, \tag{21.116}$$

где F_2 — количество изображений опорных точек, a и d — число измеренных превышений и расстояний на местности соответственно.

Таблица 11

r	n	rn	K	N	M
4	4	16	32	207	460
5	10	50	80	555	1376
10	10	100	140	1035	1716
10	20	200	260	1995	5416

Пусть $t = 5$, $F_2 = 10$, $a = d = 3$. Тогда для блоков различных размеров получим следующие параметры (табл. 11).

Использование квазиснимков. Когда блок большой, а возможности ЭЦВМ недостаточны для составления и решения всей системы уравнений поправок, можно сначала построить взаимно перекрывающиеся подблоки, а затем объединить их в блок с помощью квазиснимков [27].

На рис. 266 блок, состоящий из девяти маршрутов по 20 снимков, разбит на 9 перекрывающихся подблоков (I — IX). В каждом подблоке 5 маршрутов по 10 снимков. После построения подблоков вычисляют по формулам (21.57) квазиснимки — центральные проекции подблоков. Главные точки квазиснимков на рисунке показаны кружками. Элементы ориентирования квазиснимков выбираются произвольно. Таким образом, 180 снимков, входящих в блок, заменяются 15 квазиснимками, которые используются для построения сети в пределах всего блока изложенным в этом параграфе способом.

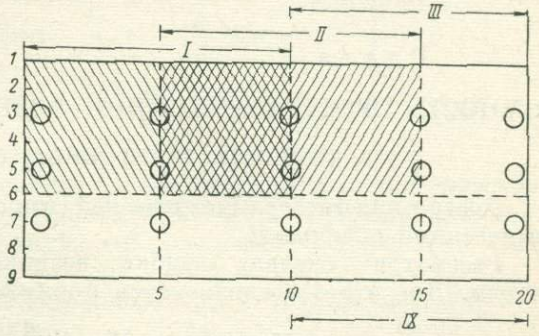


Рис. 266

Для решения больших систем фотограмметрических уравнений успешно применяется итеративный метод с последовательной вставкой неизвестных, разработанный М. М. Машимовым [28].

Блочная сеть может быть построена и путем раздельного уравнивания элементов внешнего ориентирования снимков и координат точек местности, а также без определения угловых или линейных элементов внешнего ориентирования (Ф. Ф. Лысенко, М. Н. Булушев и др.).

М. Д. Коншин, В. А. Полякова, В. Я. Финковский, И. Т. Антипов, Б. К. Малявский и др. разработали способы блочного фототриангулирования, основанные на построении и соединении независимых моделей или маршрутных сетей. И. Д. Каргополов предложил метод уравнивания больших систем пересекающихся маршрутных сетей с использованием дополнительных данных.

В отдельных случаях аэросъемка выполняется с увеличенным до 80% продольным перекрытием снимков и с целью повышения точности фототриангулирования каждая маршрутная сеть строится дважды — по четным и по нечетным снимкам (М. Д. Коншин, Г. В. Романовский).

Преследуя такую же цель, В. Н. Белых строил блочные сети по взаимно перпендикулярным маршрутам. Однако в этом случае значительно возрастает объем летно-съемочных работ.

Методы построения блочных сетей находятся в стадии развития и испытаний. Сравнительный анализ этих методов покажет их эффективность и область применения.

Существенными преимуществами аналитической фототриангуляции перед аналоговой являются:

— более высокая точность, обусловленная использованием прецизионного стереокомпаратора для измерения снимков и строгих методов обработки результатов измерений;

— большая производительность, достигаемая благодаря применению электронных вычислительных машин, автоматизирующих все вычислительные процессы;

— универсальность — не накладываются ограничения на значения элементов ориентирования снимков;

— возможность учета всех систематических ошибок, влияние которых можно выразить в математической форме.

Глава 22

ТОЧНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

§ 153. ТОЧНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ МОДЕЛИ

Построение фотограмметрической сети сопровождается случайными и систематическими ошибками.

Рассмотрим сначала ошибки, возникающие при построении одиночной модели. Для этого воспользуемся формулами (14.6)

$$X = B\frac{x_1^0}{p^0}, \quad Y = B\frac{y_1^0}{p^0}, \quad Z = -B\frac{f}{p^0}.$$

Прологарифмируем эти выражения

$$\begin{aligned} \ln X &= \ln B + \ln x_1^0 - \ln p^0, \\ \ln Y &= \ln B + \ln y_1^0 - \ln p^0, \\ \ln Z &= \ln B + \ln f = \ln p^0. \end{aligned}$$

После дифференцирования этих равенств получим

$$\left.\begin{aligned} \frac{dX}{X} &= \frac{dB}{B} + \frac{dx_1^0}{x_1^0} - \frac{dp^0}{p^0} \\ \frac{dY}{Y} &= \frac{dB}{B} + \frac{dy_1^0}{y_1^0} - \frac{dp^0}{p^0} \\ \frac{dZ}{Z} &= \frac{dB}{B} + \frac{df}{f} - \frac{dp^0}{p^0} \end{aligned}\right\}. \qquad (a)$$

Согласно формулам (14.20),

$$dx_1^0 = dx_1 + \left(f + \frac{x^2}{f}\right)d\alpha_1 + \frac{x_1 y_1}{f}d\omega_1 - y_1 d\varkappa_1;$$

$$dy_1^0 = dy_1 + \frac{x_1 y_1}{f}d\alpha_1 + \left(f + \frac{y_1^2}{f}\right)d\omega_1 + x_1 d\varkappa_1.$$

Аналогично найдем dp^0, применив формулу (14.22) и приняв

$$\Delta H = Bv' = \frac{H}{f}bv',$$

причем будем учитывать влияние только ошибок элементов взаимного ориентирования снимков. Получим

$$dp^0 = dp - f\,\Delta\alpha + \frac{p}{f}\,b\,dv' - \frac{x_1^2}{f}\,d\,\Delta\alpha - \frac{x_1 y_1}{f}\,d\,\Delta\omega - y_1 d\,\Delta\varkappa - \frac{x_1}{f}\,b\,dv'.$$

Подставив значения dx_1^0, dy_1^0, dp^0 в равенства (а), найдем

$$\left.\begin{aligned}
dX &= mx_1\left(\frac{dB}{B} + \frac{dx_1}{x_1} - \frac{dp}{p} + \frac{f^2+x_1^2}{x_1 f}\,d\alpha_1 + \frac{y_1}{f}\,d\omega_1 - \frac{y_1}{x_1}\,d\varkappa_1 + \right.\\
&\left. + \frac{f}{p}\,d\,\Delta\alpha - \frac{b}{f}\,dv' + \frac{x_1^2}{fp}\,d\,\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp}\,d\,\Delta\omega + \frac{y_1}{p}\,d\,\Delta\varkappa + \frac{x_1}{f}\,dv'\right)\\
dY &= my_1\left(\frac{dB}{B} + \frac{dy_1}{y_1} - \frac{dp}{p} + \frac{x_1}{f}\,d\alpha_1 + \frac{f^2+y_1^2}{y_1 f}\,d\omega_1 + \frac{x_1}{y_1}\,d\varkappa_1 + \right.\\
&\left. + \frac{f}{p}\,d\,\Delta\alpha - \frac{b}{f}\,dv' + \frac{x_1^2}{fp}\,d\,\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp}\,d\,\Delta\omega + \frac{y_1}{p}\,d\,\Delta\varkappa + \frac{x_1}{f}\,dv'\right)\\
dZ &= mf\left(\frac{dB}{B} + \frac{df}{f} - \frac{dp}{p} + \frac{f}{p}\,d\,\Delta\alpha - \frac{b}{f}\,dv' + \frac{x_1^2}{fp}\,d\,\Delta\alpha + \right.\\
&\left. + \frac{x_1 y_1}{fp}\,d\,\Delta\omega + \frac{y_1}{p}\,d\,\Delta\varkappa + \frac{x_1}{f}\,dv'\right)
\end{aligned}\right\}, \qquad (22.1)$$

где m — знаменатель масштаба снимка.

Из формул (22.1) следует, что ошибки определения фотограмметрических координат точек местности зависят от ошибок построения и измерения снимков, погрешностей их ориентирования, а также от положения изображений этих точек на снимках.

После внешнего ориентирования модели по опорным точкам часть ошибок будет исключена и вместо (22.1) получим

$$\left.\begin{aligned}
dX &= mx_1\left(\frac{dx_1}{x_1} - \frac{dp}{p} + \frac{x_1^2}{fp}\,d\,\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp}\,d\,\Delta\omega + \frac{y_1}{p}\,d\,\Delta\varkappa + \frac{x_1}{f}\,dv'\right)\\
dY &= my_1\left(\frac{dy_1}{y_1} - \frac{dp}{p} + \frac{x_1^2}{fp}\,d\,\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp}\,d\,\Delta\omega + \frac{y_1}{p}\,d\,\Delta\varkappa + \frac{x_1}{f}\,dv'\right)\\
dZ &= mf\left(-\frac{dp}{p} + \frac{x_1^2}{fp}\,d\,\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp}\,d\,\Delta\omega + \frac{y_1}{p}\,d\,\Delta\varkappa + \frac{x_1}{f}\,dv'\right)
\end{aligned}\right\}. \qquad (22.2)$$

Рассматриваемые здесь ошибки являются зависимыми. Но в данном случае учет их зависимости существенно не влияет на конечные формулы. Поэтому, переходя к средним квадратическим ошибкам, можно написать

$$\left.\begin{aligned}
m_X &= mx_1\left[\left(\frac{m_{x_1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{m_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{x_1^2}{fp}\,m_{\Delta\alpha}\right)^2 + \left(\frac{x_1 y_1}{fp}\,m_{\Delta\omega}\right)^2 + \right.\\
&\left. + \left(\frac{y_1}{p}\,m_{\Delta\varkappa}\right)^2 + \left(\frac{x_1}{f}\,m_{v'}\right)^2\right]^{1/2}\\
m_Y &= my_1\left[\left(\frac{m_{y_1}}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{m_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{x_1^2}{fp}\,m_{\Delta\alpha}\right)^2 + \left(\frac{x_1 y_1}{fp}\,m_{\Delta\omega}\right)^2 + \right.\\
&\left. + \left(\frac{y_1}{p}\,m_{\Delta\varkappa}\right)^2 + \left(\frac{x_1}{f}\,m_{v'}\right)^2\right]^{1/2}\\
m_Z &= mf\left[\left(\frac{m_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{x_1^2}{fp}\,m_{\Delta\alpha}\right)^2 + \left(\frac{x_1 y_1}{fp}\,m_{\Delta\omega}\right)^2 + \right.\\
&\left. + \left(\frac{y_1}{p}\,m_{\Delta\varkappa}\right)^2 + \left(\frac{x_1}{f}\,m_{v'}\right)^2\right]^{1/2}
\end{aligned}\right\}, \qquad (22.3)$$

где m_{x_1}, m_{y_1}, m_p — ошибки построения и измерения снимков, $m_{\gamma'}$, $m_{\Delta\alpha}$, $m_{\Delta\omega}$ — ошибки взаимного ориентирования снимков.

Подсчитаем по формулам (22.3) ошибки определения координат какой-либо точки местности, например боковой точки *4* (см. рис. 203, $x_1 = b$, $y_1 = a$). Для этого используем значения ошибок элементов взаимного ориентирования, определяемые равенствами (16.41). Кроме того, будем считать, что $m_{x1} = m_{y_1} = m_p = m_q$, $a = b = p$. Тогда получим

$$\left.\begin{aligned} m_X = m_Y &= 2{,}5\, m m_q \\ m_Z &= 2{,}3 m \frac{f}{b} m_q \end{aligned}\right\}. \tag{22.4}$$

Если $f = 100$ мм, $b = 70$ мм и $m_q = \pm 10$ мкм, то

$$m_X = m_Y = \pm 25 \text{ мкм}, \quad m_Z = 33 \text{ мкм}$$

в масштабе снимка.

Для точки *2* на оси маршрута аналогично найдем

$$\left.\begin{aligned} m_X &= 1{,}9 m m_q \\ m_Y &= m m_q \\ m_Z &= 1{,}6 m \frac{f}{b} m_q \end{aligned}\right\}. \tag{22.5}$$

§ 154. ТОЧНОСТЬ МАРШРУТНОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

Рассмотрим накопление ошибок в пространственной сети, построенной без использования полученных в полете элементов внешнего ориентирования и состоящей из n стереопар.

Пусть при построении первой модели в точке *2* (см. рис. 203) допущена ошибка dX_1. Эта ошибка вызовет погрешность в точке *2* n-й модели, равную ndX_1. Ошибка определения точки *2* второй модели, равная dX_2, вызывает погрешность в n-й модели, равную $(n-1)\, dX_2$. Таким образом, можно написать

$$\begin{aligned} &dX_1 \ldots\ldots\ldots\ldots n\, dX_1; \\ &dX_2 \ldots\ldots\ldots (n-1)\, dX_2; \\ &dX_3 \ldots\ldots\ldots (n-2)\, dX_3; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &dX_{n-1} \ldots\ldots\ldots 2\, dX_{n-1}. \\ &dX_n \ldots\ldots\ldots\ldots dX_n. \end{aligned}$$

Считая эти ошибки случайными и полагая $dX_1 = dX_2 = \ldots = dX_n = m_X$ найдем для конечной точки маршрута

$$m_{X_n} = m_X \sqrt{1^2 + 2^2 + \ldots + n^2}$$

или

$$m_{X_n} = m_X \sqrt{\frac{1}{6}(2n^3 + 3n^2 + n)} \approx 0{,}58 n^{3/2} m_X$$

для случая, когда $n \geqslant 5$.

Подставим сюда значение m_X из равенств (22.5). Аналогично найдем средние квадратические ошибки определения координат Y и Z конечной точки свободной маршрутной сети. В результате получим

$$\left.\begin{aligned} m_{X_n} &= 1{,}1\, m m_q n^{3/2} \\ m_{Y_n} &= 0{,}57\, m m_q n^{3/2} \\ m_{Z_n} &= 0{,}93\, m \frac{f}{b} m_q n^{3/2} \end{aligned}\right\}. \tag{22.6}$$

Пусть $n = 10$, $m_q = \pm 10$ мкм, $f = b = 70$ мм. Тогда $m_{X_n} = \pm 0{,}35$ мм, $m_{Y_n} = \pm 0{,}18$ мм, $m_{Z_n} = \pm 0{,}30$ мм в масштабе снимка.

Если маршрутная сеть ориентирована по опорным точкам, расположенным на ее концах, то наибольшие ошибки следует ожидать в середине сети. Их можно подсчитать по формулам (22.6), если подставить $0{,}5n$ вместо n и разделить результат на $\sqrt{2}$. Тогда найдем

$$\left.\begin{aligned} m_{X_c} &= 0{,}27\, m m_q n^{3/2} \\ m_{Y_c} &= 0{,}14\, m m_q n^{3/2} \\ m_{Z_c} &= 0{,}23\, m \frac{f}{b} m_q n^{3/2} \end{aligned}\right\}. \tag{22.7}$$

Для тех же данных ($n = 10$) получим $m_{X_c} = \pm 0{,}08$ мм, $m_{Y_c} = \pm 0{,}05$ мм, $m_{Z_c} = \pm 0{,}08$ мм в масштабе снимка.

Теперь рассмотрим накопление ошибок в маршрутной сети, построенной с использованием элементов внешнего ориентирования, зафиксированных в полете.

Если при построении сети величины b_Z устанавливаются по показаниям статоскопа, то ошибки m_X и m_Y можно получить по выведенным выше формулам, так как передача масштаба сети в этом случае, как и в предыдущем, осуществляется по опорным точкам.

Закон накопления высотных ошибок m_Z при использовании показаний статоскопа изменяется по сравнению с полученным выше, так как элемент b_Z устанавливается независимо для каждой модели.

Путем преобразования третьего равенства (22.3) можно получить следующую формулу для ошибки m_Z точки *2* одиночной модели:

$$m_Z = m \frac{f}{b} \left[2m_q^2 + \left(b \frac{m_{b_Z}}{f} \right)^2 \right]^{1/2}, \tag{22.8}$$

где m_{b_Z} — ошибка определения и установки величины b_Z, выраженная в масштабе снимка.

Если сеть свободная и состоит из n моделей, то в конце сети

$$m_{Z_n} = m_Z \sqrt{n}. \tag{22.9}$$

Если сеть ориентирована по опорным точкам, расположенным по концам, то в середине сети

$$m_{Z_c} = 0{,}50\, m_Z \sqrt{n}. \tag{22.10}$$

Использование показаний статоскопа позволяет повысить точность определения высот, особенно при построении длинных маршрутных сетей.

Если маршрутная сеть строится с использованием показаний статоскопа и радиовысотомера, то для каждой модели независимо устанавливают величину b_Z и масштаб.

Пусть $dB : B = dH : H$. После преобразования формул (22.3) применительно к этому случаю получим следующие ошибки определения положения точки *2* одиночной модели

$$\left.\begin{aligned} m_X &= m\left[3m_q^2+\frac{b^2}{f^2}\left(m_H^2+m_{b_Z}^2\right)\right]^{1/2}\\ m_Y &= mm_q\\ m_Z &= m\frac{f}{b}\left[2m_q^2+\frac{b^2}{f^2}\left(m_H^2+m_{b_Z}^2\right)\right]^{1/2}\end{aligned}\right\}, \tag{22.11}$$

где m_H и m_{b_Z} — ошибки определения и установки высоты фотографирования по показаниям радиовысотомера и разности высот фотографирования по показаниям статоскопа, выраженные в масштабе снимка.

В конце свободной сети

$$\left.\begin{aligned} m_{X_n} &= m_X\sqrt{n}\\ m_{Y_n} &= m_Y\sqrt{n}\\ m_{Z_n} &= m_Z\sqrt{n}\end{aligned}\right\}. \tag{22.12}$$

Если сеть опирается по концам на геодезические точки, то в середине сети

$$\left.\begin{aligned} m_{X_c} &= 0{,}50\,m_X\sqrt{n}\\ m_{Y_c} &= 0{,}50\,m_Y\sqrt{n}\\ m_{Z_c} &= 0{,}50\,m_Z\sqrt{n}\end{aligned}\right\}. \tag{22.13}$$

Допустим, что при построении маршрутной сети используются угловые элементы внешнего ориентирования снимков и показания высотомера. В этом случае независимо устанавливаются углы наклона и поворота снимков, а также масштаб каждой модели. Используя формулы (22.3), найдем ошибки определения координат точки *2* построенной таким способом одиночной модели

$$\left.\begin{aligned} m_X &= m\left[2m_q^2+\left(\frac{b^2}{f}m_{\Delta\alpha}\right)^2+\left(b\,\frac{m_H}{f}\right)^2\right]^{1/2}\\ m_Y &= mm_q\\ m_Z &= m\left[\left(\frac{f}{b}m_q\right)^2+(bm_{\Delta\alpha})^2+m_H^2\right]^{1/2}\end{aligned}\right\}, \tag{22.14}$$

а ожидаемую точность сети подсчитаем по формулам (22.12) и (22.13).

Чтобы сократить полевые работы при съемке труднодоступных районов, прокладывают каркасные маршруты, перпендикулярные к заполняющим

маршрутам. В этом случае опорные точки для каркасных маршрутов определяют на местности, а опорные точки для заполняющих маршрутов получают в результате фототриангуляции по каркасным маршрутам. Поэтому наибольшие ошибки определения координат точек местности следует ожидать на заполняющем маршруте. Эти ошибки можно найти по формулам

$$\left.\begin{aligned} m_{X_c} &= \left(m'^2_{X_c} + m''^2_{X_c}\right)^{1/2} \\ m_{Y_c} &= \left(m'^2_{Y_c} + m''^2_{Y_c}\right)^{1/2} \\ m_{Z_c} &= \left(m'^2_{Z_c} + m''^2_{Z_c}\right)^{1/2} \end{aligned}\right\}, \qquad (22.15)$$

где индекс $'$ имеют ошибки, возникшие при построении сети по каркасному маршруту, а индекс $''$ — ошибки, возникшие при построении сети по заполняющему маршруту.

Исследованию точности построения маршрутных сетей посвящены работы М. Д. Коншина, Г. В. Романовского, Р. П. Овсянникова, В. И. Павлова, В. В. Вайнаускаса и др. [19, 21, 28, 32, 35].

§ 155. ТОЧНОСТЬ БЛОЧНОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

Точность блочной фототриангуляции определяет ряд показателей: точность построения и измерения снимков, количество, расположение и точность определения опорных точек, число снимков и перекрытие между ними, масштаб снимков, количество и расположение определяемых точек и др.

Оценку точности блочной фототриангуляции можно выполнить в процессе построения и уравнивания сети. Для этого достаточно найти весовые коэффициенты неизвестных элементов внешнего ориентирования снимков и координат точек сети. Однако этот метод весьма трудоемкий и не позволяет прогнозировать точность фотограмметрической сети, что необходимо для планирования полевых и камеральных работ. Поэтому представляют интерес упрощенные методы подсчета ожидаемых ошибок построения блочной сети с достаточной для практических целей точностью. Разработка таких методов еще не завершена, но выполненные в этой области исследования дают основание для следующих выводов:

1. С увеличением размера блока точность построения сети снижается значительно меньше, чем в маршрутной фототриангуляции. Эта особенность блочной сети обусловлена широким использованием фотограмметрических связей, существующих в маршрутах и между ними.

2. Увеличение количества точек сети приводит к повышению ее точности. Наиболее заметное повышение точности сети наблюдается при увеличении числа точек на каждом снимке от 6 до 12.

3. Точность сети в значительной степени зависит от количества изображений каждой ее точки на снимках, т. е. от перекрытий снимков. Например, при 60%-ных продольном и поперечном перекрытиях снимков определяемая точка может изобразиться на 9 снимках, а вес уравненных значений координат этой точки увеличится в 2,4 раза по сравнению с весом в случае, когда точка сети изображается только на двух снимках.

4. Если в блоке действуют только случайные ошибки, то увеличение числа опорных точек при равномерном расположении их мало влияет на точность сети.

Ф. Ф. Лысенко предложил следующие формулы для определения ожидаемых ошибок точек блочной сети (без учета ошибок опорных точек):

$$\left.\begin{aligned} m_d &= 0{,}075t\sqrt{\frac{3(2ns+mn-rs)}{2mns}} \\ m_Z &= 0{,}025\frac{H}{p}\sqrt{\frac{3(2ns+mn-rs)}{2mns}} \end{aligned}\right\}, \tag{22.16}$$

где t — знаменатель масштаба снимков, n — число снимков в блоке, m — число точек сети на каждом снимке, r — число опорных точек в блоке, s — количество изображений каждой точки, H — высота фотографирования, p — продольный параллакс. Коэффициенты 0,075 и 0,025 имеют размерность «миллиметр».

Эти формулы получены для случая, когда ошибки измерения координат и параллаксов точек стереопары

$$m_{x,\,y} = \pm 0{,}035 \text{ мм}, \qquad m_{p,\,q} = \pm 0{,}017 \text{ мм}.$$

§ 156. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК И МЕТОДЫ ИСКЛЮЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МОДЕЛИ

Источниками систематических ошибок в фототриангуляции служат: дисторсия объектива фотокамеры, атмосферная рефракция, кривизна Земли (если положение опорных точек определено не в прямоугольной системе координат), систематические ошибки измерительного прибора, равномерная и неравномерная деформации снимков.

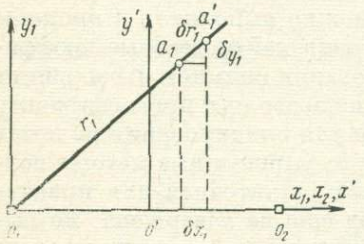


Рис. 267

Дисторсия, или искривление, изображения, построенного объективом, обусловлена изменением увеличения оптической системы от центра изображения к краям.

Смещения точек снимка, вызванные симметричной дисторсией, направлены от центра или к центру снимка и в частном случае определяются приближенной формулой

$$\delta r = \varepsilon r^3, \tag{22.17}$$

где ε — коэффициент, а r — расстояние от центра снимка до точки. Если смещение δr направлено от центра, то дисторсия положительная, подушкообразная ($\varepsilon > 0$), если же δr направлено к центру, то дисторсия отрицательная, бочкообразная ($\varepsilon < 0$).

Согласно равенству (22.17) и рис. 267 можно найти смещение δr точки a_1 левого снимка стереопары, а также его проекции на координатные оси

$$\delta r_1 = \varepsilon r_1^3, \qquad \delta x_1 = \varepsilon x_1 r_1^2, \qquad \delta y_1 = \varepsilon y_1 r_1^2.$$

Аналогично получим для точки a_2 правого снимка

$$\delta r_2 = \varepsilon r_2^3, \qquad \delta x_2 = \varepsilon x_2 r_2^2, \qquad \delta y_2 = \varepsilon y_2 r_2^2.$$

Найдем искажения продольных и поперечных параллаксов, вызванные дисторсией. Как известно, $p = x_1 - x_2$, $q = y_1 - y_2$. Поэтому

$$\delta p = \delta x_1 - \delta x_2, \qquad \delta q = \delta y_1 - \delta y_2.$$

Приняв $y_1 = y_2$, получим

$$\delta p = \varepsilon (x_1 r_1^2 - x_2 r_2^2), \quad \delta g = xy_1 (r_1^2 - r_2^2).$$

Если начало координат перенести из центра левого снимка o_1 в центр стереопары o', то эти формулы примут вид

$$\left.\begin{aligned} \delta p &= \varepsilon p \left(3x'^2 + y'^2 + \frac{1}{4} p^2\right) \\ \delta q &= 2\varepsilon p x' y' \end{aligned}\right\}. \tag{22.18}$$

Подсчитаем ошибку определения высоты точки местности, вызванную дисторсией. Для этого умножим δp на параллактический коэффициент, равный $H : p$. Получим

$$\delta h = H\varepsilon \left(3x'^2 + y'^2 + \frac{1}{4} p^2\right). \tag{22.19}$$

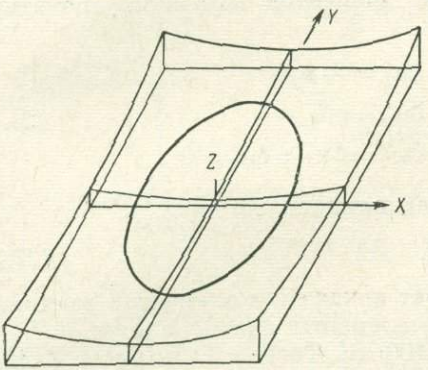


Рис. 268

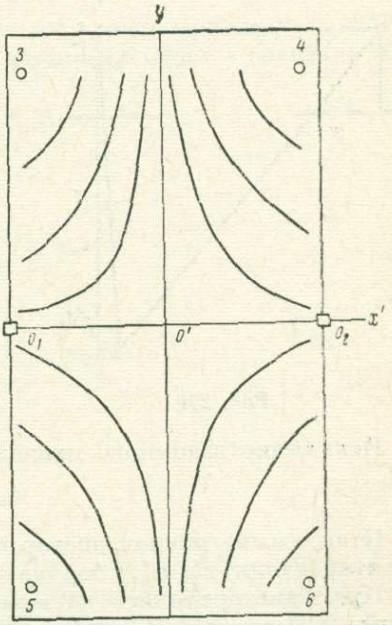


Рис. 269

Это уравнение представляет собой эллиптический параболоид

$$\frac{X^2}{a} + \frac{Y^2}{b} = 2Z,$$

где

$$a = \frac{1}{2H\varepsilon}, \quad b = \frac{1}{H\varepsilon},$$

$$Z = -\frac{1}{8} p^2 H\varepsilon + \frac{1}{2} \delta h.$$

Итак, горизонтальная плоскость местности изображается на модели в виде эллиптического параболоида (рис. 268). Сечение этой поверхности плоскостью $Z = c$ дает эллипс

$$\frac{X^2}{2ac} + \frac{Y^2}{2bc} = 1.$$

Это значит, что кривыми равных искажений δh служат эллипсы, центры которых находятся на оси Z.

Уравнение (22.18), связывающее величины δq и ε, представляет равнобочную гиперболу, асимптотами которой являются координатные оси x' и y' (рис. 269). Таким образом, кривыми равных искажений δq поперечных параллаксов, вызванных дисторсией, служит семейство гипербол.

Наибольшие искажения δq имеют точки стереопары, для которых $|x'y'| = \max$, т. е. точки, находящиеся в углах. К таким относятся стандартно расположенные точки *3—6* (см. рис. 203), используемые для взаимного ориентирования снимков.

Для определения влияния дисторсии на точность взаимного ориентирования снимков сначала подсчитаем по формуле (22.18) искажения δq на точках *1—6*, приняв $p = b$,

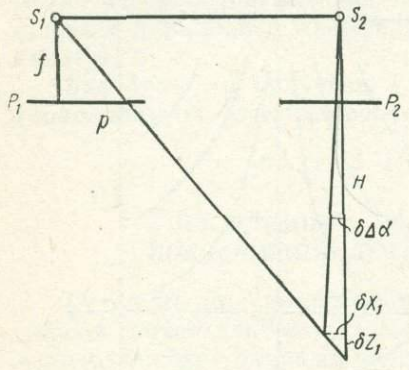


Рис. 270

$$\left.\begin{aligned} \delta q_1 &= \delta q_2 = 0 \\ \delta q_3 &= \delta q_6 = -\varepsilon a b^2 \\ \delta q_4 &= \delta q_5 = \varepsilon a b^2 \end{aligned}\right\}. \qquad (22.20)$$

Затем, подставив в равенства (16.41) полученные значения δq вместо q, найдем искажения элементов взаимного ориентирования

$$\left.\begin{aligned} \delta\alpha'_1 &= -\varepsilon f b \\ \delta\alpha'_2 &= \varepsilon f b \\ \delta\omega'_2 &= \delta\varkappa'_1 = \delta\varkappa'_2 = 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (22.21)$$

Искажение взаимного продольного угла наклона снимков

$$\delta\Delta\alpha = 2\varepsilon f b. \qquad (22.22)$$

Итак, симметричная дисторсия вызывает искажения элементов взаимного ориентирования α'_1, α'_2, $\Delta\alpha$; на остальные элементы она не влияет.

Пусть дисторсия $\delta r = 40$ мкм при $r = 100$ мм. Тогда $\varepsilon = \delta r : r^3 = 4 \cdot 10^{-8}$. Приняв для точек *3—6* (см. рис. 269) $a = b = p = 70$ мм и $f = 100$ мм, получим $|\delta q| = 14$ мкм, $\delta h = 0{,}0004\ H$ и $\delta\alpha'_1 = \delta\alpha'_2 = 1{,}0'$.

Из рис. 270 следует, что ошибки координат точки *2* первой модели, обусловленные дисторсией,

$$\left.\begin{aligned} \delta X_1 &= H\delta\Delta\alpha = mf\delta\Delta\alpha = 2m\varepsilon f^2 b \\ \delta Y_1 &= 0 \\ \delta Z_1 &= H\frac{f}{p}\delta\Delta\alpha = m\frac{f^2}{p}\delta\Delta\alpha = 2m\varepsilon f^3 \end{aligned}\right\}. \qquad (22.23)$$

Если маршрутная сеть состоит из n стереопар и строится без использования элементов внешнего ориентирования снимков, то эти ошибки вызовут в конце маршрута погрешности, равные $n\delta X_1$, $n\delta Y_1 = 0$ и $n\delta Z_1$. Ошибки δX_2, δY_2, δZ_2 определения координат точки *2* второй модели приведут в конце маршрута к ошибкам $(n-1)\,\delta X_2$, $(n-1)\,\delta Y_2 = 0$ и $(n-1)\,\delta Z_2$. Таким образом, для конечной точки свободного ряда, расположенной на оси маршрута, можно написать

$$\delta X'_n = n\delta X_1 + (n-1)\delta X_2 + \ldots + 2\delta X_{n-1} + \delta X_n.$$

Полагая $\delta X_1 = \delta X_2 = \ldots = \delta X_n$, получим

$$\delta X'_n = [1 + 2 + \ldots + (n-1) + n]\,\delta X_1.$$

Учитывая значение δX_1, представим это выражение в виде

$$\delta X'_n = mf^2\varepsilon b\,(n^2 + n). \tag{22.24}$$

Аналогично найдем

$$\delta Z'_n = mf^3\varepsilon\,(n^2 + n). \tag{22.25}$$

Если сеть ориентирована по опорным точкам, расположенным в начале и в конце маршрута, то наибольшее влияние дисторсии будет в середине сети

$$\delta X'_c = \delta X'_{\frac{n}{2}} - \frac{1}{2}\delta X_n.$$

Используя формулу (22.24), найдем

$$\delta X'_{\frac{n}{2}} = mf^2\varepsilon b\left(\frac{n^2}{4} + \frac{n}{2}\right).$$

Следовательно,

$$\delta X'_c = -\frac{1}{4}mf^3\varepsilon b n^2. \tag{22.26}$$

Аналогично получим

$$\delta Z'_c = -\frac{1}{4}mf^3\varepsilon n^2. \tag{22.27}$$

Пусть определяемые точки местности лежат на прямой, совпадающей с осью маршрута, и $\varepsilon \neq 0$. Тогда соответствующие точки модели будут находиться на кривой, т. е. сеть будет иметь прогиб. Стрелу прогиба можно найти по формуле (22.27).

Если $f = 100$ мм, $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-8}$, $b = 70$ мм и $n = 10$, то $\delta X'_c = -0{,}7$ мм и $\delta Z'_c = -1{,}0$ мм в масштабе снимка.

Дисторсия в общем случае несимметрична. Поэтому необходимо учитывать не только радиальную, но и тангенциальную дисторсию [19, 21].

В аналитической фототриангуляции влияние дисторсии учитывается путем введения поправок в измеренные координаты точек снимков.

В оптических универсальных стереоприборах, например в стереопланиграфе, влияние дисторсии снижается благодаря использованию в проектирующих камерах объективов, имеющих по возможности такую же дисторсию, что и объектив съемочной камеры. В автографе Вильда дисторсия учитывается механическим приспособлением.

Остаточное влияние дисторсии на координаты точек сети в пространственной фототриангуляции исключается при внешнем ориентировании модели по опорным точкам.

Атмосферная рефракция увеличивает радиус-вектор точки снимка (рис. 271). Поэтому влияние ее при построении одиночной модели и маршрутной сети аналогично влиянию положительной симметричной дисторсии.

Для горизонтального и планового снимков можно написать

$$r = f \operatorname{tg} \zeta,$$

$$dr = f \sec^2 \zeta \, d\zeta.$$

Переходя к конечным величинам и полагая, что угол $d\zeta$ равен рефракции r_f, получим смещение

$$\delta r = \left(f + \frac{r^2}{f} \right) r_f \tag{22.28}$$

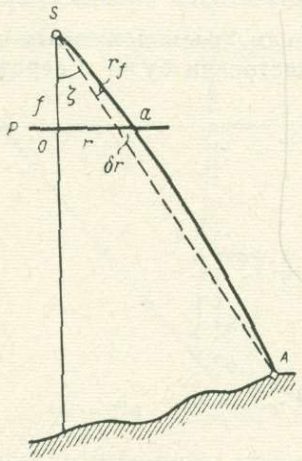


Рис. 271

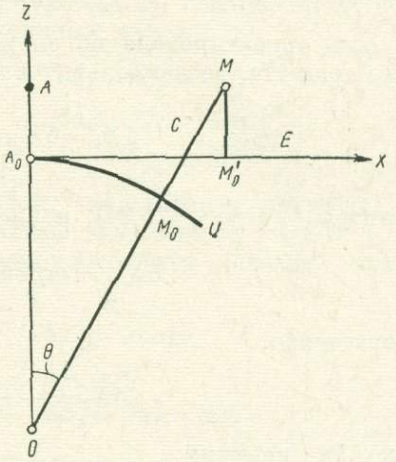


Рис. 272

и его составляющие

$$\delta x = \frac{x}{r} \delta r, \quad \delta y = \frac{y}{r} \delta r. \tag{22.29}$$

Рефракция r_f определяется по формулам, приведенным в § 5.

Влияние кривизны Земли. В геодезии высоты точек местности определяют относительно уровенной поверхности U (рис. 272), а в фотограмметрии — относительно начальной плоскости E, которая в общем случае может занимать произвольное положение. Поэтому фотограмметрические высоты содержат систематические ошибки, обусловленные кривизной Земли. Очевидно, и плановое положение точек местности, полученное в фотограмметрии в результате ортогонального проектирования на начальную плоскость, отличается от положения их на уровенной поверхности или на карте, составленной в заданной проекции.

Пусть начальная плоскость проходит через точку A_0 — проекцию точки A местности на уровенную поверхность и перпендикулярна к отвесной прямой AA_0, т. е. горизонтальна. Примем точку A_0 за начало фотограмметрической системы координат XYZ и направим ось X вдоль маршрута, а ось Z — вверх по прямой A_0A. Фотограмметрическую высоту точки M местности обозначим через Z, а геодезическую — через $Z_г$. Условимся считать Землю шаром с центром O и радиусом R.

Из рис. 271 следует

$$Z_г = M_0M = M_0C + CM.$$

Но

$$M_0C = \frac{R}{\cos\theta} - R, \quad CM = \frac{Z}{\cos\theta},$$

где θ — центральный угол при точке O между направлениями на точки A и M. Полагая, что этот угол мал, напишем

$$M_0C = \frac{1}{R}\theta^2, \quad CM = Z\left(1 + \frac{1}{2}\theta^2\right).$$

Таким образом,

$$Z_г = Z + \frac{1}{2}(R+Z)\theta^2.$$

Приняв $\theta = X : R$, получим

$$Z_г = Z + \frac{1}{2}(R+Z)\frac{X^2}{R^2}.$$

Величина Z мала по сравнению с R. Поэтому можно считать, что

$$Z_г = Z + \frac{X^2}{2R}. \tag{22.30}$$

Приняв $R = 6370$ км и выразив высоты в метрах, а X — в километрах, найдем

$$Z_г = Z + 0{,}0785X^2. \tag{22.31}$$

Пусть длина фототриангуляционного ряда равна 10 км. Тогда поправка за кривизну Земли к высоте Z конечной точки ряда равна 7,8 м.

Теперь подсчитаем разность расстояний между проекциями точек A и M на начальной плоскости и на уровенной поверхности

$$\delta X = X - s = A_0M_0' - s = A_0C + CM_0' - s.$$

Но

$$A_0C = R\operatorname{tg}\theta, \quad CM_0' = Z\operatorname{tg}\theta, \quad s = R\theta.$$

Полагая, что угол θ мал, найдем

$$\delta X = \frac{1}{3}R\theta^3 + Z\theta = \frac{X^3}{3R^2} + Z\frac{X}{R}. \tag{22.32}$$

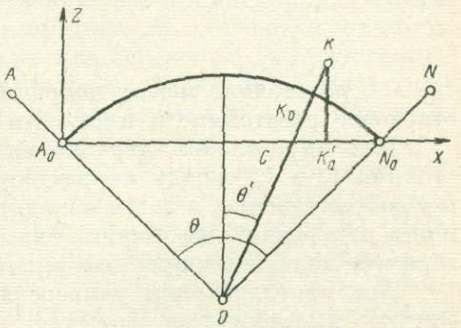


Рис. 273

При $X = 10$ км и $Z = 0$ величина $\delta X = 8$ мм. Если $X = 100$ км и $Z = 0$, то $\delta X = 8{,}3$ м.

Рассмотрим другой случай, когда маршрутная сеть ориентирована по опорным точкам, расположенным на концах маршрута (рис. 273). Начало фотограмметрической системы координат находится в точке A_0 — проекции опорной точки A на уровенную поверхность, а плоскость XY проходит через N_0 — проекцию опорной точки N, перпендикулярно к отвесной линии, проходящей через центр маршрута. В этом случае

$$Z_г = Z - \frac{(X_N - X)X}{R}, \tag{22.33}$$

$$\delta X = -\frac{X_N^3}{48R^2} - \frac{(X - 0{,}5X_N)^3}{6R^2}, \tag{22.34}$$

где $Z_г$ — геодезическая высота точки сети, например токи K, Z — фотограмметрическая высота той же точки, X и X_N — абсциссы точек K и N, δX — разность величин X и $s = A_0K_0$, $R = 6370$ км — радиус Земли.

Если $X = 10$ км, то для средней точки ряда поправка к высоте равна 3,9 м, а поправка $\delta X = 0{,}3$ мм. При длине ряда 100 км получим $\delta Z = -392$ м и $\delta X = -0{,}6$ м.

Таким образом, кривизна Земли сильно влияет на определение высот точек местности. Чтобы исключить это влияние, необходимо при внешнем ориентировании фотограмметрической сети вводить поправки в полученные по снимкам высоты или использовать геоцентрическую систему координат.

Систематическими ошибками измерительного прибора, например стереокомпаратора, являются кривизна направляющих, неперпендикулярность направляющих, изменение масштаба измерительных *шкал и винтов, ходовые и периодические ошибки измерительных винтов и др.* Эти ошибки определяются в результате исследования прибора, а влияние их исключается путем введения поправок в измеренные координаты точек снимков (см. курс фотограмметрического инструментоведения).

Равномерная деформация снимка характеризуется коэффициентом, который можно найти по формуле (11.33)

$$k_д = \frac{l}{l_0},$$

где l — расстояние между координатными метками на снимке, а l_0 — соответствующее *расстояние в плоскости прикладной рамки фотокамеры.*

Для определения неравномерной деформации измеряют на снимке расстояния l_x и l_y между координатными метками, расположенными на осях x и y соответственно, а затем находят по формуле (11.33) коэффициенты продольной и поперечной деформаций снимка $k_{д\,x}$ и $k_{д\,y}$. Разность этих величин характеризует неравномерную деформацию снимка.

При использовании универсальных стереоприборов фокусное расстояние снимков вычисляют по формуле

$$f' = \frac{1}{2} f (k_{д\,x} + k_{д\,y}), \tag{22.35}$$

где f — фокусное расстояние фотокамеры.

В аналитических способах обработки снимков деформация их учитывается с помощью меток, впечатанных в момент экспозиции.

Если эти метки расположены только по периметру снимка, то используются уравнения

$$\left.\begin{aligned} x' &= x + a + bx + cy + dxy + ex^2 + fy^2 + gxy^2 + hx^2y \\ y' &= y + a' + b'x + c'y + d'xy + e'x^2 + f'y^2 + g'xy^2 + h'x^2y \end{aligned}\right\}, \tag{22.36}$$

где x, y и x', y' — измеренные и исправленные координаты точки снимка, a, b, . . . , h и a', b', . . . , h' — коэффициенты, характеризующие деформацию снимка [27, 28].

Чтобы найти коэффициенты, составляют и решают уравнения (22.36) для 8 или больше меток.

Если метки размещены равномерно по всему снимку и являются изображениями перекрестий контрольной сетки, то измеряют приращения координат

точки снимка относительно ближайшего перекрестия, а координаты находят по формулам

$$\left.\begin{aligned} x' &= x + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \end{aligned}\right\}, \tag{22.37}$$

где x и y — координаты ближайшего перекрестия.

Координаты меток и перекрестий контрольной сетки, расположенных в плоскости прикладной рамки фотокамеры, определяются в результате калибровки фотоаппарата.

Глава 23

АВТОМАТИЗАЦИЯ СТЕРЕОИЗМЕРЕНИЙ

§ 157. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Современные достижения электроники, вычислительной техники и другие позволили автоматизировать многие процессы фотограмметрической обработки различных съемок (см., например, аналитическую фототриангуляцию). Дальнейшей задачей является комплексная автоматизация обработки снимков, т. е. сведение до минимума участия человека как оператора фотограмметрических преобразований на приборах и в аналитической форме. Среди многих проблем автоматизации всего комплекса фотограмметрических процессов особую проблему составляет автоматизация стереоизмерений.

Зрительный аппарат человека, обладая непревзойденными достоинствами в отношении достоверности результатов стереонаблюдений, требует сравнительно много времени для осмысливания ситуации и принятия решений. В результате скорость движения марки в плоскости снимка при трассировании контуров, горизонталей или профилей невелика и колеблется от 2 до 8 мм/с для разных условий. Значительное время занимает также процесс наведения марки на отдельные точки.

Очевидно, что время визирования на точки стереомодели на фотограмметрических приборах в конечном итоге определяет быстродействие, а следовательно, и производительность всего комплекса обработки снимков. Отсюда оправданный интерес ученых и конструкторов различных стран к решению проблемы автоматического наблюдения снимков. Автоматизация стереоизмерений позволит построить приборы качественно нового типа, приборы—станки, подобно автоматическим станкам, применяемым в других областях народного хозяйства.

Первые исследования по автоматизации стереоизмерений выполнены в 1924—1932 гг. * А. С. Скиридовым. Он предложил преобразовать в электрические сигналы изображения ряда одинаково и близко расположенных точек на снимках стереопары. Электрические сигналы от одинаковых точек анализируются под условием постоянства их разностей, отношений или произведений. Поскольку изображения идентичных микроучастков подобны, их взаимное соответствие находится по признаку максимального удовлетворения условию

---

* Скиридов А. С. (1895—1963 гг.). Прибор для печатания карт местности. Авторское свидетельство № 4173, 1932 г. Заявка № 78198 от 23/IV. 1924 г.

Скиридов А. С. Прибор для печатания карт местности с выраженным рельефом по парным аэроснимкам. Авторское свидетельство № 10971, 1933 г. Заявка № 7730 от 21/I. 1926 г.

анализа сигналов. Однако в то время из-за отсутствия технических средств предложения А. С. Скиридова не получили развития.

В 1960 г. А. С. Скиридов возобновил свои исследования, приступив в МИИГАиК к созданию «Изогипсографа» — прибора для автоматического проведения горизонталей. К этому времени из Канады, а несколько позже из США появились сообщения о создании опытных конструкций автоматических приборов, реализующих на современной технической основе принципы, предложенные А. С. Скиридовым.

На выставке фотограмметрического конгресса в Лозанне в 1968 г. демонстрировался серийный прибор А-2000 швейцарской фирмы Вильда, позволяющий автоматически проводить горизонтали и следить по профилю стереомодели (описание см. в § 159). Есть сведения об использовании в США универсальных картосоставительских систем в военных стратегических целях.

В Советском Союзе пионерами исследований в области автоматизации стереоизмерений кроме А. С. Скиридова можно назвать его ученика Г. Д. Федорука, а также Н. Ф. Орелкина, П. П. Захарова и др. В настоящее время проблема автоматизации стереоизмерений является темой исследований многих научных учреждений.

§ 158. СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Наиболее ответственным этапом участия человека в стереоскопических измерениях по снимкам является в и з и р о в а н и е. Визирование складывается из двух процессов — поиска и отождествления точек на левом и правом изображениях стереопары и совмещения одной или двух искусственных меток (марок) с отождествленными точками.

При наблюдении глазами почти всегда удается осуществить эти процессы. Более того, один из них дополняет другой. Так, если идентичные точки найдены, измерительные марки воспринимаются как одно целое на фоне окружающей модели. Исключение составляют случаи визирования на значительные по площади и одинаковые по тону детали изображений, когда приближенно оценивают положение соответственных точек, используя окружающую ситуацию контуров.

Физиологические основы стереонаблюдений в настоящее время недостаточно изучены. Поэтому все практические реализации не следуют в полной мере закономерностям стереозрения человека.

Основное затруднение встречает автоматизация процесса отождествления одноименных точек на снимках стереопары. Чем глубже и достовернее этот процесс описан математическими функциями и логическими операциями, по которым ведется анализ в автоматических системах, тем оптимальнее результаты. Рассматривая тот или иной способ автоматизации стереоизмерений, в первую очередь анализируют решение задачи отождествления изображений.

Процесс совмещения марок с точками изображений решен в современных автоматических операторах косвенным путем. Отождествляемые участки изображений «привязывают» к определенным точкам или производят координирование отдельных точек в пределах анализируемых участков.

В автоматических системах существует совокупность устройств, заменяющих действия человека по управлению процессами отождествления одноименных изображений для выполнения заданных фотограмметрических преобразований по снимкам. Они будут разными для взаимного ориентирования снимков, наведения на отдельные точки модели, профилирования или проведения горизонталей.

В дальнейшем рассмотрим основные пути решения задачи автоматизации стереоизмерений, исходя из опыта исследований этой области в Советском Союзе и за рубежом.

Можно выделить несколько направлений, по которым возможна автоматизация отождествления соответственных точек на снимках стереопары.

Первое направление основано на принципе опознавания заснятых на снимках деталей объекта. Оно состоит в следующем: изображение части объекта, к которой принадлежат отождествляемые точки, переводится в удобный для анализа код и описывается рядом математических условий по особой программе (исходная информация).

В памяти решающего устройства автоматической системы должны храниться в компактном виде эталоны множеств совокупностей математических условий, заранее разработанных и проверенных для конкретных объектов или классов объектов (эталонная информация).

Сравнивая исходную информацию с эталонной в режиме направленного перебора, находят по левому и правому изображениям однозначно соответствующие участки. Остается установить соответствие для отдельных точек в пределах участков.

Такой путь решения задачи предоставляет практически все данные для составления карт. Но он встречает трудности из-за недостаточной глубины разработки теории опознавания, сложности и дороговизны оборудования и др. Развитие первого направления в картографии в виде схем не вышло из стадии *научных исследований. В настоящее время он применяется для опознавания* изображений слабо расчлененных объектов с правильными геометрическими формами деталей (прямые, кривые второго порядка), т. е. в прикладных областях фотограмметрии. Известны схемы, предложенные для автоматизации дешифрирования.

*Второе направление предусматривает такой же порядок подготовки исход*ной информации для участков левого и правого изображений, что и первое, т. е. изображение переводится в код и записывается множество математических условий для каждого из участков.

В качестве эталонной информации при анализе взаимного соответствия участков изображений используется исходная информация одного из снимков (опорного). Анализ осуществляется в режиме направленного перебора.

Такой путь нам кажется наиболее перспективным для автоматизации стереоизмерений в настоящее время. Он, так же как и предыдущий, встречает трудности в математическом описании изображений, запоминании, хранении и анализе большого объема информации, но эти трудности легче преодолеть, так как не требуется постоянного обращения к оригиналу — объекту. В МИИГАиК Г. Д. Федоруком разработан один из первых алгоритмов этого направления для автоматизации измерения снимков инженерных объектов (см. § 161).

Третье направление является частным случаем второго, т. е. в его основе лежит принцип сравнения участков изображений левого и правого снимков. *Изображение одного из снимков принимается за эталон. Отличительной особен*ностью его является то, что отождествляются одновременно очень малые участки изображений. Размер их выбирается исходя из характера изображенного объекта и условий его съемки. Упрощенно критерий выбора размеров анализируемых участков можно представить как требования сохранения на них подобия *в расположении большинства деталей изображений на двух снимках.* Тогда суммарная величина искажений взаимного расположения деталей объекта

на снимках, вызванных законами центрального проектирования, на общем фоне подобия будет значительно меньше. Искомая точка привязывается к середине участка.

Сравнение «малых» участков изображения существенно упрощает построение систем считывания информации, математический ее анализ и конструирование электронных систем, обслуживающих дальнейшие процессы обработки снимков. Так, для анализа идентичности парных микроучастков часто достаточно применить статистический метод испытания корреляционных связей между электрическими сигналами, отражающими изображения.

В настоящее время третье направление получило наиболее широкое распространение, оно реализовано в ряде более или менее законченных автоматических систем для наведения на отдельные точки стереомодели, проведения горизонталей, профилей и др. Эти системы можно разделить на две группы. Системы первой группы построены на аналоговых (специализированных) устройствах, а системы второй группы используют ЭВМ широкого назначения.

Непосредственное использование статистического метода для анализа идентичности изображений по микроучасткам ограничено областью топографических аэросъемок. Изображения многих объектов, в том числе созданных руками человека (инженерных), носят штриховой характер и в пределах малых участков не дают достаточной информации.

§ 159. АНАЛОГОВЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА. СТЕРЕОМАТ

К аналоговым относятся автоматические устройства, в которых комплекс задач решается специально сконструированными техническими средствами. В любом из них можно выделить три основных узла: фотоэлектронный преобразователь, устройства анализа идентичности видеосигналов и устройства управления.

С помощью фотоэлектронного преобразователя фотоизображения переводятся в электрические сигналы * (видеосигналы), удобные для последующего анализа. Построение конкретного фотопреобразователя зависит от типа и условий использования анализирующего видеосигналы устройства.

Анализирующие устройства, оперируя видеосигналами, позволяют обнаружить на снимках идентичные участки изображений. В качестве анализаторов парных видеосигналов наибольшее распространение получили к о р р е л о м е т р ы — устройства, предназначенные для исследования случайных процессов.

Возможность использования коррелометров объясняется следующими соображениями. Предположим, что фотографические и фотограмметрические условия получения стереопарных изображений плоского объекта идеальны. Соответственные точки таких изображений связаны очевидными равенствами

$$\left.\begin{aligned} x_1 - x_2 - p_0 &= \text{const} \\ y_1 - y_2 &= 0 \\ d_1 - d_2 &= 0 \end{aligned}\right\}, \tag{23.1}$$

а их отождествление не вызывает затруднений. Здесь d_1 и d_2 — плотности почернений изображений. Достаточно определить величину p_0.

---

* При применении цифровых анализаторов видеосигналы в дальнейшем преобразуются в цифровой код.

Реальные условия получения снимков и более сложная форма объекта нарушают равенства (23.1). Известные нам по характеру искажения координат Δx, Δy и плотностей почернений приведут к соотношениям

$$\left.\begin{aligned} \delta p &= (x_1 + \Delta x_1) - (x_2 + \Delta x_2) - p_0 \neq \text{const} \\ \delta y &= (y_1 + \Delta y_1) - (y_2 + \Delta y_2) \neq \text{const} \\ \delta d &= (d_1 + \Delta d_1) - (d_2 + \Delta d_2) \neq \text{const} \end{aligned}\right\}. \qquad (23.2)$$

Разумеется, что простое нормирование точек правого снимка относительно точек левого использованием постоянных значений p_0, q_0 или d_0 не приведет к желаемым результатам.

Однако можно утверждать, что для разных точек достаточно малых участков изображений местности на плановых аэроснимках величины Δx_1, Δx_2, Δy_1,

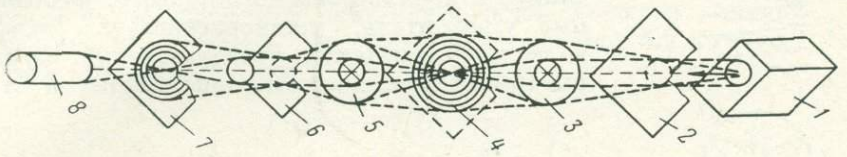


Рис. 274

Δy_2 имеют случайный разброс относительно постоянных $\Delta x_{0i} = \text{const}$, $\Delta y_{0i} = 0$ и d_{0i}. Если в соответственных микроучастках определять положения всех точек относительно некоторой начальной, то для каждого снимка получим две случайные функции (процессы) размещения точек.

Преобразование фотоизображений в видеосигналы сопровождается дополнительными случайными погрешностями. Результирующие видеосигналы окажутся реализациями случайных функций, находящихся в так называемой стохастической связи*, которая позволяет использовать для их анализа корреляционные методы математической статистики.

В настоящее время разработано много разнообразных корреляционных. Они могут быть разбиты на две основные группы — оптические и электрические. В свою очередь, каждая группа объединяет несколько разновидностей, исходя из более частных принципов. Так, среди оптических корреляторов можно выделить некогерентные и когерентные в зависимости от типа источника света, а электрические корреляторы можно разделить на аналоговые и цифровые в зависимости от решающих средств. Разрабатываются когерентные оптические корреляторы, использующие голографические изображения.

На рис. 274 изображена схема оптического коррелятора с когерентным источником света **.

Поток когерентного излучения, возбуждаемого лазером *1*, пройдя изображение левого снимка стереопары *2*, претерпевает изменение своей структуры. В результате дифракции монохроматического света от деталей изображения пучок становится конусообразным носителем информации. В середине пучка

---

* Стохастическая связь между двумя случайными величинами появляется тогда, когда на каждую из них влияют две группы случайных факторов. Одну группу составляют факторы, одинаковые для двух величин, другую — разные.

** Preprint from the Bendix Technical Gournal Sprinc, 1972.

будет сосредоточена информация фона, т. е. деталей изображения, не имеющих перепада плотностей.

Трансформирующая линза *3* распределяет в фокальной плоскости отдельные лучи в зависимости от их хода в световом пучке. А поскольку этот ход зависит от характера дифракции, распределение соответствует частотному разложению сигналов Фурье. Чтобы избавиться от информации фона, в фокальной плоскости трансформирующей линзы помещают фильтр *4* в виде непрозрачного диска.

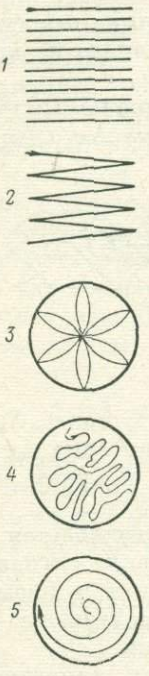


Рис. 275

Затем свет проходит через вторую трансформирующую линзу *5*, правый снимок *6*, второй фильтр *7* и попадает в фотоумножитель *8*. Распределение света после прохождения правого снимка будет результатом действия деталей изображений левого снимка и нефильтрованного правого. Фотоэлектронный умножитель, установленный за диафрагмой во второй плоскости преобразований Фурье, воспринимает интенсивность попадаемого в отверстие

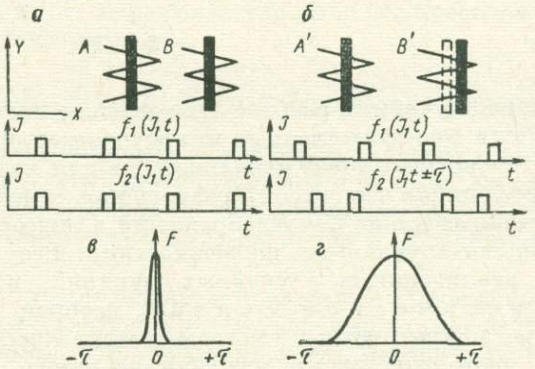


Рис. 276

света. Доказано, что интенсивность света сразу отражает степень коррелированности изображений на снимках стереопары.

Электрические коррелометры сравнивают видеосигналы, получаемые последовательной разверткой изображений бегущим по ним световым пятном (сканированием изображений) в фотоэлектронных преобразователях. При использовании оптических коррелометров фотоэлектронные преобразователи составляют с ними единую конструкцию. Сканирование изображений производится синхронно для левого и правого снимков по заданной программе, определяющей формулу развертки. Наиболее употребительные формы развертки приведены на рис. 275, где *1* — построчная с гашением обратного хода, *2* — построчная без гашения обратного хода, *3* — разеточная, *4* — хаотическая, *5* — спиральная.

В результате синхронного сканирования изображений получаем два видеосигнала $f_1(I_1 t)$ и $f_2(J_1 t)$, которые несут информацию о положении точек в пределах участков анализа и плотностях их почернений. Положения точек задаются временем t пробега светового пятна вдоль линии развертки от ее начала, а плотности почернений — амплитудой сигнала.

Предположим, что растр развертки проектируется на одноименные изображения A и B (рис. 276, *а*), и они совершенно одинаковы. Временная характеристика сигналов t в этом случае тождественна расположению одноименных деталей изображений, т. е. $t_1 = t_2 = t$. Если же световой растр сдвинут относительно идентичного изображения на правом снимке, одноименные точки при достаточной плотности анализа будут считаны с временным запаздыванием или опережением τ (задержкой).

Из-за этого видеосигнал от правого изображения окажется деформированным.

Характер деформации зависит от формы развертки и направления смещения растра. Так, при построчной развертке без гашения обратного хода (рис. 276, *б*, позиции $A'B'$) и сдвига ΔX задержка удлиняет время в прямом ходе и укорачивает в обратном примерно на одинаковую величину. Сдвиг растра вызовет постоянную временную задержку, если в нем гасить обратный ход. Другие формы разверток приводят к более сложному влиянию.

Видеосигналы с учетом расположения одноименных точек на снимках правильнее представлять как

$$\left.\begin{aligned} f_1(I,\ t) &= f_1(I,\ t_1) \\ f_2(I,\ t) &= f_2(I,\ t_1+\tau) \end{aligned}\right\}. \tag{23.3}$$

Тогда задача отождествления одноименных участков сводится к выявлению и устранению смещениями растра по полю правого снимка временной задержки τ. К понятию временной задержки можно отнести и случайные относительные смещения точек правого снимка, вызванные фотограмметрическими и фотографическими факторами, которые будут носить случайный характер.

Поиск одноименных изображений чаще всего выполняется испытанием функции

$$F = \frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} f_1(I,\ t_1)\, f_2(I,\ t_1+\tau)\, dt = \min, \tag{23.4}$$

где $T \to \infty$, выражающей коррелированность непрерывных случайных процессов.

В тех же целях могут быть использованы другие условия сравнения

$$\left.\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} [f_1(I,\ t_1) - f_2(I,\ t_1+\tau)]\, dt = \min \\ F_2 &= \frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} [f_1(I,\ t_1) - f_2(I,\ t_1+\tau)]^2\, dt = \min \\ F_3 &= \frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} \frac{f_1(I,\ t_1) - f_2(I,\ t_1+\tau)}{f_1(I,\ t_1)}\, dt = \min \end{aligned}\right\}, \tag{23.5}$$

которые дают результаты, близкие к (23.4).

Проанализируем, как ведет себя функция корреляции (23.4) в зависимости от величины задержки τ и других условий анализа. Предположим, что изображения объекта в пределах микроучастков на снимках стереопары одинаковы.

Тогда при любых значениях τ, кроме $\tau = 0$, получим $F = 0$, что соответствует режиму автокорреляции одного из сигналов, например $f(I,\ t_1)$, а именно:

$$F = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f_1(I,\ t_1)\, f_1(I,\ t_1)\, dt = \sigma, \tag{23.6}$$

т. е. получается резкий всплекс, так называемая σ — функция, как это показано на рис. 276, *в*.

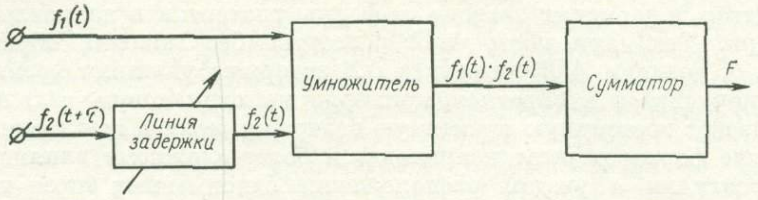


Рис. 277

Когда имеют дело с обычными изображениями (при $\tau = 0$), коррелятор выдает экстремальное значение функции F, спадающее постепенно в обе стороны с увеличением τ (см. рис. 276, *г*). Очевидно, чем острее максимум корреляции, тем точнее будет произведено отождествление микроучастков. Идеальным является режим, близкий автокорреляции.

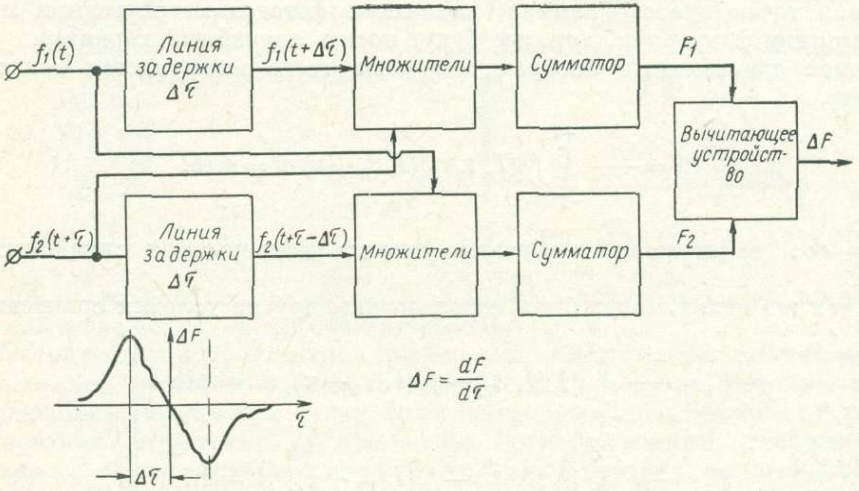


Рис. 278

К корреляторам для идентификации изображений предъявляются следующие основные требования:

— быстродействие,

— возможность работы в широком диапазоне частот анализируемых сигналов,

— возможность преобразования исходной информации,

— простота реализации.

Оптические корреляторы в большей степени удовлетворяют первым двум условиям, а электрические — двум последним.

Корреляторы являются составной частью более сложной системы обнаружения задержки и отработки данных для ее устранения. На рис. 277 изображена схема простейшей из систем, которая состоит из умножителя и сумматора. Один из сигналов $f_1(t)$ * подается в умножитель непосредственно, а другой $f_2(t+\tau)$ — через линию регулируемой задержки. В процессе работы меняют задержку до тех пор, пока коррелированность сигналов не будет максимальной. Изменение задержки можно перевести в смещения снимка. Однако из-за трудности связи отрабатываемых величин с перемещениями снимков система не получила применения.

Широкое распространение получила система перекрестного коррелирования с помощью двух корреляторов (рис. 278). Согласно схеме с выходов сумматоров поступают два сигнала

$$\left.\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} f_1(t+\Delta\tau)\, f_2(t+\tau)\, dt \approx F_1(\tau+\Delta\tau) \\ F_2 &= \frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} f_1(t)\, f_2(t+\tau-\Delta\tau)\, dt \approx F_2(\tau-\Delta\tau) \end{aligned}\right\}. \qquad (23.7)$$

После обработки в вычитающем устройстве на выходе системы получим

$$\Delta F = F_1 - F_2 = F_1(\tau+\Delta\tau) - F_2(\tau-\Delta\tau) \qquad (23.8)$$

или, раскладывая в ряд Тейлора,

$$\Delta F = F_1\tau + \Delta\tau F_1'(\tau) + F_2\tau + \Delta\tau F_2'(\tau) \approx 2\,\Delta\tau F'(\tau), \qquad (23.9)$$

т. е. ΔF пропорционален производной корреляционной функции (см. рис. 278).

Прослеживание на поверхности стереомодели горизонталей или профилей осуществляется особыми устройствами управления на основе сигналов, вырабатываемых корреляционными системами. Поиск горизонталей заключается в направленном совместном сканировании изображений стереопары в окрестности текущей точки горизонтали. Переход к следующей точке горизонтали производится смещениями снимков ΔX и ΔY по сигналам управления V_X и V_Y, выработанным под условием сохранения постоянства уровня корреляции. Проведение профилей проще, так как выполняется в режиме построчного механического сканирования снимков стереопары. При этом правый снимок постоянно осуществляет реверсивные подстроечные движения мотором, управляемым корреляционным узлом системы.

В заключение для иллюстрации зарубежных достижений приведем основные характеристики стереомата А-2000 (рис. 279). Стереомат А-2000 выпускается серийно швейцарской фирмой Вильда и является последней разработкой ** серии устройств, объединенных общим названием (стереомат I-АИSKOR, стереомат II, стереомат IV, стереомат В-8, стереомат А-2000).

Решение фотограмметрической засечки в приборе производится механическим путем. Визирование при проведе и горизонталей, создании ортофото-

---

* Для простоты в дальнейшем не будем писать влияние I.

** Разработан совместно швейцарской фирмой Вильда и американской фирмой «Raython». Начало разработки серии относится к 1956 г.

снимков и устранение поперечных параллаксов при взаимном ориентировании выполняется автоматически. Блок-схема автоматической системы приведена на рис. 280.

Фотоэлектронный преобразователь построен на двух электронно-лучевых (ЭЛТ) трубках. Преобразование изображений в электрические сигналы не исключает визирования глазами, что достигается использованием дихроических зеркал и освещением снимков монохроматическим светом. Синхронные растры электронно-лучевых трубок имеют хаотическую форму. Использование двух трубок позволяет сравнительно легко оптимизировать условия коррелирования изменением размеров и формы растра на них.

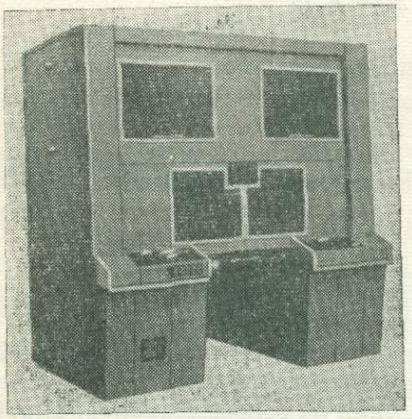


Рис. 279

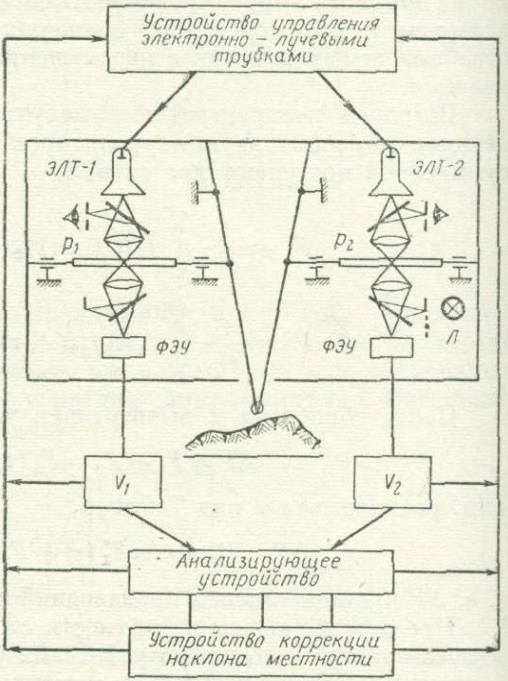


Рис. 280

Световые потоки, пройдя снимки, меняют яркость в зависимости от плотности почернения отдельных точек изображения. С помощью двух фотоумножителей модулированные световые потоки превращаются в электрические сигналы, которые после первичной обработки в блоках V_1 и V_2 поступают в анализирующее устройство. Последнее работает примерно по тем же принципам, которые были изложены ранее.

Результатом анализа являются несколько управляющих сигналов:

— поперечного параллакса. Используется для выполнения взаимного ориентирования снимков;

— продольного параллакса. Используется при профилировании стереомодели и проведении горизонталей;

— управления сервомоторами перемещений ΔX и ΔY для проведения горизонталей.

— Коррелированности изображений. Используется для управления размерами растра ЭЛТ в зависимости от контурности изображений и скорости отработки и служит критерием необходимости коррекции искажений из-за наклона местности.

Общий наклон местности оказывает существенное влияние на результаты коррелирования, так как один и тот же ее участок получается на снимках разного размера. Соответственно должны постоянно меняться размеры растра при преобразовании изображений. В стереомате существует особое решающее устройство коррекции наклона местности, которое формирует сигналы деформации растров в направлении осей X и Y. Деформированные проекции растров в плоскости снимков подсчитываются по формулам

$$\left.\begin{aligned}\Delta x &= \frac{f}{H}\frac{1}{1+\alpha\,\mathrm{tg}\,\beta_X+\omega\,\mathrm{tg}\,\beta_Y}[\Delta X_0(1+\omega\,\mathrm{tg}\,\beta_Y-\mathrm{tg}\,\Theta_X\,\mathrm{tg}\,\beta_X)-\\ &\qquad -\Delta Y_0(\omega\,\mathrm{tg}\,\beta_X+\mathrm{tg}\,\Theta_Y\,\mathrm{tg}\,\beta_X]\\ \Delta y &= \frac{f}{H}\frac{1}{1+\alpha\,\mathrm{tg}\,\beta_X+\omega\,\mathrm{tg}\,\beta_X}[\Delta Y_0(1+\alpha\,\mathrm{tg}\,\beta_X-\mathrm{tg}\,\Theta_Y\,\mathrm{tg}\,\beta_Y)-\\ &\qquad -\Delta X_0(\alpha\,\mathrm{tg}\,\beta_Y+\mathrm{tg}\,\Theta_X\,\mathrm{tg}\,\beta_Y]\end{aligned}\right\}, \quad (23.10)$$

где ΔX_0, ΔY_0 — проекции участков модели в направлении осей координат, α, ω — углы наклона снимков считываются на приборе с помощью потенциометров, β_X, β_Y — проекции угла β наклона текущего оптического луча на плоскости XZ и YZ системы координат, Θ_X, Θ_Y — проекции на плоскости XZ и YZ абсолютного угла наклона участка местности.

Испытания работы прибора показали возможность использования его для обработки плановых аэроснимков с целью картографирования в средних и мелких масштабах и при создании ортофотопланов.

Прибор неуверенно работает по снимкам плоской и пересеченной местности и т. д. Такие участки обрабатываются оператором — человеком.

Из других зарубежных приборов представляет интерес автоматический стереоплоттер АР-14, в котором одновременно анализируются участки изображений больших размеров.

§ 160. АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПРОФИЛОМЕТР МИИГАиК (АПМ)

Автоматический профилометр (АПМ), разрабатываемый в МИИГАиК * предназначается для профилирования стереомодели. В 1970 г. было закончено изготовление и испытание макета, сконструированного с учетом зарубежных достижений и опыта по созданию в МИИГАиК изогипсографа — прибора, в котором решена задача автоматического проведения горизонталей (предложение А. С. Скиридова). АПМ является первой в СССР опытной конструкцией, в которой реализованы все узлы, составляющие автоматическую систему. При разработке АПМ стремились максимально упростить конструкцию, сохраняя при этом надежность решения. Основные узлы АПМ представлены блок-схемой на рис. 281.

Оптико-электронный преобразователь, построенный на одной электронно-лучевой трубке, позволяет получить с двух фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) видеосигналы, отражающие изображения микроучастков. Синхронное сканирование изображений обеспечивается оптическим расщепителем. В оптическом канале перед ЭЛТ установлен дополнительный ФЭУ, управляющий яркостью ЭЛТ.

---

* Исследования выполняются под руководством Г. Д. Федорука.

Видеосигналы, пройдя блоки первичной обработки V_1 и V_2, попадают в устройства их анализа. Были опробированы три разновидности устройств анализа идентичности.

Одно построено для испытания функции (23.4), но использование коррелометра в нем осуществлено по иной схеме. Перекрестное коррелирование

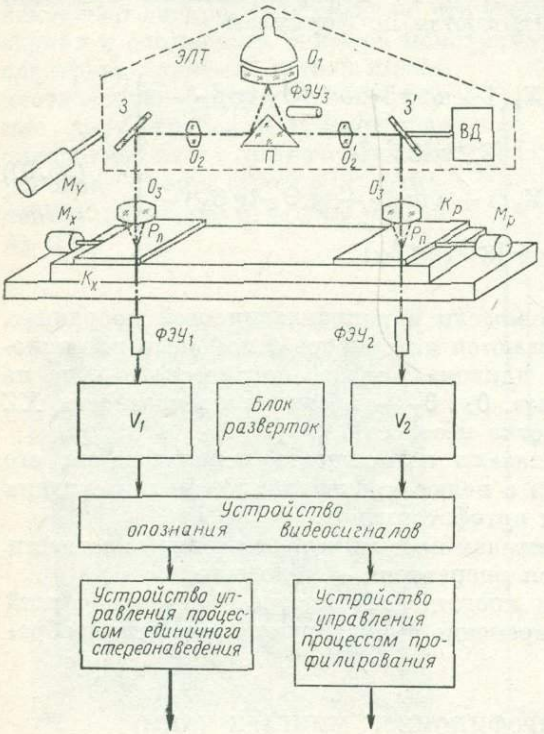


Рис. 281

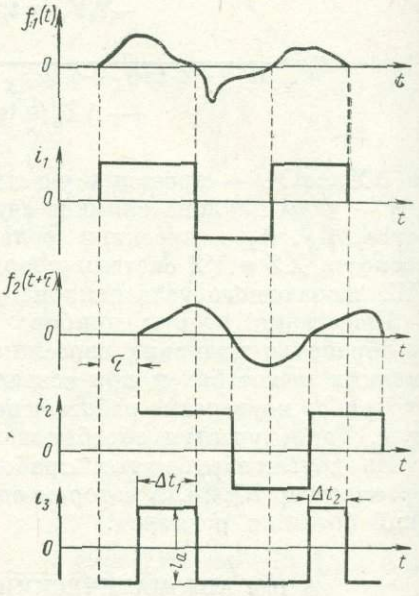


Рис. 282

сигналов с введением постоянной задержки $\Delta\tau$ заменено поиском экстремальной функции взаимной корреляции

$$F = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f_1(t) f_2(t)\, dt \qquad (23.11)$$

среди функций (23.4) с непрерывно меняющейся задержкой.

Для определения экстремальных значений функции F введено модулирующее воздействие в виде качания одного из зеркал $З^e$ проектирующей системы (см. рис. 281) с помощью вибродатчика (ВД). В результате на правом снимке анализируется множество микроучастков, сдвинутых в небольших пределах симметрично относительно участка, соответствующего среднему положению зеркала. Тем самым достигается непрерывное изменение задержки τ и выдаются данные для управления процессами прослеживания профиля стереомодели. Благодаря такому построению анализирующих устройств отпала необходимость в двух коррелометрах и значительно упростилось решение задачи формирования данных для отработки профиля.

Второе устройство анализа идентичности микроучастков находит максимум коэффициента корреляции, используя его связь с вероятностью совпадения знаков мгновенных значений электрических сигналов, отражающих изображения снимков. Такого рода коррелирующие устройства носят названия «полярных» или «знаковых» *.

Подаваемые на вход устройства электрические сигналы преобразуются в столообразные знакопеременные импульсы (рис. 282). Подсчитывается длительность совпадения положительных импульсов в двух сигналах Δt_{++}, которая

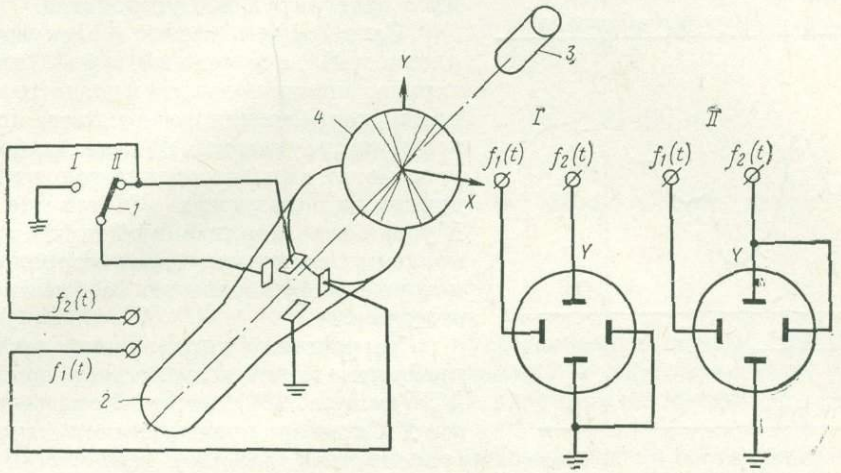


Рис. 283

выражается также в столообразных импульсах заданной высоты i_a. Последние интегрируются в соответствии с формулой

$$i_{++} = \frac{i_a \sum_1^m \Delta t_{++}}{T}. \qquad (23.12)$$

Доказано, что связь i_{++} с коэффициентом корреляции R может быть выражена формулой

$$R_i = \sin\left[\frac{\pi}{2}(4i_{++} - 1)\right]. \qquad (23.13)$$

Третье устройство анализа построено на электронно-лучевой трубке. Блок-схема устройства представлена на рис. 283.

Сигналы, отражающие анализируемые микроучастки изображений f_1 и f_2, пройдя усилитель, подаются на отклоняющие пластинки ЭЛТ. Тумблером *1* могут быть реализованы две схемы подключения сигналов, как показано на рисунке (*I* и *II*).

В результате подачи сигналов на пластинки трубки первым способом положение светового пятна в каждый текущий момент определится координатами

$$X = k_1 f_1(t); \qquad Y = k_2 f_2(t), \qquad (23.14)$$

---

* Полярный коррелятор, примененный в АПМ, построен по типу аналогичного устройства, разработанного в Акустическом институте АН СССР (С. Г. Гершман и Е. Л. Файндерг. Об измерении коэффициента корреляции. — «Акустический журнал», том I, 1955, вып. 4.

а во втором

$$X = k_1[f_2(t) - f_1(t)]; \quad Y = k_2 f_2(t). \tag{23.15}$$

Между экраном трубки *2* и фотоумножителем *3* стоит маска *4* переменных почернений. Плотность почернений по площади маски меняется по определенному закону. Таким образом, величина светового потока, проходящего через маску, будет являться функцией координат светящейся точки. Фотоэлектронный умножитель *3* воспринимает мгновение значения светового потока и направляет их в интегрирующее устройство.

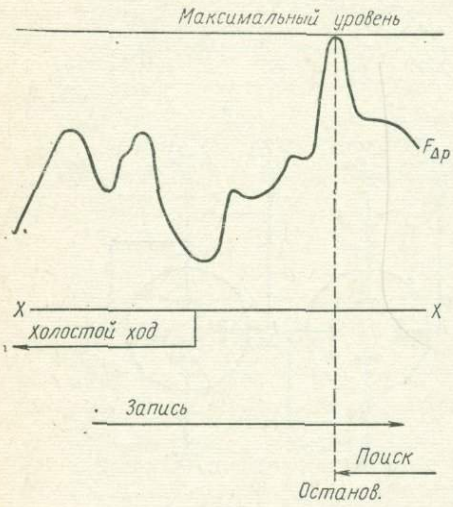


Рис. 284

Если задать закон распределения плотностей почернений по площади экрана, можно получить многие разновидности коррелятивного анализа идентичности микроучастков. В этом отношении устройство выгодно отличается от любых других, используемых для тех же целей. В устройстве анализа идентичности установлены последние два коррелометра, которые могут работать совместно или отдельно.

Устройство управления процессом профилирования воздействует на мотор $M_р$ (см. рис. 281), который смещает вдоль оси XX прибора правый снимок стереопары относительно левого с тем, чтобы растр ЭЛТ постоянно проектировался на одноименные участки парных изображений.

В результате качания зеркала $З'$ на выходе устройств анализа идентичности появляется переменный сигнал, амплитуда и фаза которого определяют величину и знак первой производной корреляционной функции в каждой точке. Этот сигнал усиливается и подается на двигатель $M_р$. Двигатель смещает правый снимок стереопары до тех пор, пока первая производная в точке, соответствующей максимуму функции корреляции, не станет равной нулю. При этом на выходе коррелятора появляется сигнал с частотой, равной двойной частоте двигателя, который останавливается, фиксируя положения идентичных участков.

Таким образом, в каждый текущий момент отслеживается точка профиля стереомодели, привязанная к середине микроучастков. Известными в фотограмметрии способами по данным измерения профиля стереомодели можно выполнить все работы по созданию фотопланов и орограмм.

Результаты анализа видеосигналов могут быть использованы для поиска отдельных точек профиля в статическом режиме, т. е. при неподвижном положении левого снимка. Для этого микроучасток левого снимка является задающим, затем находят ему идентичный участок правого снимка стереопары. Поиском управляет устройство для единичного стереонаведения.

При включении режима поиска мотором $M_р$ осуществляется движение правого снимка вдоль оси XX прибора в соответствии с программой, схема которой изображена на рис. 284. Вначале снимок совершает перемещения в крайнее левое положение (холостой ход), затем в крайнее правое. При перемещении снимка вправо запоминается максимальный уровень функции F непрерывного сравнения электрического сигнала исходного участка и всех текущих

в интервале перемещения правого снимка вдоль оси XX. Идентичный участок правого снимка находится при возвращении снимка снова в левое положение путем сравнения уровня значения F, поступаемого непрерывно, с запомненным. При их равенстве движение снимка прекращается.

Исследования показали высокую надежность способа. Предложено специальное устройство, использующее принцип единичного стереонаведения для профилирования стереомодели. Достаточно осуществлять движения зеркала $3'$ проектирующей системы (см. рис. 281) по программе движения снимка.

Компенсация ошибки наклона модели осуществляется особым оптико-электронным устройством.

§ 161. УСТРОЙСТВА, ОСНОВАННЫЕ НА ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

В устройствах, основанных на цифровой технике (ЭВМ), также можно выделить три основных узла:

— фотоцифровой преобразователь,

— электронную вычислительную машину,

— механизмы отображения результатов.

Фотоцифровой преобразователь (ФП) представляет плотности почернений и координаты отдельных точек фотоизображений в закодированной форме. Информация затем вводится в ЭВМ или фиксируется на материале, удобном для последующего ввода.

ЭВМ выполняет операции с введенной информацией по составленной заранее программе. В машине отождествляются одноименные точки изображений, *решаются фотограмметрические преобразования, вырабатываются данные для* отображения всех элементов карты. Последние выводятся и служат исходными для работы механизмов, воспроизводящих фотографическое изображение на картах, вычерчивающих горизонтали или орограммы, наносящих километровую сетку. Использовать ЭВМ только для отождествления одноименных точек при составлении карт нецелесообразно. Отождествление одноименных точек в ЭВМ производится в соответствии с различными алгоритмами.

В картосоставительских системах распространены алгоритмы вероятностно-статистических способов анализа идентичности изображений, подобно аналоговому решению. При использовании ЭВМ можно реализовать эти способы более оперативно, так как в машине хранится информация о больших участках изображений и не лимитировано применение любого математического аппарата.

Рассмотренные нами вероятностно-статистические способы отождествления одноименных точек для обработки снимков многих промышленных объектов неприменимы. Изображения таких объектов представляют собой совокупность крупных контуров одинакового почернения, а потому не дают необходимой информации. В МИИГАиК Г. Д. Федоруком разработан детерминированный способ отождествления одноименных точек, который применим и для таких объектов. Согласно этому способу вначале производится координирование точек границ областей одинакового почернения, затем отдельные точки связываются в линии, а линии в замкнутые контуры одинакового почернения. Отождествление одноименных контуров производится по совпадению признаков, записанных в процессе образования контуров: числа точек перегиба линий, прямолинейных и криволинейных участков, плотностей почернений внутри контура и соседних

с ним и т. д. После отождествления отдельных контуров соответственные точки его границ находятся простым нормированием.

Детерминированный способ применим и к анализу топографических аэроснимков, но требует хранения в ЭВМ большого числа данных. Минимизация информации является проблемой, от решения которой зависит широта распространения способа.

Автоматические картосоставительные системы изготовлены в опытно-производственных вариантах.

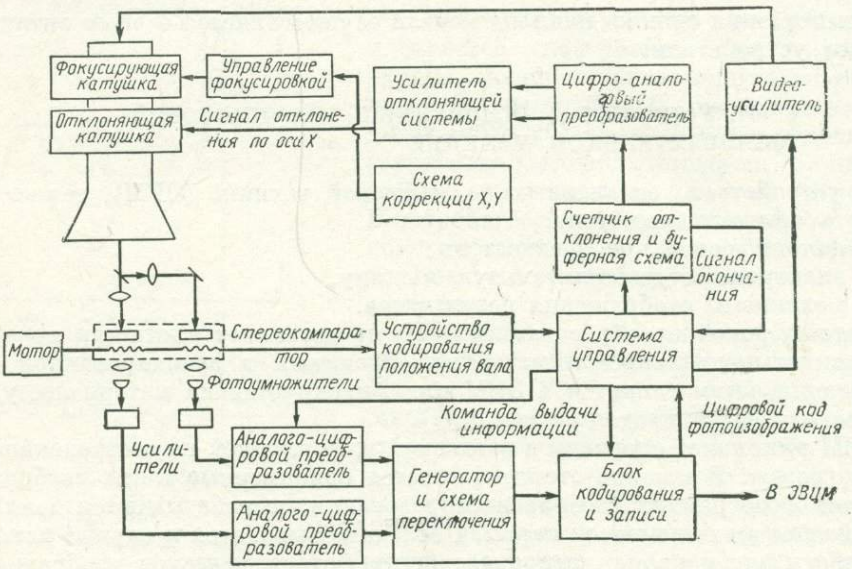


Рис. 285

На рис. 285 представлена блок-схема картосоставительской системы США.

Фотоцифровой преобразователь (ФП) установлен на переоборудованном стереокомпараторе СТК-1 Вильда. ФП построен на электронно-лучевой трубке, которая служит и для воспроизведения фотоизображений по данным счета на ЭВМ, т. е. стереокомпаратор и ФП являются одновременно механизмами отражения результатов. Разрешающая способность ФП 16 или 32 точки на 1 мм. Плотности кодируются 8, 16 или 32 градациями.

В одном варианте системы выполняется пять программ: ориентирование снимков по опорным точкам, трансформирование, отождествление одноименных точек, получение данных для составления ортофотоснимков и проведения горизонталей, нанесение километровой сетки. Отождествление одноименных точек производится испытанием корреляции цифровой информации небольшого массива для одного снимка с последовательными массивами второго.

В другом варианте системы существует только три основные программы: управление, нанесение горизонталей, изготовление ортофотоснимка.

Время обработки одной стереопары (формат снимков 23 $\times$ 46 см) примерно 1 ч. Кроме этой, в США разработано несколько аналогичных систем.

§ 162. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ФОТОКАРТОГРАФ

В Советском Союзе также ведутся разработки автоматических картосоставительских систем на базе ЭВМ. Такой системой является аналитический фотокартограф, предложенный А. Н. Лобановым и И. Г. Журкиным и предназначенный для получения ортофотоснимков с изображением рельефа местности [27]. Блок-схема фотокартографа представлена на рис. 286.

Существенной особенностью автоматического фотокартографа является полное отсутствие механических связей, благодаря чему уменьшается инерционность прибора в целом. Это обеспечивается узлами формирования растра и

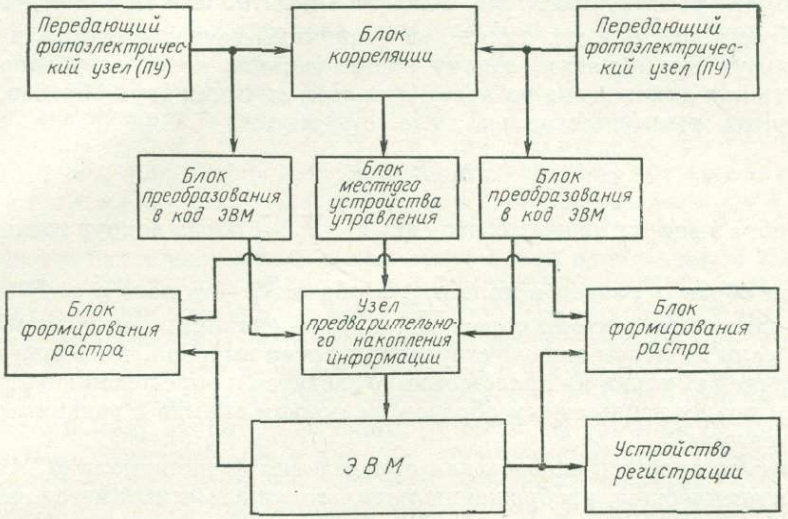


Рис. 286

программным управлением разверткой, что дает возможность непосредственно со снимка вводить в машину информацию о любых его точках, координаты которых задаются машиной. Программное управление разверткой обладает еще и тем преимуществом, что при таком способе считывания память машины не загружается лишней информацией, так как сам снимок служит запоминающим устройством, к которому можно обращаться в любое время в соответствии с программой, реализующей заложенный в машину алгоритм обработки стереопары.

Конечный результат обработки стереопары получается также без применения механических устройств: он изображается на экране электронно-лучевой трубки и фиксируется фотографическим способом.

С целью повышения скорости стереоизмерений процесс идентификации соответственных точек стереопары разбит на два этапа: 1) идентификация соответственных участков стереопары с помощью быстродействующего коррелятора и 2) идентификация соответственных точек с помощью ЭВМ.

Кроме повышения скорости стереоизмерений такой метод идентификации точек имеет еще одно существенное достоинство: уменьшается объем информации, необходимой для ввода в ЭВМ, что значительно снижает требования к машине.

В аналитическом фотокартографе задача идентификации точек на стереопаре рассматривается как статистическая задача по распознаванию образов при наличии случайных искажений или помех.

Под образом на снимке понимается отдельная область снимка со всей информацией, *которая заключена в эту область, причем размеры и конфигурация* образа могут быть самыми различными.

Следовательно, снимок рассматривается как совокупность отдельных образов, каждый отдельный образ — как совокупность новых образов, более элементарных.

Совокупность элементарных образов, составляющих другой, более общий образ R, будем рассматривать как векторное поле образа $\bar{R}$, а каждый элементарный образ в отдельности примем за единичный вектор этого поля $\bar{\rho}_i$.

Используя эти понятия, задачу идентификации точек стереопары можно представить как нахождение на левом и правом снимках двух образов, расстояние между которыми минимально, т. е. отыскание

$$\min |\bar{R}_л - \bar{R}_п|, \tag{23.16}$$

где $\bar{R}_л$ — образ вокруг точки левого снимка, $\bar{R}_п$ — образ вокруг точки правого снимка.

Причем образ $\bar{R}_л$ задан в поле $\bar{\rho}_{i\,л}$, а образ $\bar{R}_п$ — в поле $\bar{\rho}_{i\,п}$. В этом случае $\rho_{i\,л}$ — единичные векторы образа $\bar{R}_л$, а $\rho_{i\,п}$ — единичные векторы образа $\bar{R}_п$.

Итак, если на левом снимке стереопары точка выбрана, то задача нахождения идентичной ей точки на правом снимке сводится к определению кратчайшего расстояния между неизвестным образом на правом снимке и заданным образом на левом снимке.

В качестве простого способа для определения функционала (23.16) применительно к оптическому изображению использован известный метод скалярного перемножения двух образов, т. е. вычисление коэффициента

$$K = \frac{(\bar{R}_л \bar{R}_п)}{|\bar{R}_л|\,|\bar{R}_п|}, \tag{23.17}$$

где $\bar{R}_л$ — образ на левом снимке, $\bar{R}_п$ — образ на правом снимке.

После преобразований можно получить следующее выражение, описывающее нахождение идентичных образов на стереопаре:

$$K = \frac{\sum (\rho_{i\,л} - \rho^0_л)(\rho_{i\,п} - \rho^0_п)}{\sqrt{\sum (\rho_{iл} - \rho^0_л)^2}\,\sqrt{\sum (\rho_{i\,п} - \rho^0_п)^2}}, \tag{23.18}$$

где

$$\left.\begin{aligned} \rho^0_л &= \frac{1}{N}\sum \rho_{iл} \\ \rho^0_п &= \frac{1}{N}\sum \rho_{i\,п} \end{aligned}\right\}, \tag{23.19}$$

N — размерность образа.

Таким образом, нахождение идентичных точек сводится к определению *максимального коэффициента K при сравнении заданного образа на левом* снимке со всем разнообразием образов правого снимка.

Для сужения области поиска идентичных точек накладываются дополнительные условия (трансформирование снимков, предельные значения продольных параллаксов). Благодаря этому уменьшается число образов на правом снимке, которые непосредственно должны участвовать в процессе идентификации точек, и резко возрастает эффективность метода.

§ 163. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СТЕРЕОИЗМЕРЕНИЙ

Исследования возможностей автоматизации стереоизмерений показывают, что задача может быть решена. Однако во многих случаях использование автоматических систем не обходится без вмешательства человека. Поэтому современные достижения в этой области пока нельзя считать окончательными. Совершенствованию подлежат как теоретические основы, так и технические средства отдельных решений автоматизации стереоизмерений.

Совершенствование может выполняться по разным направлениям. Из них главными являются: повышение информативности исходных данных для поиска одноименных изображений и оптимизация математической и логической основ анализа исходных данных.

В качестве исходных данных в настоящее время используются фотоизображения и видеосигналы или цифровые характеристики, отражающие изображения. В процессе формирования данных должны быть сохранены: разрешающая способность, светопередача, контраст, геометрические свойства снимков и т. д.

Особый интерес имеют решения по минимизации исходных данных. С одной стороны, минимизация может производиться за счет отбраковки паразитной информации, например фоновой, от областей снимков одинакового почернения. Последнее позволит увеличить объем считываемых данных и обеспечить лучшее использование памяти автоматических устройств.

Минимизация может быть достигнута за счет преобразований фотографических изображений в особую форму, являющуюся функцией размеров деталей их взаимного расположения, формы и т. д. Возможно, в дальнейшем удастся выразить фотоизображения символами, несущими интегральные характеристики об объекте (например, как символы в химии).

Оптимизация математической и логической основ анализа исходных данных может быть осуществлена за счет разработки более совершенных математических методов, изучения законов стереовосприятия у человека и достижений в других отраслях науки и техники. Сейчас трудно предугадать все конкретные пути решения этой проблемы.

В этой связи представляют интерес методы распознавания объектов (образов) на снимках по различным признакам: геометрическим, спектрометрическим, дешифровочным и т. д. Человек при стереоизмерениях постоянно оперирует методами распознавания образов, признаки которых он вырабатывает в течение многих лет и хранит в своей памяти.

Использование методов распознавания образов позволяет автоматизировать один из полевых процессов создания карты — дешифрирование.

Когда поиск одноименных изображений производится на основе максимальной их коррелятивности, тем же целям служат преобразования исходных данных с целью исключения влияния общего наклона анализируемых участков местности и шероховатости рельефа в пределах участков. Если первая часть преобразований в какой-то мере выполняется, то вторая являются пока проблемой.

Для учета изменения рельефа в пределах микроучастков необходимо уметь менять форму развертки бегущего луча в фотопреобразователях или характер анализа видеоинформации в зависимости от конкретной формы объекта.

Следует также разработать способы автоматического поточечного ортотрансформирования изображений. Только тогда можно говорить о фотопланах в строгом их понимании.

Особый интерес для автоматизации фотограмметрических процессов представляет использование голографии *. Голографические изображения (голограммы) обладают многими качествами, которых лишены обычные фотографии. В этой связи остановимся коротко на принципах получения голограмм и их свойствах.

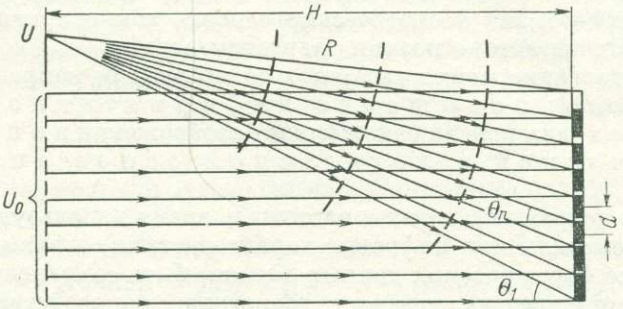


Рис. 287

Голографию можно определить как метод получения изображений предметов и обработки оптических сигналов, основанный на явлении интерференции света. Голограммой, содержащей интерференционную картину, в закодированной форме записывается вся информация о волновом фронте света, распространяющегося от объекта. Амплитуда колебаний регистрируется как изменение прозрачности фотоэмульсии, а фаза — распределением полос интерференционной картины.

Известно, что частоты электромагнитных колебаний в световой волне настолько велики (10^{14}—10^{15} Гц), что только сама волна света пригодна в качестве эталона для фиксации изменения его характеристик. Поэтому при изготовлении голограмм обеспечивается проектирование на фотоприемник двух световых потоков от одного источника — непосредственного (опорного) и отраженного от голографируемого объекта (сигнального). Очевидно, что в отраженном потоке световые волны от разных точек объекта придут к плоскости голограммы в разных фазах по отношению к одной и той же фазе волн опорного потока. Происходит сложение фаз двух потоков, в результате образуется сложная интерференционная картина, которой зафиксировано пространственное расположение отдельных точек объекта.

Рисунок 287 поясняет построение одной из разновидностей голографии (френелевской) для точечного объекта. В случае френелевской голографии записывается интерференционная картина от сферической волны, отраженной объектом, и плоской опорной волны при малом расстоянии до объекта. Сигнальные волны падают в разные точки фоточувствительного слоя под разными углами

---

* Holos — в переводе с греческого означает весь (полный). Изобретение голографии принадлежит английскому физику Габору (1947 г.).

к направлению опорной волны, т. е. практически в любом месте голограммы существует информация о заснятом объекте. Справа на рисунке показаны диаграммы сложения фаз для темных и светлых полос интерференционной картины.

Интерференционную картину принято характеризовать:

пространственной частотой

$$\nu = \frac{\sin\Theta}{\lambda} \tag{23.30}$$

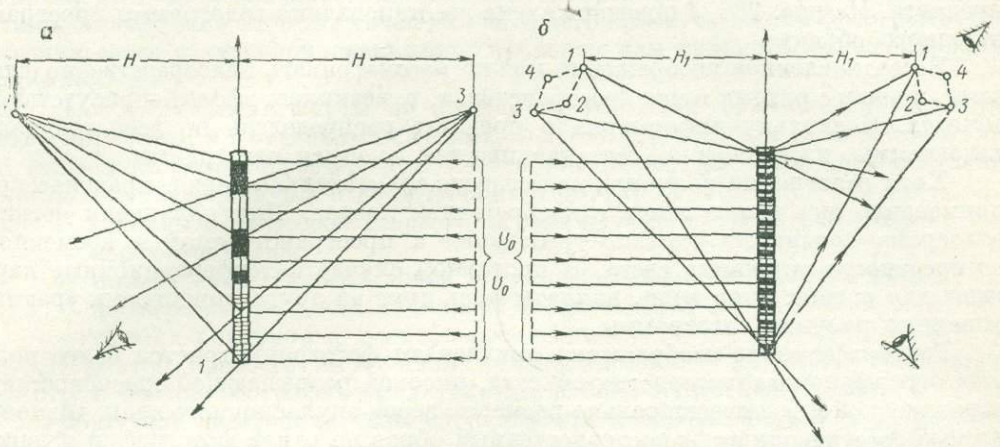


Рис. 288

и интенсивностью

$$\langle I \rangle = [v\cos(\omega t - kR)] + v_0(\cos\omega t - kH) = \frac{v^2+v_0^2}{2} + vv_0\cos(kR-kH) =$$

$$= \frac{v^2+v_0^2}{2} + u_0^*\frac{u}{2} + u_0\frac{u^*}{2}, \tag{23.21}$$

где v и v_0 — амплитуды сигнальной и опорной волн длины λ, u и u_0 — комплексы этих волн, k — волновое число, H, R, Θ — показаны на рисунке.

Следует иметь в виду, что на одной голограмме последовательным экспонированием можно зафиксировать информацию о нескольких предметах или цветовые характеристики одного предмета.

Рассмотрим теперь, что будет происходить, если полученную голограмму осветить световым потоком, аналогичным опорному пучку (рис. 288, *а*). Проходя через голограмму, лучи дифрагируют с интерференционными полосами и восстанавливают три рода пучков света: неотклоненный пучок (на рисунке не показан), расходящийся пучок, имеющий мнимую точку сходимости за голограммой, сходящийся пучок, имеющий действительную точку сходимости перед голограммой.

Появление трех пучков можно объяснить следующим образом. Пусть в выражении (23.21) опорная волна имеет $v = 1$, а комплекс сигнальной волны $u = ve^{i}$. Тогда

$$\langle I \rangle = \frac{1+v^2}{2} + \frac{u+u^*}{2}. \tag{23.22}$$

Просвечивание голограммы опорной волной u_0 дает в плоскости голограммы волну

$$v_{xy}=v_0\langle 1\rangle=\frac{1+v^2}{2}+\frac{u}{2}+\frac{u^*}{2}, \tag{23.23}$$

откуда видно, что результирующая волна имеет три компонента, из которых второй несет полную информацию в виде восстановленной сигнальной волны. В точках схода лучей восстанавливается видимое изображение.

Сказанное о голографии точечного объекта справедливо и для объемного предмета. На рис. 288, *б* показана схема восстановления голограммы пространственного объекта.

Восстановленное изображение можно рассматривать непосредственно глазами, причем с разных точек пространства, т. е. возникает эффект «присутствия» объекта. Поскольку информация о предмете распределена по всей площади голограммы, изображение восстанавливается по части голограммы.

Хотя голография получила известность сравнительно давно, практическое применение она нашла лишь с изобретением лазера. Для получения четких голограмм возникают жесткие требования к пространственной и временной когерентности источника света. В противном случае интерференционные картины для разных длин волн, накладываясь друг на друга, приводят к «размазыванию» рисунка голограммы.

Голографические изображения привлекают фотограмметристов более полным отражением характеристик объекта, высокой разрешающей способностью, ограниченной практически только размером зерен эмульсионного слоя, возможностью восстанавливать пространственный образ по одной фотографии и даже по части ее и др. В настоящее время ведутся исследования по разработке методов и приборов для восстановления и измерения модели объекта по голограммам. В области автоматизации стереоизмерений известны исследования по использованию когерентных источников света для фильтрации фотоснимков. По интерференционным картинам от пары снимков затем более уверенно производится поиск соответственных участков по максимуму корреляционных функций. Существуют предложения для нанесения горизонталей на пространственный объект. Так, если объект освещать двумя взаимно когерентными пространственно разнесенными источниками света и одним опорным получается стереоголограмма при восстановлении которой горизонтали получаются как результат интерференции волн от разнесенных источников. Этим, очевидно, не исчерпываются возможные области применения голографии.

В заключение можно отметить, что в настоящее время достигнуты большие успехи в разработке проблемы автоматизации стереоизмерений. Многие решения доведены до такой степени, что могут быть внедрены в производство. Уже сейчас можно освободить человека от участия в утомительном и малопроизводительном процессе стереоизмерений при выполнении некоторых фотограмметрических работ. Дальнейшее развитие исследований в области автоматизации позволит решить эту проблему полностью.

Глава 24

СТЕРЕОТОПОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ КАРТ

§ 164. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ СПОСОБЫ

Стереотопографический метод в отличие от комбинированного позволяет получить в камеральных условиях по снимкам не только контурную часть карты, но и изображение рельефа. Полевые работы в этом случае включают лишь определение опорных точек для внешнего ориентирования фотограмметрических сетей и дешифрирование или проверку камерального дешифрирования снимков.

Для составления карты по снимкам используют обычно универсальные стереоприборы, а в отдельных случаях — дифференцированные. В соответствии с этим в стереотопографическом методе различают два способа составления карты — универсальный и дифференцированный.

К основным процессам стереотопографического метода относятся:

— аэрофотосъемка;

— определение опорных точек и дешифрирование снимков в поле;

— фотограмметрическое сгущение опорной сети;

— съемка контуров и рельефа по снимкам.

Масштаб снимков выбирается в зависимости от масштаба создаваемой карты и физико-географических условий района картографирования.

Фокусное расстояние съемочной камеры, масштаб снимков и их качество должны обеспечивать возможность создания достаточно подробной и точной карты при наименьшем объеме полевых и камеральных работ.

Из выражения (14.10) следует

$$\delta h = H_1 \frac{\delta \Delta p}{p}, \tag{24.1}$$

т. е. точность определения высот точек местности по снимкам тем выше, чем меньше высота фотографирования. Последняя будет меньше, если меньше фокусное расстояние съемочной камеры. Поэтому для стереотопографического метода создания карт применяют короткофокусные аэрофотоаппараты. Однако не во всех случаях можно использовать короткофокусную оптику. Например, при съемке горных и высокогорных районов нельзя применять фотокамеры с очень коротким фокусным расстоянием, так как получаются слишком большие разности продольных параллаксов и затрудняется, а в некоторых случаях и вовсе исключается стереоскопическое изучение снимков. Опытным путем установлено, что разности продольных параллаксов не должны превышать 15 мм.

Для определения зависимости между фокусным расстоянием фотокамеры и разностью продольных параллаксов подставим в равенство (14.10) значение $H_1 = fm$, где m — знаменатель масштаба снимка. Получим

$$f = \frac{h}{m} \frac{\Delta p}{p}. \tag{24.2}$$

Пусть $h = 1000$ м, $m = 40\,000$, $p = 60$ мм и $\Delta p = 15$ мм. Тогда $f = 100$ мм. Таким образом, в данном случае не следует пользоваться аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием меньше 100 мм.

Из выражения (24.1) следует, что высоту фотографирования, соответствующую заданной точности определения высот точек местности δh, можно получить по формуле

$$H = \frac{p}{\delta \Delta p} \delta h, \tag{24.3}$$

где p — продольный параллакс, δh — средняя ошибка, допустимая при определении высот точек, подписываемых на карте, $\delta \Delta p$ — средняя ошибка определения разности продольных параллаксов.

Ошибка $\delta \Delta p = 0{,}04$ мм, если снимки обрабатываются на стереопроекторе; $\delta \Delta p = 0{,}07$ мм, если применяется стереометр, и $\delta \Delta p = 0{,}09$ мм, если используется мультиплекс. Подставим эти значения $\delta \Delta p$ в формулу (24.3), полагая, что $p = 70$ мм.

Тогда

$$H = 1800 \delta h \tag{24.4}$$

для стереопроектора,

$$H = 1000 \delta h \tag{24.5}$$

для стереометра и

$$H = 800 \delta h \tag{24.6}$$

для мультиплекса [21, 31].

Пусть требуется составить на стереопроекторе карту масштаба 1 : 25 000 горного района. Согласно наставлениям по топографической съемке в данном случае средняя ошибка высот, подписываемых на карте, не должна превышать 2,5 м. Таким образом, высота фотографирования, как следует из равенства (24.4), может быть 4500 м, а масштаб снимков при $f = 100$ мм будет равен 1 : 45 000.

Для фотографирования местности применяют аэрофотоаппараты с фокусными расстояниями от 50 до 200 мм. Равнинные и холмистые районы фотографируют короткофокусными аэрофотоаппаратами с большим полем зрения, чтобы обеспечить необходимую точность определения высот. Горные и высокогорные районы фотографируют аэрофотоаппаратами с фокусными расстояниями 100—200 мм.

Перекрытия снимков в равнинных и холмистых районах 60 ×30%, а в горных и высокогорных увеличиваются в соответствии с рельефом местности. Часто и в равнинных или холмистых районах увеличивают продольное перекрытие снимков до 80%, чтобы обеспечить возможность двукратного независимого построения фотограмметрических сетей (по четным и нечетным снимкам).

Аэрофотосъемка производится с применением гиростабилизированной установки. В процессе фотографирования местности фиксируются показания статоскопа и радиовысотомера. Кроме того, при картографировании недоступной и труднодоступной местности в полете регистрируются показания радиогеодезической системы, позволяющие определить плановые координаты точек фотографирования. В этом случае точки фотографирования служат плановым обоснованием съемки.

Вместо черно-белой аэропленки часто используют спектрозональную или цветную, значительно расширяющие возможности дешифрирования снимков.

Отдельные районы, например обжитые горные, фотографируют дважды: для дешифрирования в масштабе, приблизительно равном масштабу создаваемой карты, или в более крупном масштабе, и для составления карты в масштабе в два раза меньше масштаба карты.

Точки полевой подготовки снимков (опознаки) могут быть планово-высотными, плановыми и высотными. В качестве таких точек выбирают резко очерченные контурные точки, уверенно опознаваемые на снимках. Опорные точки отмечают на снимках. Кроме того, для каждого опознака составляют абрис, показывающий его положение относительно ближайших контуров. Если на местности нет естественных контуров, уверенно опознаваемых на снимках, то опознаки маркируются. Эту работу выполняют до аэрофотосъемки. Для маркировки опорных точек применяют различные знаки, учитывая при этом масштаб снимков и условия местности. Например, в сплошном лесу или кустарнике вырубают площадки в виде квадрата или прямого угла. Пункты триангуляции и реперы, если они не могут быть опознаны на снимках, также маркируют.

Для определения геодезических координат опознаков применяют аналитические геодезические способы и метод фототеодолитной съемки (в высокогорных районах).

Количество опознаков и их расположение зависят от применяемого способа фотограмметрического сгущения и масштаба карты; они рассчитываются при составлении проекта полевой подготовки снимков по формулам, характеризующим накопление ошибок в фотограмметрических сетях.

Обозначим через m_L среднюю квадратическую ошибку определения планового положения точки фотограмметрической сети. Очевидно,

$$m_L = \sqrt{m_{X_c}^2 + m_{Y_c}^2},$$

где m_{X_c} и m_{Y_c} — составляющие ошибки m_L по осям координат X и Y.

Пусть опорная сеть сгущается способом маршрутной пространственной фототриангуляции без использования элементов внешнего ориентирования снимков. Тогда составляющие ошибки m_L можно найти по формулам (22.7). В результате получим

$$m_L = 0{,}30 m m_q n^{3/2}, \tag{24.7}$$

где m — знаменатель масштаба снимка, m_q — средняя квадратическая ошибка измерения поперечного параллакса, n — число стереопар между плановыми опознаками.

Величина

$$m_L = M m_l,$$

где m_l — допустимая средняя квадратическая ошибка определения планового положения точки сети на карте, а M — знаменатель масштаба карты. Подставив это значение m_L в выражение (24.7), получим

$$n = 2{,}22 \sqrt[3]{\left(\frac{M}{n}\,\frac{m_l}{m_q}\right)^2}. \tag{24.8}$$

Наставления по топографическим работам требуют, чтобы средняя ошибка δl определения на карте планового положения точки фотограмметрической сети не превышала 0,35 мм. Следовательно, $m_l = \pm 1{,}25 \times \delta l = \pm$ $\pm 0{,}44$ мм.

Пусть для аналитического способа пространственной фототриангуляции $m_q = \pm 0{,}02$ мм, а для фототриангуляции на универсальном стереоприборе $m_q = \pm 0{,}04$ мм. Тогда по формуле (24.8) найдем

$$n_з = 17{,}4 \sqrt[3]{\left(\frac{M}{m}\right)^2} \tag{24.9}$$

для аналитического способа маршрутной фототриангуляции и

$$n_{\text{п}} = 11{,}0\sqrt[3]{\left(\frac{M}{m}\right)^2} \tag{24.10}$$

для фототриангуляции на универсальном стереоприборе.

Если $M = 25\,000$, а $m = 40\,000$, то $n_{\text{а}} = 13$, а $n_{\text{п}} = 8$.

Теперь найдем число стереопар между высотными опознаками, полагая, что маршрутные пространственные фотограмметрические сети создаются без использования элементов внешнего ориентирования снимков. Для этого применим формулу (22.7), из которой следует

$$n = 2{,}08\sqrt[3]{\left(\frac{bm_{Z_c}}{fmm_q}\right)^2}, \tag{24.11}$$

где m_{Z_c} — средняя квадратическая ошибка определения высоты точки фотограмметрической сети, f — фокусное расстояние фотокамеры, b — базис фотографирования в масштабе снимка, m_q — средняя квадратическая ошибка измерения поперечного параллакса, m — знаменатель масштаба снимка, n — число стереопар между высотными опознаками.

В качестве величины m_{Z_c} следует выбирать допустимую среднюю квадратическую ошибку определения высоты, подписываемой на карте.

Пусть $m = 40\,000$, $f = 0{,}1$ м, $b = 70$ мм, $m_q = \pm 0{,}02$ мм и $m_{Z_c} = \pm 2{,}0$ м (район холмистый, масштаб карты 1 : 25 000). Тогда по формуле (24.11) получим: $n = 3$.

Зная число стереопар между опознаками, можно подсчитать допустимое расстояние между ними

$$L = nB = nmb, \tag{24.12}$$

где $B = mb$ — базис фотографирования.

Дешифрирование выполняется на снимках, фотосхемах или фотопланах. Сплошное полевое дешифрирование производят на местности с большим количеством объектов, имеющих особо важное хозяйственное и оборонное значение. К таким объектам относятся населенные пункты, промышленные и гидротехнические сооружения, крупные узлы дорог и др. В других районах выполняют маршрутное полевое дешифрирование, а затем камеральное.

Для дешифрирования городов и крупных населенных пунктов используют увеличенные снимки и материалы крупномасштабных съемок.

Опорную сеть сгущают обычно аналитическим способом пространственной фототриангуляции или на универсальных стереоприборах. В результате сгущения сети каждую пару обеспечивают 4—6 опорными точками, которые используют для ориентирования снимков при составлении топографической карты.

Карту составляют, как правило, на универсальных стереоприборах — на стереопроекторе Г. В. Романовского, стереографе Ф. В. Дробышева и др. В отдельных случаях для составления карты применяют дифференцированные приборы — стереометр Ф. В. Дробышева и трансформатор или проектор.

На универсальном стереоприборе снимают контуры и рельеф и выполняют камеральное дешифрирование. Если на местности много контуров, то в качестве основы для составления карты используют не чистый планшет, а фотоплан или ортофотоплан. Это освобождает оператора от трудоемкой работы по съемке контурной части карты.

§ 165. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СОЗДАНИЯ КАРТ

Рассмотрим кратко технологию создания карт масштаба 1 : 25 000 стереотопографическим методом на различные районы [21, 31].

Плоскоравнинные районы. В открытых районах при сечении рельефа 2,5 м аэрофотосъемку выполняют аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 или 55 мм в масштабе 1 : 20 000 с перекрытиями снимков 80 × ×30%. Залесенные доступные для стереотопографической съемки районы фотографируют аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 100 мм в масштабе 1 : 18 000 с перекрытиями снимков 80 ×30%.

Плановые опознаки располагают рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов на расстоянии, не превышающем восьми базисов фотографирования. Высотные опознаки размещают по углам секций маршрута, состоящих не более чем из четырех базисов фотографирования.

Сгущение опорной сети производят аналитическим способом при помощи стереокомпаратора и ЭЦВМ или на стереопроекторе и стереографе.

Контуры на карте получают при помощи фотоплана. Рельеф снимают на стереографе или стереопроекторе или на топографическом стереометре.

Равнинно-пересеченные и всхолмленные районы. Для создания карты открытых районов с сечением рельефа 5 м аэрофотосъемку выполняют аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 мм в масштабе 1 : 30 000 с перекрытием снимков 80 ×30%. В залесенных доступных для стереотопографической съемки районах применяют аэрофотоаппарат с фокусным расстоянием 100 мм; снимки получают в масштабе 1 : 28 000 с перекрытием 80 ×30%. Тундровые и северные лесотундровые районы фотографируют аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 мм в масштабе 1 : 35 000 с перекрытием снимков 80 ×30%.

Плановые и высотные опознаки располагают рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов на расстоянии восьми базисов фотографирования, в тундровых и северных лесотундровых районах на расстоянии десяти базисов фотографирования.

Опорную сеть сгущают аналитическим способом или на стереографе и стереопроекторе. В открытых районах используют показания радиовысотомера и статоскопа, а в залесенных — только показания статоскопа. Для получения контурной части карты составляют фотоплан. Рельеф снимают на стереографах или на топографических стереометрах.

Районы песчаных пустынь. Для создания карты этих районов с сечением рельефа 5 м аэрофотосъемку производят аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 или 100 мм в масштабе 1 : 30 000—1 : 34 000 с перекрытиями снимков 80 ×30%.

Точки плановой и высотной привязки снимков размещают рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов на расстоянии восьми базисов фотографирования по одному планово-высотному опознаку на поперечных перекрытиях маршрутов.

На отдельных участках, где отсутствуют уверенно опознаваемые контуры, дополнительно к основной аэрофотосъемке в том же масштабе прокладывают каркасные маршруты вдоль рядов планово-высотных опознаков (через один ряд). На концах каркасных маршрутов и через каждые 20 км определяют по два высотных опознака, располагаемые по обе стороны от оси маршрута. Опознаки для привязки каркасных маршрутов, как правило, маркируют.

Опорную сеть сгущают аналитическим способом пространственной фототриангуляции или на стереографах и стереопроекторах с использованием показаний статоскопа и радиовысотомера.

Для составления контурной части карты используют фотоплан. Съемку рельефа производят на стереографах, стереопроекторах и топографических стереометрах.

Районы плоскогорий, низких и средних гор. Эти районы фотографируют дважды:

— в масштабах 1 : 25 000—1 : 30 000 аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 100 или 140 мм с перекрытием снимков 60 ×30% (для дешифрирования и редакционных работ);

— в масштабе 1 : 50 000 (для долин) аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 мм в открытых районах и 100 мм в залесенных районах с перекрытием снимков 80 ×30% (для сгущения опорной сети и составления карты).

Аэрофотосъемку в масштабе 1 : 50 000 выполняют после маркировки пунктов государственной геодезической сети и точек съемочной сети или после выбора на местности естественных опознаков.

Планово-высотную подготовку снимков выполняют по одному из двух вариантов:

1. Планово-высотные опознаки размещают на каждом маршруте не реже чем через восемь базисов фотографирования, а в тундровых и лесотундровых районах — не реже чем через десять базисов фотографирования. Крайние стереопары секций обеспечивают двумя планово-высотными опознаками.

2. Планово-высотные опознаки размещают рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов на расстоянии между опознаками в ряду 5—8 км, а между рядами — семь базисов фотографирования. Опознаки размещают по обе стороны оси каркасного маршрута. Через каждые 30 км каркасного маршрута по углам стереопары определяют по три планово-высотных опознака.

В случае применения второго варианта планово-высотной подготовки снимков одновременно с аэрофотосъемкой в масштабе 1 : 50 000 прокладывают каркасные маршруты примерно в том же масштабе с 90%-ным продольным перекрытием. Расстояние между осями каркасных маршрутов — не более семи базисов фотографирования.

Опорную сеть сгущают аналитическим способом пространственной фототриангуляции или на стереографе и стереопроекторе. Оригиналы карт составляют на стереографах и стереопроекторах.

Районы высоких гор. В районах высоких гор аэрофотосъемку и плановую привязку снимков выполняют, как и в районах средних гор (2-й вариант). Плановые опознаки определяют геодезическими или фототеодолитными способами.

Опорную сеть сгущают аналитическим способом пространственной фототриангуляции или на универсальных стереоприборах. Оригинал карты составляют на универсальных стереоприборах.

Топографические карты масштаба 1 : 10 000 создают обычно на плоскоравнинные, равнинно-пересеченные и всхолмленные районы. Для картографирования в этом масштабе открытых районов с сечением рельефа 2,5 м аэрофотосъемку выполняют аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 или 55 мм в масштабе 1 : 14 000 с перекрытиями снимков 60 ×30%. Залесенные районы, доступные для стереотопографической съемки, фотографируют аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 100 мм в том же масштабе с перекрытиями снимков 60 ×30%.

Плановые опознаки размещают рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов на расстоянии, не превышающем восьми базисов фотографирования, чтобы на каждом маршруте было по одному опознаку каждого ряда.

Высотные опознаки располагают по углам секций маршрута, состоящих не более чем из четырех стереопар.

Сгущение опорной сети производят аналитическим способом пространственной фототриангуляции или на стереографе и стереопроекторе.

При съемке в масштабе 1 : 10 000 с сечением рельефа 1 м в равнинной открытой местности аэрофотосъемку выполняют аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 или 55 мм в масштабе 1 : 12 000 с перекрытиями снимков 60 ×30%.

Высотная привязка снимков заключается в определении для каждой стереопары девяти высотных опознаков. Эти опознаки используют для ориентирования стереопар при съемке рельефа на стереографах или стереопроекторах.

При создании карт крупных масштабов точки плановой съемочной сети определяют преимущественно аналитическим методом — прямыми, обратными и комбинированными (боковыми) засечками.

Предельная ошибка координат точки плановой съемочной сети не допускается более 3,5 м при съемке в масштабе 1 : 2 000 и 1,4 м при съемке в масштабе 1 : 10 000.

Для построения высотного съемочного обоснования применяют методы геодезического и геометрического нивелирования.

К а р т а м а с ш т а б а 1 : 100 000 создается главным образом на районы, имеющие разреженное геодезическое обоснование. Поэтому в данном случае для сокращения полевых работ по привязке снимков широко применяют показания радиогеодезических станций, радиовысотомера и статоскопа. Местность фотографируют одновременно двумя аэрофотоаппаратами: с фокусным расстоянием 70 мм в масштабе, близком к 1 : 100 000 (формат снимков 18 ×18 см), и с фокусным расстоянием 200 мм в масштабе около 1 : 35 000 (формат снимков 30 ×30 см). Таким образом, получают мелкомасштабные снимки для фотограмметрического сгущения опорной сети и составления карты и крупномасштабные снимки для камерального дешифрирования. Продольное перекрытие снимком не менее 60%, поперечное перекрытие мелкомасштабных снимков не менее 30%. В процессе аэрофотосъемки фиксируются показания статоскопа и радиовысотомера. Отдельные участки местности, для дешифрирования которых необходимы снимки более крупного масштаба, фотографируются дополнительно с меньших высот. Кроме основных маршрутов аэрофотосъемки прокладывают каркасные с фиксацией показаний статоскопа, радиовысотомера и радиогеодезических станций. Каркасные маршруты прокладывают перпендикулярно основным через 40—60 км и параллельно основным через 60—80 км. Эти маршруты образуют радиогеодезические полигоны. Для определения координат радиогеодезических станций строится радиогеодезическая сеть, в которую включаются кроме этих станций геодезические пункты.

Полевые работы включают:

— определение координат опорных точек или привязку площадок для определения координат точек фотографирования исходных снимков и вычисление коэффициента перехода от числа циклов к приращениям расстояний,

— определение высот четырех точек для стереопар каждого каркасного маршрута, удаленных друг от друга на 40—50 км,

— прокладку маршрутов дешифрирования с созданием эталонов для камерального дешифрирования снимков,

— определение координат астрономических пунктов, если нет геодезической сети.

Камеральные работы начинаются с обработки каркасных маршрутов и дешифрирования снимков по эталонам. По радиогеодезическим данным вычисляют плановые координаты точек фотографирования. В результате пространственной фототриангуляции по каркасным маршрутам определяют опорные точки для основных маршрутов. Затем развивают фотограмметрические сети по основным маршрутам. Фотограмметрические сети создаются аналитическим способом или на универсальных стереоприборах. Для составления оригинала карты применяют мультиплекс в горных районах и топографический стереометр в равнинных.

Глава 25

ОБНОВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ

§ 166. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОБНОВЛЕНИЮ КАРТ

С течением времени на местности происходят изменения: возникают новые населенные пункты, растут старые, появляются новые дороги и лесонасаждения, изменяются рельеф и гидрография.

Особенно значительные изменения на местности бывают в связи со строительством крупных гидротехнических сооружений. Например, в результате строительства канала имени Москвы создано семь крупных водохранилищ и восемь гидростанций. За годы существования канала совершенно изменился вид районов, прилегающих к его трассе: на месте лесов и болот возникли новые населенные пункты и промышленные предприятия. Природа, преобразованная водными просторами канала, и красивые архитектурные сооружения превратили эту часть Подмосковья в излюбленное место отдыха и массовых экскурсий.

Вследствие изменений на местности пользоваться такой картой затруднительно, а иногда и невозможно. Опыт Великой Отечественной войны показал, что карты с давностью съемки в 10 лет и более вызывали существенные трудности в оценке местности при принятии решений, а также в процессе ориентирования на местности и в управлении боем, так как они не отражали значительных изменений, происшедших на земной поверхности после съемки. Большие изменения происходят на местности в военное время.

Таким образом, топографические карты необходимо систематически обновлять.

Процесс изменений местности не является одинаковым для различных районов. Местность изменяется быстрее, если она больше осваивается человеком. Наоборот, в слабо освоенных и мало обжитых районах на местности в течение десятилетий не возникает существенных изменений. Опыт показал, что карты наиболее важных для развития производственных сил и обороны страны обжитых районов следует обновлять через 6—8 лет, а карты других районов — через 10—15 лет и более.

Независимо от этого, карты обновляют при наличии на местности следующих происшедших с момента съемки существенных изменений:

— изменений сети магистральных и кольцевых железных и шоссейных дорог,

— крупных изменений населенных пунктов, а также появления новых крупных промышленных и сельскохозяйственных предприятий, расположенных вне населенных пунктов,

— изменений в гидрографии, вызванных строительством крупных гидротехнических, ирригационных и мелиоративных сооружений,

— крупных изменений в растительном покрове, затрудняющих ориентирование на местности по карте.

Однако не только изменения на местности вызывают необходимость обновления карт. Переход к новой системе геодезических координат, изменение начала отсчета высот местности, переименование населенных пунктов, изменение методики транскрипции географических названий, введение новых условных знаков — все это также является причиной обновления карт.

Топографические карты обновляются с целью приведения их содержания в соответствие с современным состоянием местности и переиздания карт в принятой системе координат и высот и в действующих условных знаках.

Содержание, точность и оформление обновленной карты должны удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к карте данного масштаба наставлениями и руководствами по топографическим работам.

§ 167. МЕТОДЫ ОБНОВЛЕНИЯ КАРТ

Информация об изменениях на местности, происшедших после создания обновляемой карты, получается путем аэрофотосъемки местности, по новым картографическим материалам или непосредственно на местности в процессе ее рекогносцировки.

В зависимости от вида используемой информации об изменениях на местности различают три метода обновления карт:

— по снимкам с последующим полевым обследованием или без него;

— по современным топографическим картам, как правило, более крупного масштаба по сравнению с масштабом обновляемой карты;

— приемами инструментальной мензульной съемки на местности.

Основным является метод обновления карт по снимкам. Он применяется для обновления карт различных масштабов — от 1 : 10 000 до 1 : 100 000, необходимых для нужд народного хозяйства и обороны страны.

Карты, масштаб которых меньше 1 : 100 000, обновляются или пересоставляются по картам более крупных масштабов, этот метод обновления рассматривается в картографии.

Обновление карт приемами мензульной съемки выполняют в редких случаях, на участках, не покрытых аэрофотосъемкой.

Обновление карт по снимкам включает следующие основные процессы:

— аэрофотосъемку,

— подготовительные работы,

— камеральные работы,

— полевое обследование обновленной карты.

Плановым обоснованием при обновлении карт служат: пункты государственной триангуляции, полигонометрии, точки съемочной сети и полевой подготовки снимков, как использованные при создании обновляемой карты, так и полученные после ее создания. Кроме того, при обновлении карт масштабов 1 : 50 000 и 1 : 100 000 в качестве планового обоснования используются надежно опознаваемые на новых снимках четкие контуры, выбранные на обновляемой карте.

Высотным обоснованием служат реперы и марки нивелирования, пункты триангуляции и полигонометрии, точки съемочной сети и полевой подготовки снимков, а также отметки высот на обновляемой карте, опознанные на новых снимках.

Плановое и высотное обоснование используется как опора для переноса со снимков на карту изменений местности и для геодезического ориентирования фотограмметрических сетей.

Фотограмметрические сети строятся для решения следующих задач:

— определение дополнительных опорных точек, необходимых для исправления карты по снимкам или для составления отдельных ее частей заново, а также для составления фотопланов;

— проверка точности карт, подлежащих обновлению.

Фотограмметрические сети строятся, как правило, аналитическим способом или на универсальных стереоприборах.

Аэрофотосъемку производят не ранее чем за один год до начала камеральных работ по обновлению карты.

С целью сокращения полевых работ в отдельных случаях выполняют одновременное двухмасштабное фотографирование местности основным и вспомогательным аэрофотоаппаратами. При этом основной аэрофотоаппарат снабжается гиростабилизирующей установкой и радиовысотомером.

Снимки, полученные основным аэрофотоаппаратом, используются для построения фотограмметрических сетей и исправления карты, а снимки, полученные вспомогательным аэрофотоаппаратом, для более уверенного дешифрирования контуров и предметов местности.

В зависимости от физико-географических условий местности, масштаба обновляемой карты и принятой технологии камерального исправления ее содержания для производства аэрофотосъемки применяются различные варианты (табл. 12).

Таблица 12

Масштаб обновляемой карты	Основная аэрофотосъемка		Вспомогательная аэрофотосъемка	
	Масштаб снимков	Фокусное расстояние АФА	Масштаб снимков	Фокусное расстояние АФА
1 : 10 000	1 : 14 000—1 : 18 000	200	—	—
	1 : 14 000—18 000	100	1 : 7000—1 : 9000	200
1 : 25 000	1 : 20 000—1 : 25 000	200	—	—
	1 : 40 000	100	1 : 20 000	200
1 : 50 000	1 : 25 000	200	—	—
	1 : 35 000	100—140	—	—
	1 : 50 000	100	1 : 25 000 (формат снимка 30×30 см	200

В остальном требования к аэрофотосъемке не отличаются от тех, которые предъявляются при составлении топографических карт. Обновление карт на труднодоступные районы, а также карт масштаба 1 : 100 000 выполняется в соответствии с особыми указаниями.

Для получения оригинала обновленной карты используются различные основы:

— фотопланы, составленные по новым снимкам;

— абрисные копии, изготовленные с издательских оригиналов обновляемой карты на прозрачном пластике;

— абрисные копии, изготовленные с издательских оригиналов обновляемых карт на чертежной бумаге или фотобумаге, наклеенной на жесткую основу;

— издательские оригиналы обновляемой карты.

Выбор основы зависит от количества изменений, происшедших на местности со времени создания карты, характера контуров и рельефа и точности их изображения на карте.

Фотопланы используются при обновлении карт равнинных районов с большим количеством контуров, когда изменения на местности превышают 40%.

Абрисные копии на прозрачных пластиках применяются при обновлении карт на равнинные и всхолмленные районы, где рельеф позволяет трансформировать снимки на 1—2 плоскости, а изменения на местности составляют не более 40%. В этом случае кроме абрисных копий можно использовать и фотопланы.

Абрисные копии на бумаге изготовляются коричневыми, черными, голубыми и двухцветными. Коричневые и черные копии применяются для обновления карт любых районов, когда изменения в контурах небольшие — до 30% и нет необходимости исправлять рельеф на обновляемой карте. Голубые копии используются для обновления карт любых районов при большом количестве изменений в контурах и рельефе. На двухцветных копиях контуры изображаются голубым цветом, а рельеф — коричневым. Они рекомендуются при больших изменениях в контурах и незначительных изменениях в рельефе.

Издательские оригиналы применяются при исправлении карт малоконтурной местности, когда количество изменений на местности небольшое.

Технологию и организацию работ по обновлению карт устанавливают после изучения и анализа планово-высотной основы обновляемой карты, характера местности и происшедших на ней изменений со времени создания карты, а также аэросъемочных и других материалов, которые должны быть использованы при обновлении карт.

§ 168. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Подготовительные работы содержат:

— сбор и систематизацию материалов, необходимых для обновления карт, и определение степени и порядка их использования;

— проверку точности обновляемой карты и определение количества и характера изменений, происшедших на местности;

— разработку технического проекта обновления карт;

— изготовление основ для обновления карт.

Собирают и систематизируют следующие материалы:

— издательские или составительские оригиналы обновляемой карты и формуляры;

— каталоги координат геодезических пунктов, пунктов нивелирования и точек съемочной сети;

— материалы аэрофотосъемки, выполненной для обновления карт;

— тиражные оттиски обновляемой карты и карт более крупных масштабов;

— снимки с точками полевой подготовки, полученными для создания обновляемой карты или карт других масштабов, а также эталоны дешифрирования;

— кальки высот, если обновляемая карта создана по материалам мензульной съемки или комбинированным методом аэрофототопографической съемки;

— дежурные карты с данными об изменениях на местности;

— технические отчеты и проекты ранее выполненных в данном районе топогеодезических работ;

— специальные карты и планы — морские карты, планы городов и др.;

— литературно-справочные материалы — справочники административно-территориального деления СССР, топографические и географические описания и др.

Основными материалами из названных выше служат материалы аэрофотосъемки, полученные для обновления карт, и новые топографические карты, созданные после издания обновляемой карты. Все остальные материалы — вспомогательные.

Наличие основных и вспомогательных материалов показывается на схемах. Кроме того, на схемах приводится характеристика материалов и отмечается порядок их использования.

Точность обновляемой карты определяется в результате изучения и анализа собранных материалов или путем построения фотограмметрических сетей по новым снимкам.

Пригодными для обновления без дополнительной проверки точности карты по снимкам, как правило, являются следующие:

— карты, созданные в соответствии с действующими наставлениями и руководствами по производству топографических работ;

— карты, созданные комбинированным методом аэротопографической съемки;

— карты, созданные стереотопографическим методом аэротопографической съемки;

— карты, составленные по материалам крупномасштабных топографических съемок.

В необходимых случаях точность карт проверяется дополнительно путем построения фотограмметрических сетей, путем проектирования отдельных снимков на карту с помощью проектора и на стереофотограмметрических приборах.

В качестве точек фотограмметрических сетей выбирают геодезические пункты, точки съемочной сети и полевой подготовки снимков, а также контурные точки и характерные точки рельефа, камерально опознанные на снимках и карте. Эти же точки используют для геодезического ориентирования фотограмметрических сетей.

Карта считается пригодной для обновления, если средние уклонения точек карты от соответствующих точек фотограмметрической сети не больше 0,6 мм в плане (для горных, высокогорных и пустынных районов — 1,0 мм), а по высоте для точек, высоты которых подписаны на карте, — величин (в м), указанных в табл. 13.

Изображение рельефа на обновляемой карте проверяется путем сопоставления его форм, отображенных на карте, с формами, наблюдаемыми при стереоскопическом рассматривании новых снимков.

Если ошибки положения точек карты в плане и по высоте больше допустимых, то соответствующие участки карты должны быть сняты вновь в процессе обновления карты.

Технический проект составляется на карте (схеме). К проекту прилагается пояснительная записка.

На карте показываются: разграфка листов обновляемой карты, границы района работ, намеченные методы обновления карт и другие данные.

Таблица 13

Районы	Масштаб обновляемой карты		
	1 : 10 000	1 : 25 000	1 : 50 000
Равнинные, пересеченные и всхолмленные с преобладающими углами наклона до 6°	1,2	2,4	4,5
Горные, предгорные и песчаные пустыни	3,8	3,8	6,5
Высокогорные	—	7,5	13,0

В пояснительной записке излагаются:

— краткая характеристика физико-географических условий района работ и их влияние на выбор метода обновления карт;

— характеристика обновляемой карты;

— наличие и порядок использования планово-высотной основы;

— методы и технология обновления карты с указанием допусков для отдельных процессов;

— характеристика основных и вспомогательных материалов и порядок их использования при обновлении карты;

— перечень материалов, подлежащих сдаче после выполнения камеральных и полевых работ;

— организация контроля и приемки работ.

Абрисные копии изготовляются с издательских оригиналов карт или их дубликатов. Дубликатные оттиски, полученные на бумаге, предварительно наклеиваются на жесткую основу. При этом если оттиск имеет значительную деформацию, то для изготовления копии он монтируется на жесткую основу по геодезическим пунктам и координатной сетке.

В качестве жесткой основы абрисных копий служат алюминиевые листы, обклеенные с обеих сторон плотной бумагой. Кроме того, на лицевую сторону листа наклеивают чертежную бумагу для изготовления коричневых, и голубых и двухцветных копий или матовую фотобумагу для изготовления черных фотокопий.

Прозрачной основой абрисных копий служат малодеформирующиеся пластики.

Фотопланы составляют обычно в масштабе обновляемой карты. При обновлении карт масштаба 1 : 100 000 фотопланы могут создаваться в более крупном масштабе — 1 : 75 000 или 1 : 50 000.

Плановой основой для составления фотопланов служат все точки геодезического обоснования съемки и контурные точки обновляемой карты, уверенно опознанные на новых снимках. Если этих точек недостаточно для трансформирования снимков, то строят фотограмметрические сети.

При достаточном количестве опознанных контурных точек монтаж трансформированных снимков можно производить по этим точкам на копии карты или старого фотоплана, изготовленных на жесткой основе.

На фотоплан переносят рельеф с обновляемой карты с помощью проектора, пантографа или фотомеханическим способом в процессе изготовления репродукций с фотоплана.

§ 169. КАМЕРАЛЬНОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ СНИМКОВ И ИСПРАВЛЕНИЕ КАРТЫ

К выполнению этих процессов исполнители приступают после изучения технического проекта обновления карты или редакционно-технических указаний.

Для камерального дешифрирования используют основные снимки, предназначенные для исправления карты. Если карта обновляется на фотопланах, то и дешифрирование производится непосредственно на фотопланах.

Кроме основных снимков или фотопланов при дешифрировании используются цветные тиражные оттиски обновляемой карты, вспомогательные крупномасштабные снимки и другие материалы, собранные для обновления карты.

Чтобы уверенно распознать объекты местности, подлежащие отражению на карте, снимки рассматриваются стереоскопически с помощью стереоскопа, интерпретоскопа и других стереоприборов. Если для исправления карты применяются универсальные стереоприборы, то и дешифрирование снимков выполняется с помощью этих приборов.

При дешифрировании проверяют полноту и правильность изображения на карте контуров, местных предметов и их взаимное положение, а также характеристики объектов. Одновременно проверяют изображение на карте форм рельефа, наблюдаемых по снимкам стереоскопически. Участки карты, подлежащие исправлению, отмечаются.

Когда карта обновляется на фотопланах, а также в случае составления отдельных участков карты, дешифрируют все объекты, изобразившиеся на снимках и подлежащие нанесению на карту. В остальных случаях дешифрируют только изменившиеся и появившиеся объекты местности, которые должны быть показаны на обновляемой карте.

Как правило, по снимкам дешифрируют следующие основные объекты:

— все новые населенные пункты, промышленные и сельскохозяйственные предприятия, расположенные вне населенных пунктов, а также изменения в планировке и застройке населенных пунктов;

— вновь построенные и строящиеся железные, шоссейные, улучшенные и проселочные грунтовые автомобильные дороги, насыпи и выемки на дорогах и другие изменения дорожной сети;

— вновь построенные и строящиеся плотины, каналы и другие гидротехнические сооружения, а также связанные с ними изменения на местности — появление водохранилищ, мостов и т. д.;

— изменения в начертании контуров растительности;

— изменения в рельефе местности — новые очертания обрывов, осыпей, карьеров, оврагов и промоин.

При обновлении карт без полевого обследования названия новых населенных пунктов, классификация и характеристика дорожной сети и других объектов определяются по вспомогательным материалам. Количественная характеристика дорог, просек и некоторых других элементов местности может быть получена по снимкам.

Результаты дешифрирования вычерчиваются на фотоплане или на снимках в соответствии с принятыми условными знаками.

Способ исправления карты выбирают в зависимости от основы, на которой должны быть отображены изменения, возникшие на местности, а также от количества и характера этих изменений и качества обновляемой карты.

В качестве планового и высотного обоснования для исправления карты служат опорные точки, использованные при составлении обновляемой карты,

контурные точки карты, опознанные на снимках, и точки фотограмметрических сетей, построенных по новым снимкам.

Если для обновления карты используется прозрачная абрисная копия, то изменения со снимков на эту копию переносят путем копирования. Для этого снимки трансформируют в масштабе обновляемой карты по опорным точкам или по контурам карты. Трансформированные снимки получают на полутоновой фотопленке или фотобумаге. Абрисную копию размещают на монтажном столе. Правый снимок стереопары кладут под копию и совмещают его точки с соответствующими точками копии. Левый снимок накладывают на копию. Стереоскопически рассматривая снимки и копию, выявляют изменения контуров и рельефа. Исчезнувшие объекты удаляют с копии, а появившиеся вычерчивают. Исправляют и изображение рельефа. Участки с грубыми ошибками в изображении рельефа отмечают и исправляют с помощью стереофотограмметрических приборов.

При обновлении карт на издательских оригиналах или абрисных копиях с них, изготовленных на бумаге или фотобумаге, изменения со снимков переносят с помощью универсальных стереоприборов, оптических проекторов и рычажных пантографов.

Универсальные стереоприборы применяют, как правило, при обновлении карт горных, предгорных и высокогорных районов, когда изменения в контурах значительны, а также в случаях, когда необходимо исправить или пересоставить отдельные участки карты.

Оптические проекторы применяют при обновлении карт равнинных и всхолмленных районов при значительных изменениях в контурах.

Рычажные пантографы используют при обновлении карт равнинных и всхолмленных районов, когда масштаб снимков крупнее масштаба карты и углы наклона их не превышают 2°.

Если район равнинный, то отдельные объекты можно переносить со снимков на карту пропорциональным циркулем. В этом случае положение объекта на карте определяется засечками по расстояниям, измеренным от трех ближайших контурных точек, а если объект расположен на прямолинейном контуре, то по расстояниям от двух точек, находящихся на этом контуре.

При обновлении карты на фотоплане или голубой абрисной копии на них вычерчивают в условных знаках все элементы содержания карты, а при обновлении карты на коричневой (черной) копии или издательском оригинале вычерчивают только изменения.

Если предусмотрено полевое обследование обновляемой карты, то тушью вычерчивают только те элементы, правильность изображения которых на карте не вызывает сомнения. Остальные элементы оставляют вычерченными в карандаше для проверки их в поле.

В результате камерального дешифрирования и исправления карты на каждый лист обновляемой карты получают следующие материалы:

— исправленный и вычерченный оригинал карты,

— комплект снимков для полевого обследования карты,

— тиражный оттиск карты или восковка с отмеченными элементами, подлежащими проверке на местности.

В формуляре кроме сведений о методике и технологии создания карты приводят данные о выполненных работах по камеральному исправлению оригинала карты: результаты проверки точности карты; планово-высотная основа; характеристика основных и вспомогательных материалов, использованных при исправлении карты; способ и точность нанесения новых контуров и

объектов местности; результаты проверки и оценки качества камеральных работ и сводок по рамкам оригинала карты; заключение о пригодности оригинала карты для издания или необходимости полевого обследования.

В случае, когда полевого обследования исправленного камерального оригинала карты не требуется, он передается для издания.

§ 170. ПОЛЕВОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ИСПРАВЛЕННОЙ КАРТЫ

Полевое обследование камерально исправленных оригиналов обновляемой карты выполняется путем сличения их с местностью и включает:

— проверку исправленных оригиналов карты и нанесение на них объектов, появившихся после аэрофотосъемки, а также объектов, не изобразившихся на снимках;

— проверку имеющихся и сбор недостающих на карте географических названий, пояснительных подписей, количественных и качественных характеристик объектов местности;

— обследование пунктов геодезической сети.

В зависимости от количества и характера изменений, перенесенных на оригинал карты, и физико-географических особенностей местности производят полное полевое обследование или частичное — по отдельным маршрутам.

При полном полевом обследовании проверяют все элементы содержания карты. Маршрутное полевое обследование выполняют по дорогам, населенным пунктам, рекам и другим важным направлениям, где необходимо проверить наличие и правильность изображения на карте объектов местности и собрать недостающие характеристики их.

Если изменений в контурах много, то новые контуры сначала дешифрируются на снимках, а затем переносятся на оригинал карты способами, изложенными выше. Отдельные объекты местности, не изобразившиеся на снимках, наносятся на оригинал карты инструментально приемами мензульной съемки с точек съемочной сети или с переходных точек, специально определенных для этой цели.

Точность исправленного оригинала карты проверяют, как правило, на участках полного полевого обследования обновляемой карты. Проверку выполняют инструментально с точек планово-высотной основы карты.

На этих же точках проверяют или определяют склонение магнитной стрелки. Среднее значение склонения подписывают на оригинале карты.

Собранные в процессе полевого обследования названия населенных пунктов и других объектов местности подписывают на оригинале обновляемой карты.

При определении недостающих и проверке показанных на карте количественных и качественных характеристик объектов местности особое внимание обращают на объекты, характеризующие проходимость, защитные и маскировочные свойства местности (дороги, мосты, переправы, реки, болота, гидротехнические сооружения, овраги, древесная растительность, подземные сооружения и т. п).

На местности обследуют пункты государственной геодезической сети, отображенные на обновляемой карте и появившиеся после ее создания. При этом устанавливают сохранность наружного знака, верхнего центра, окопки и ориентирных пунктов и пригодность знака для наблюдений.

Пункты, на которых не сохранился наружный знак и верхний центр, потеряли значение ориентиров на местности. Они показываются на оригиналах обновляемой карты своим условным знаком.

Результаты обследования пунктов геодезической сети отражаются в формулярах.

На основании результатов полевого обследования оригиналов карты делают вывод о качестве ее обновления и пригодности оригиналов для подготовки к изданию. Этот вывод записывают в каждом формуляре.

Глава 26

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОГРАММЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

§ 171. ПРОНИКНОВЕНИЕ В КОСМОС. ПРИОРИТЕТ СССР

Полетом первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. наша Родина открыла человечеству дорогу в космос. Дальнейшее проникновение в космос происходит необычайно быстро и эффективно. В одном только Советском Союзе за первые 10 лет выведены на орбиты искусственных спутников Земли, Солнца и Луны 254 станции и корабля. 31 космонавт СССР и США совершили полет на 23 кораблях — спутниках Земли («Космонавтика» — малое энциклопедическое изд-во «Советская энциклопедия» 1967 г.). Освоение космоса продолжается и в наши дни.

Советский Союз является одним из ведущих государств по освоению космического пространства. Нашей страной впервые осуществлены: полеты искусственных спутников вокруг Земли, Солнца и Луны, автоматических станций к Луне, Венере и Марсу и пилотируемых одноместных и многоместных кораблей; стыковки и расстыковки космических кораблей на орбите полета; выход космонавта из корабля в открытый космос. Советские станции первыми достигли поверхности Луны, Венеры и Марса, осуществили мягкую посадку на их поверхность, передали по телевизионному тракту изображения обратной стороны Луны и панорамы поверхности Луны на видимой с Земли части.

Приоритет Советского Союза закреплен в разработке и осуществлении полетов возвращаемых на Землю автоматических межпланетных станций (АМС). Автоматические станции серии «Зонд» впервые доставили на Землю оригинальные фотоизображения значительной части лунной поверхности.

Долговременным орбитальным станциям (ДОС), запущенным на околоземную орбиту, придается особое значение для изучения Земли в самых различных целях: геоморфологических, геологических, ее природных ресурсов, климата и т. д.

Наконец, нашей стране принадлежит первенство в изготовлении и использовании автономных автоматических систем для комплексных исследований космических объектов, работающих непосредственно на их поверхности. Долговременно действующая система «Луноход» передала на Землю богатую информацию в виде фотопанорам, данных астрофизических наблюдений и других сведений.

Следует отметить также и достижения других государств в исследовании космического пространства и в первую очередь США.

Созданы предпосылки международного сотрудничества для изучения космических объектов.

Бурный рост исследований космического пространства открыл новые перспективы развития многих направлений науки и техники, в том числе и фотограмметрии.

Подавляющее большинство космических экспериментов предусматривает получение фотографических, фототелевизионных и других изображений интересующих объектов. Эти изображения используются в дальнейшем для изучения заснятого объекта в различных целях.

Среди них особый интерес представляют изображения, по которым методами фотограмметрии можно получить геометрическое описание объекта.

Результаты фотограмметрической обработки таких изображений могут в дальнейшем использоваться непосредственно или служить основой для изготовления материалов, требующих дополнительных преобразований фотограмметрических данных.

К числу материалов, имеющих самостоятельное значение, относятся фотосхемы, фотопланы, карты и фотокарты поверхности планет и их спутников, цифровые модели или отдельные цифровые характеристики заснятых объектов.

На основании фотограмметрических данных дополнительными их преобразованиями возможно решение многих научных и технических задач: определения фигуры изобразившегося объекта, изучения динамики ее изменения, составления карт и т. д.

Условия получения изображений из космоса, как правило, резко отличаются от плановой топографической аэрофотосъемки.

Особые условия космических съемок вызывают изменения методики фотограмметрической обработки изображений и предъявляют специфичные требования к обрабатывающей аппаратуре.

В дальнейшем остановимся на изучении возможностей изготовления картоматериалов по изображениям планет и их спутников, полученным из космоса. Будем предполагать, что изображения получены в условиях центрального проектирования или приведены к ним.

Рассмотрим вначале наиболее распространенные условия получения изображений из космоса и особенности этих изображений.

§ 172. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ СНИМКОВ ИЗ КОСМОСА И ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Изображения космических тел получают с борта подвижного относительного объекта-носителя съемочной камеры, или из точек, расположенных на поверхности объекта. Они бывают фотографическими (в избранной зоне видимой или невидимой части спектра), фототелевизионными и фоторадиолокационными способами.

По характеру построения изображения разделяются на обычные, т. е. построенные в результате центрального проектирования сразу на весь кадр, дискретно и построчно расчлененные и построенные методом щелевого проектирования.

При съемке планет из космоса носитель камеры перемещается относительно объекта по круговой или эллиптической орбите. Оптическую ось камеры стараются направить вдоль местной вертикали.

Распространены также варианты съемки с постоянной ориентацией оптической оси в пространстве. Так, например, производилось фотографирование Луны с эллиптической орбиты автоматическими межпланетными станциями серии «Зонд» (рис. 289).

Высоты, с которых производится съемка планет, в настоящее время колеблются от сотни до десятка тысяч километров.

Сравнивая условия получения изображений из космоса и условия плановой аэрофотосъемки, можно отметить особенности, несколько изменяющие ранее изученные геометрические свойства снимков.

Эти особенности обусловлены:

1. Нефотографическим характером изображений. Например, радиолокационные и инфракрасные снимки не являются, вообще

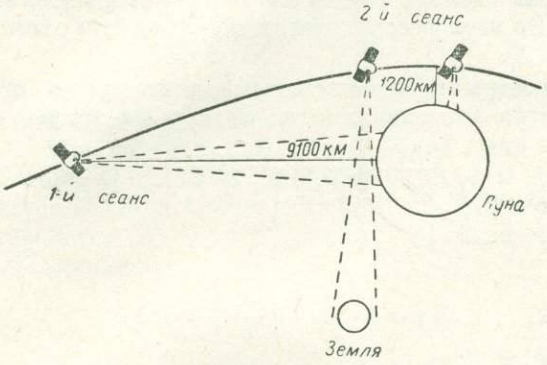


Рис. 289

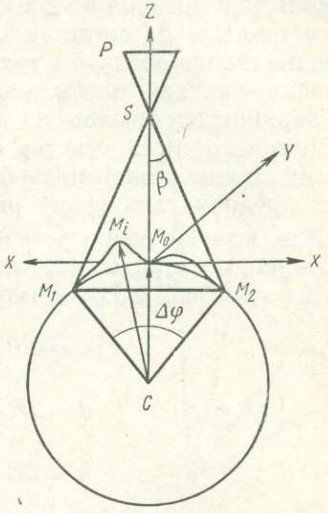


Рис. 290

говоря, отражением видимой поверхности объекта, а лишь тех его деталей которые наиболее отвечают физическим законам получения снимка. Это следует учитывать при дальнейшем использовании изображений.

2. Отличием проекции, в которой получены изображения, от заданной. Имеются в виду геометрические ошибки снимков. Величины ошибок для некоторых изображений в десятки раз больше, чем на фотографиях, произведенных топографическими аэрофотоаппаратами. Так, нелинейность электронного сканирования при получении фототелевизионных изображений достигает нескольких процентов. Поэтому вопросам учета геометрических ошибок в космических съемках оказывают особое внимание.

3. Эллиптичностью орбиты носителя съемочной камеры. Из-за эллиптичности происходит значительное изменение высоты съемки для снимков одного и того же маршрута.

4. Непостоянством ориентирования в пространстве оси съемочной камеры. В результате углы наклона отдельных снимков колеблются от нуля до десятка градусов.

5. Сравнительно мелким масштабом съемки. Каждым снимком покрывается значительная площадь поверхности объекта. При анализе и последующей фотограмметрической обработке таких снимков следует учитывать влияние кривизны заснятой поверхности, которое может быть значительным.

На рис. 290 показана схема съемки некоторой сферической поверхности из точки S с большой высоты. Оптическая ось съемочной камеры совпадает

с местной вертикалью. На рисунке видно, как сильно проявляется кривизна на заснятом участке.

Резкое колебание высот съемки и углов наклона снимков, существенное влияние кривизны заснятой поверхности совершенно исключают прямое использование широко распространенных приборов и методов для выполнения фотограмметрических преобразований по снимкам из космоса.

Влияние кривизны Земли при развитии пространственных сетей было рассмотрено ранее в гл. 22. Полученные основные выводы и формулы остаются в силе и для снимков из космоса. А именно, из-за кривизны Земли расстояния между точками на снимках не будут находиться с отрезками на поверхности криволинейного объекта в тех же соотношениях, как на плоскости. Кроме того, кривизна исказит изображение рельефа заснятой поверхности, полученное при обработке снимков на фотограмметрических приборах.

Дополнительно выведем формулы размера зон, в пределах которых влиянием *кривизны можно пренебречь. Во всех рассуждениях под объектом съемки* будем предполагать сферу радиуса R.

Для вывода воспользуемся известными соотношениями длин дуг $\breve{d}$, стягивающих их хорд d, стрел сегментов h в зависимости от R и центрального угла $\Delta\varphi$ (см. рис. 290), а именно:

$$\left.\begin{aligned} \breve{d} &= 0{,}01745R\,\Delta\varphi = \sqrt{a^2+\frac{16}{3}h^2} \\ d &= 2R\sin\frac{\Delta\varphi}{2} \\ h &= 2R\sin^2\frac{\Delta\varphi}{4} \end{aligned}\right\}. \tag{26.1}$$

Размеры участка $\Delta\varphi$ поверхности сферы, когда дуги с некоторой погрешностью δd можно заменить хордами, определяются из равенства

$$\delta d = \breve{d} - d = 0{,}01745R\,\Delta\varphi_d - 2R\sin\frac{\Delta\varphi_d}{2}, \tag{26.2}$$

или из приближенной формулы

$$\Delta\varphi_d^0 \leqslant \rho^0\sqrt{\frac{24\delta d}{R}}, \tag{26.3}$$

которая получается после преобразования первого выражения из (26.1)

$$\frac{16}{3}h^2 = (\breve{d})^2 - (d)^2 = \delta d\,(\breve{d} - d) \approx 2\delta\,dd.$$

Выбор зон под условием замены дуг хордами должен удовлетворять точности фотограмметрических преобразований при создании плановой основы картографических материалов.

Существенное влияние при проектировании изображений выпуклого объекта на плоскость оказывает размер зоны. Кривизна сферы приводит к искажениям положения точек, похожим на влияние рельефа. В зависимости от расположения зоны относительно местной вертикали эти искажения меняются и могут быть значительно больше ошибок, вызванных заменой криволинейных отрезков хордами. Из рис. 291 видно, как из-за стрелы прогиба $MM_1 = h$ образовалось смещение $M_1M_2 = \Delta$, равное

$$\Delta = h\,\mathrm{tg}\,(\gamma+\varphi) = 2R\sin^2\frac{\Delta\varphi}{4}\,\mathrm{tg}\,(\gamma+\varphi). \tag{26.4}$$

Наконец, если потребовать, чтобы стрела h прогиба сегмента не вызывала ошибок высот, больших δh, следует согласно (26.1) сократить размер зоны до

$$\Delta\varphi_h^0 \leqslant \rho^0 \sqrt{\frac{8\delta h}{R}}. \tag{26.5}$$

Рассмотрим далее, какая часть поверхности планеты изображается на одном снимке, полученном в различных условиях. Квадратному снимку будет соответствовать выпуклый криволинейный четырехугольник на поверхности объекта. Наибольшую длину в четырехугольнике составляют диагонали, рассчитаем их.

Из треугольника SM_2C (см. рис. 290), считая $SM_0 = H$ и $\frac{1}{2}\Delta\varphi = \varphi$, следует равенство

$$\frac{\sin(\varphi+\beta)}{\sin\beta} = \frac{H+R}{R}, \tag{26.6}$$

из которого можно найти угол φ, если заранее вычислить угол β.

Можно записать выражение для φ в прямой связи от параметров H, f и радиуса-вектора l точек на снимке. Для этого равенство (26.6) преобразуют в трансцедентное уравнение

$$\cos\varphi = \frac{H+R}{R} - \sin\varphi\operatorname{ctg}\beta.$$

Затем, подставляя $\cos\varphi = \sqrt{1-\sin^2\varphi}$ и возводя уравнение в квадрат, получим

$$(1+\operatorname{ctg}^2\beta)\sin^2\varphi - 2\frac{H+R}{R}\operatorname{ctg}\beta\sin\varphi + \left(\frac{H+R}{R}\right)^2 - 1 = 0.$$

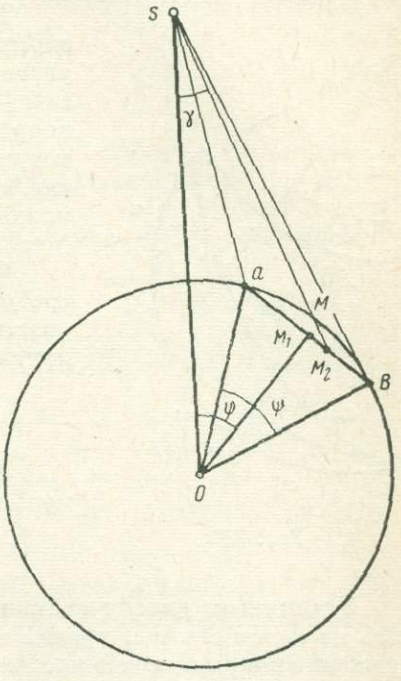


Рис. 291

Откуда после преобразований имеем *:

$$\sin\varphi = \frac{(H+R)\operatorname{ctg}\beta - \sqrt{R^2\operatorname{ctg}^2\beta - H^2 - 2HR}}{R(1+\operatorname{ctg}^2\beta)} \tag{26.7}$$

или, заменяя $\operatorname{ctg}\beta = f : l$,

$$\sin\varphi = \frac{(H+R)\,lf - l\sqrt{R^2f^2 - H^2l^2 - 2HRl^2}}{R(f^2+l^2)}. \tag{26.8}$$

Формулы (26.7) и (26.8) можно использовать не только для определения размеров проекции снимка на поверхность объекта, но и для решения многих других задач: определения расстояний между точками, нанесения точек на карту и т. д.

Положение точек на сфере однозначно устанавливается двумя угловыми координатами φ и ε.

---

* Положительное значение квадратного корня принадлежит центральному углу для точек пересечения проектирующих лучей сферы с другой от камеры стороны.

Координатой ε является азимут направления на текущую точку. Если положения точек определяют в системе координат, закрепленной на снимке координатными метками, то

$$\operatorname{tg}\varepsilon=\frac{y}{x};\quad l=\sqrt{x^2+y^2}, \tag{26.9}$$

где x и y — измеренные по снимку координаты.

Чтобы нанести точки на карту, необходимо знать координаты центра проектирования и поворот снимка во внешней системе координат.

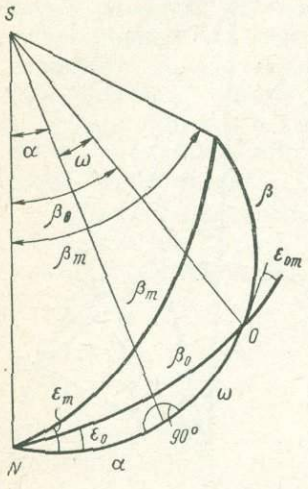


Рис. 292

Те же задачи можно решить и по наклонному снимку, если дополнительно известны его элементы углового ориентирования. Возможны два пути. Первый — через предварительное трансформирование координат точек снимка, а второй — нахождением координат β_m и ε_m точек на сфере в системе координат, связанной с одной из вертикалей. Последние можно определить, решив сферические треугольники (рис. 292).

Часто при работе с космическими снимками требуется знать площадь сфотографированного участка поверхности сферы. Если бы снимок был круглым, его площадь

$$P_0=\pi\left(h^2+\frac{d^2}{2}\right). \tag{26.10}$$

Для квадратного снимка площадь вычисляют по приближенным формулам

$$P_K=\frac{1}{2}\pi\left(h^2+\frac{d^2}{2}\right)\approx d^2. \tag{26.11}$$

Увеличивая высоту съемки, можно добиться, чтобы вся планета получилась на одном снимке, причем наиболее эффективная съемка, при которой изображение покрывает всю площадь кадра. Этому условию должен удовлетворять критерий [см. формулу (26.6)]

$$\sin(\varphi+\beta)=\left(1+\frac{H}{R}\right)\sin\beta\leqslant 1. \tag{26.12}$$

Откуда найдем эффективную высоту съемки

$$H_э\leqslant R(\operatorname{cosec}\beta-1). \tag{26.13}$$

Подсчет числа кадров, необходимых для съемки заданного участка поверхности планеты, удобно производить по формулам, записанным через $\Delta\varphi_X$ и $\Delta\varphi_Y$ формата снимков.

Например, при круговых орбитах облета, лежащих в плоскости больших кругов планеты, число снимков в каждом витке будет равно

$$K=\frac{360}{\Delta\varphi_B}, \tag{26.14}$$

а число витков

$$M=\frac{360}{\Delta\varphi_{\Delta Y}}, \tag{26.15}$$

где $\Delta\varphi_B$ — базис съемки и $\Delta\varphi_{\Delta Y}$ — интервал между маршрутами в угловой мере на поверхности планеты.

По аналогии с аэрофотосъемкой при продольном перекрытии L_X, а поперечном L_Y имеем:

$$\left.\begin{aligned}\Delta\varphi_B &= \Delta\varphi_X\left(1-\frac{L_X}{100}\right)\\ \Delta\varphi_{\Delta Y} &= \Delta\varphi_Y\left(1+\frac{L_Y}{100}\right)\end{aligned}\right\}. \tag{26.16}$$

Тогда общее число снимков

$$N = KM. \tag{26.17}$$

Для других разновидностей орбит $\Delta\varphi_X$ и $\Delta\varphi_Y$ не остаются постоянными, *поэтому расчеты числа снимков должны быть индивидуальными.*

В табл. 14 приведены величины $H_э$, а также $\Delta\varphi_X = \Delta\varphi_Y$, P_K и N для некоторых вариантов съемок Земли $\overset{+}{\odot}$ и Луны ☽ из космоса с 60%-ным продольным и 40%-ным поперечным перекрытиями.

Таблица 14

R, км	$2\beta°$	$H_э$, км	Высота фотографирования, км: 200 $\Delta\varphi_{XY}$	200 P_K	200 N	500 $\Delta\varphi_{XY}$	500 P_K	500 N	1000 $\Delta\varphi_{XY}$	1000 P_K	1000 N
6378	60	R 6378	2° 15′	$6{,}5\cdot10^4$	$107\cdot10^3$	7° 00′	$74\cdot10^4$	$11\cdot10^3$	10° 40′	$1{,}4\cdot10^6$	4700
	90	$0{,}4R$ 2500	3 50	$14{,}4\cdot10^4$	$37\cdot10^3$	9 00	$1{,}1\cdot10^6$	$6{,}6\cdot10^3$	19 40	$5{,}1\cdot10^6$	1430
$\overset{+}{\odot}$	120	$0{,}15R$ 950	6 50	$57\cdot10^4$	$11{,}6\cdot10^3$	18 20	$4{,}1\cdot10^6$	$1{,}6\cdot10^3$	60 20	$41{,}8\cdot10^6$	150
	60	R 1738	8 00	$5{,}8\cdot10^4$	$8{,}4\cdot10^3$	20 40	$39{,}1\cdot10^4$	$1{,}3\cdot10^3$	41 40	$1{,}52\cdot10^6$	310
☽ 1738	90	$0{,}4R$ 700	14 20	$18{,}8\cdot10^4$	$2{,}7\cdot10^3$	35 40	$1{,}1\cdot10^6$	425	101 40	$7{,}29\cdot10^6$	55
	120	$0{,}15R$ 260	29 20	$79{,}6\cdot10^4$	650	78 00	$4{,}7\cdot10^6$	100	101 40	$7{,}29\cdot10^6$	55

Если $H \geqslant H_э$, то $\Delta\varphi_{XY} = 180° \cdot 2\arcsin\dfrac{R}{R+H}$, так как $\Delta S_2 M_2 C$ всегда будет прямоугольным (см. рис. 290).

§ 173. КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПЛАНЕТ И ИХ СПУТНИКОВ

Картографирование планет и их спутников немыслимо без использования фотограмметрии. Сохраняя основную структуру, фотограмметрические способы изготовления карт Земли претерпевают изменение при решении тех же задач *по космическим съемкам.*

Эти изменения вызваны:

— характерными чертами геометрических свойств снимков из космоса, особенно на первых этапах изучения объекта;

— отсутствием или недостаточным числом опорного обоснования;

— геометрической формой объектов съемки и характером окружающей планету среды.

Наибольшее влияние оказывают геометрические свойства изображений и в первую очередь кривизна заснятой поверхности.

Известно, что при создании картоматериалов фотограмметрическими методами широко используются различные приборы. В большинстве своем эти приборы (кроме аналитических) приспособлены для измерения построенной на них модели объекта и получения результатов измерений в прямоугольной системе координат. Приборы трансформирования фотоизображений или планов не могут преобразовать их в заданную картографическую проекцию.

На больших участках поверхности направления счета высот нормали к поверхности относимости не остаются параллельными, что приводит к погрешностям при измерении их в прямоугольной системе координат (см. рис. 290, точки M_i, M_0).

Другое затруднение возникает из-за необходимости окончательного представления криволинейной поверхности объекта в заданной картографической проекции.

Изменения методики изготовления картоматериалов, вызванные отсутствием надежного обоснования, формой объекта и характером окружающей среды, менее принципиальны. Они сводятся главным образом к известным для аэрофотосъемки приемам компенсации влияния указанных факторов использованием элементов внешнего ориентирования снимков, полученным по показаниям специальных приборов, применением строгих методов учета геометрических ошибок снимков и т. д.

Поэтому сосредоточим внимание на особенностях выполнения фотограмметрических преобразований из-за кривизны заснятой поверхности.

Очевидно, что по мере накопления топографо-геодезических данных и снижения высот съемок различия в методике составления карт на внеземные тела будут постепенно стираться.

Из общего комплекса фотограмметрических работ по изготовлению картоматериалов можно выделить два основных этапа. Первый — сгущение, или создание вновь, опорного обоснования, второй — получение оригинала той или иной разновидности, например карты.

Аналитические способы фототриангуляции позволяют решить на ЭВМ любые математические зависимости, описывающие процессы построения опорных сетей по измерениям на снимках. Следовательно, не вызовет затруднений реализация любого нового способа, учитывающего особенности космических съемок.

Из-за отсутствия специальных приборов для обработки снимков из космоса большие трудности вызывает выполнение второго этапа. Приборы должны иметь устройства для учета влияния кривизны объекта при создании высотной основы карты, обладать способностью отражать плановую часть в заданной картографической проекции, сохранять фотоизображение, иметь устройства для компенсации геометрических ошибок снимков и т. д. Этим требованиям в значительной мере отвечают аналитические приборы, которые пока не получили достаточного распространения.

Однако нельзя категорично утверждать, что существующий парк фотограмметрических приборов совершенно непригоден для изготовления картоматериалов по снимкам с больших высот.

Указанные затруднения могут быть преодолены, если разбить общую площадь сфотографированной поверхности на отдельные участки (зоны), в пределах которых влиянием кривизны можно пренебречь. При этом следует так организовать фотограмметрическую обработку снимков на приборе, чтобы общий результат получился последовательным суммированием данных обработки по каждой зоне.

Каждая зона должна быть обеспечена четырьмя опорными точками по углам, с известными координатами в системе, принятой для отображения результатов.

Размеры зон без учета последующих преобразований в заданную картографическую проекцию определяются формулами (26.3) и (26.5).

§ 174. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ ПО СНИМКАМ ИЗ КОСМОСА

Большое внимание уделяется изучению природных ресурсов в глобальном масштабе, что объясняется интенсивным ростом населения, которое к 2000 г. составит около 6 млрд. человек.

Изучение природных ресурсов проводится с целью более эффективного их освоения, а также защиты природы от вредных последствий человеческой деятельности.

Неоценимую помощь при изучении природных ресурсов Земли оказывают материалы, доставленные искусственными спутниками (ИС) и долговременными орбитальными станциями (ДОС), снабженными специальной аппаратурой. Среди них большой объем составляют материалы различного рода съемок: фотокамеры, радиолокационная аппаратура, устройства для выделения спектральных характеристик от объектов на поверхности Земли.

Устройства для выделения спектральных характеристик могут получать изображения в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра. На таких изображениях отчетливо видны детали заснятой поверхности, для которых характерна выделенная часть спектра, что облегчает процесс дешифрирования объектов.

Основными достоинствами информации о Земле, получаемой из космоса, являются ее глобальность, оперативность и разносторонность.

По материалам, полученным из космоса, решаются различные задачи, и в том числе составление специальных карт на всю территорию земного шара или значительную его часть. Таковыми могут быть карты растительного покрова, сельскохозяйственных угодий, теплового балланса акватории и территории Земли, метеорологические, геологические, геоморфологические и т. д.

В зависимости от требований к срокам изготовления картоматериалов их можно разделить на две группы — о п е р а т и в н ы е и р е г у л я р н ы е. К оперативным относятся материалы, требующие для своего изготовления время от нескольких часов до нескольких суток (например, метеокарты, карты стихийных бедствий и т. д.), к регулярным — все остальные.

Для изготовления регулярных картоматериалов без существенной ломки можно применить методику составления географических карт по аэрофотосъемкам, предпочтительно с автоматизацией отдельных процессов.

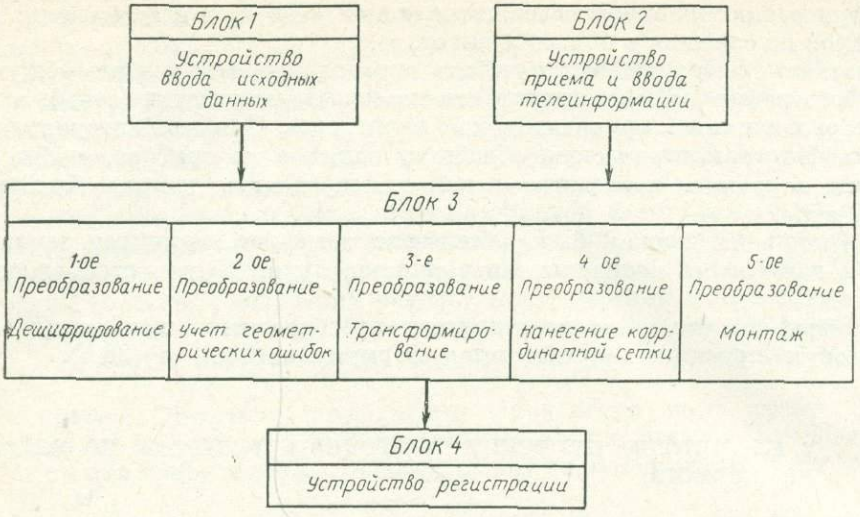


Рис. 293

На рис. 293 представлена упрощенная блок-схема автоматизированной системы для составления фотокарт с выделенными специальным дешифрированием контурами.

Исходными данными для составления такой карты служат:

— телевизионные сигналы, отражающие изображение, видимое в плоскости прикладных рамок съемочных карт (видеотелеинформация);

— элементы внешнего ориентирования изображений на каждый момент съемки:

— дешифрировочные признаки;

— программы дешифрирования, а также фотограмметрических и картосоставительных преобразований, если используется ЭВМ общего назначения.

На момент получения снимка в решающий блок *3* через блоки *1* и *2* поступают закодированное изображение и исходные данные. Исходные данные рассчитываются заранее на каждое время съемки и хранятся в блоке *1*, так как местоположение носителя камеры и ее ориентация на орбите известны достаточно точно. В блоке *2* телесигналы преобразуются в машинный код.

Решающим блоком *3* осуществляется пять основных преобразований информации об изображении: учет геометрических ошибок, дешифрирование, трансформирование в заданную проекцию, наложение географической сетки, монтаж отдельных изображений в единый массив.

Преобразованная информация поступает на устройство регистрации (блок *4*), которое в темпе приема восстанавливает видимое изображение.

В отдельных случаях требуется перенести со снимков изменение ситуации на созданную заранее карту, причем объем информации невелик. Такой перенос удобно осуществить с помощью палеток из параллелей и меридианов, которые накладываются на изображение. Рассмотрим один из способов построения палеток, изложений в книге А. Н. Лобанова «Аэрофототопография».

Пусть точка надира будет полюсом условных параллелей и меридианов на планете. На горизонтальном снимке они изобразятся так, как показано

на рис. 294, *а*. При этом углы между меридианами на снимке будут равны углам на планете. Параллели изображаются концентрическими окружностями, радиус которых определяется по формуле

$$r = R\frac{f}{H+h}. \qquad (26.18)$$

На наклонном снимке условные меридианы изображаются прямыми, проходящими через точку надира (рис. 294, *б*). Угол φ между изображением меридиана и горизонталью, проведенной через n, связан с соответствующим углом ψ на планете выражением

$$\operatorname{tg}\varphi = \cos\alpha_0 \operatorname{tg}\psi. \qquad (26.19)$$

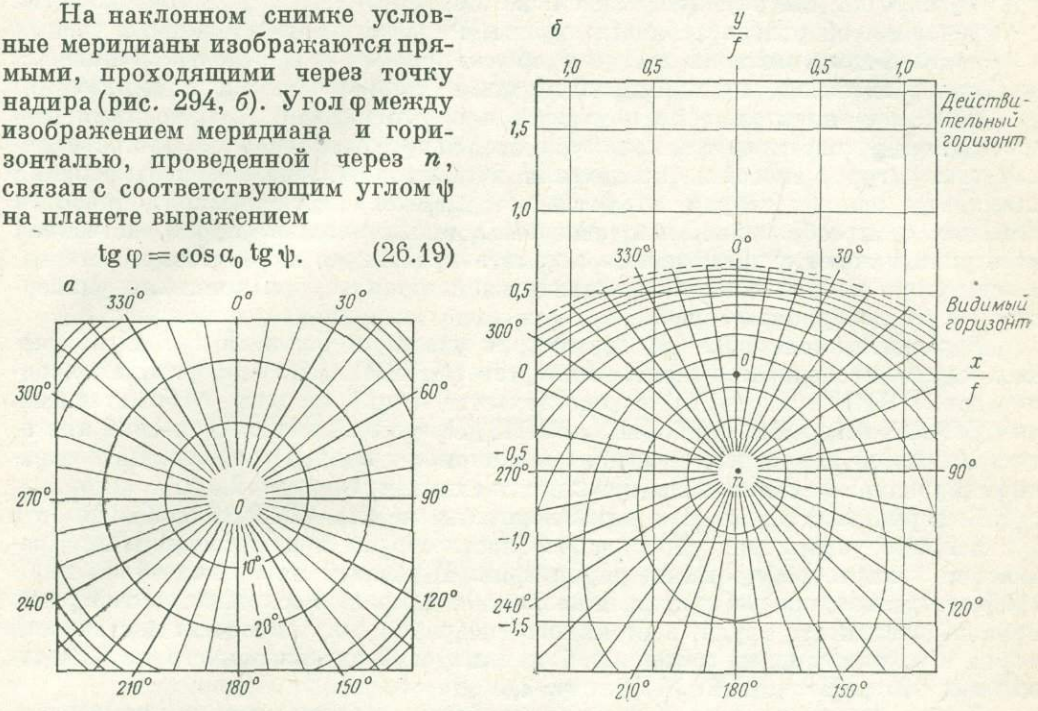


Рис. 294

Условные параллели на снимках будут изображаться эллипсами или гиперболами, уравнения которых получим из выражений

$$H^2x^2(H^2\cos^2\alpha_0 - r^2\sin^2\alpha_0)y^2 + 2f(H^2+r^2)y\sin\alpha_0\cos\alpha_0 + \\ + f^2(H^2\sin^2\alpha_0 - r^2\cos^2\alpha_0) = 0, \qquad (26.20)$$

а координаты центра по формулам

$$\left.\begin{aligned} x_0 &= 0 \\ y_0 &= -\frac{2f}{H^2}\frac{(H^2+r^2)\sin\alpha_0\cos\alpha_0}{H^2\cos^2\alpha_0 - r^2\sin^2\alpha_0} \end{aligned}\right\}. \qquad (26.21)$$

Ситуацию перерисовывают, пользуясь палеткой так же, как это делалось при графическом трансформировании аэроснимков (см. гл. 11).

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФОТОГРАММЕТРИИ

Фотограмметрия прошла большой путь — от съемки небольших участков местности с наземных станций и воздушных шаров до изучения планет и их спутников с автоматических космических кораблей.

Методы советской фотограмметрии отличаются оригинальностью и широким применением их для решения важнейших задач развития народного хозяйства и укрепления обороноспособности страны. Ряд достижений советских ученых в области фотограмметрии получил общее признание и отмечен Ленинской и Государственными премиями, авторскими свидетельствами и дипломами.

Наиболее значительными научными и практическими достижениями отечественной фотограмметрии являются сверхширокоугольная аэрофотосъемочная аппаратура, способы определения элементов внешнего ориентирования снимков в полете, теория и методы стереофотограмметрической обработки снимков с преобразованными связками, аналитическая пространственная фототриангуляция с применением автоматизированного высокоточного стереокомпаратора и электронной вычислительной машины, оригинальные универсальные стереоприборы и др.

В развитии советской фотограмметрии участвует большой коллектив ученых научно-исследовательских институтов (ЦНИИГАиК, Лаборатория аэрометодов, ЦНИИ транспортного строительства и др.), высших учебных заведений (МИИГАиК, НИИГАиК, МГУ, МИИЗ, Львовский политехнический институт, Киевский инженерно-строительный институт и др.), а также высококвалифицированные специалисты производственных предприятий.

Быстрые темпы развития производительных сил СССР и необходимость дальнейшего укрепления обороноспособности страны предъявляют новые требования к картографированию территории. В девятой пятилетке объем топографо-геодезических работ должен возрасти в 1,5 раза в основном за счет роста производительности труда, постоянного внедрения в производство достижений науки и техники, новых методов работы и научной организации труда («Геодезия и картография», 1972, № 12, стр. 2).

Бурно развивающееся народное хозяйство, освоение новых промышленных и сельскохозяйственных районов, мелиорация земель, лесонасаждение, строительство гидростанций, образование внутренних морей и водохранилищ, освоение пустынь — все это непрерывно меняет географию нашей страны и требует постоянного обновления топографических карт. Для строительства городов, промышленных и сельскохозяйственных объектов, а также для освоения природных богатств необходимы крупномасштабные карты.

В текущем пятилетии объем работ по обновлению карт увеличится в 4,2 раза, а производство крупномасштабных съемок — более чем в 40 раз по сравнению с объемом работ, выполненным в восьмой пятилетке.

Большая роль в решении новых задач, поставленных перед государственной топографо-геодезической службой, принадлежит фотограмметрии.

Непрерывно расширяется и круг нетопографических задач, успешно решаемых методами фотограмметрии. К ним относятся исследование движущихся объектов и быстро протекающих явлений, определение деформаций инженерных сооружений, изучение внутренних органов человеческого тела и др.

В связи с этим необходимо повысить эффективность научных исследований в области фотограмметрии и ускорить использование их результатов в производственных предприятиях. Современная фотограмметрия развивается по следующим основным направлениям:

1. Повышение измерительных и изобразительных свойств снимков:

— создание более совершенных аэрофотоаппаратов с объективами, отличающимися большой разрешающей силой и возможно малой дисторсией;

— применение не только черно-белой, но и цветной или спектрозональной аэропленки с высокой разрешающей способностью и практически недеформирующейся основой;

— более точное выравнивание фотоэмульсионного слоя в плоскость;

— разработка высокоточных методов калибровки аэрофотоаппаратов;

— разработка эффективных методов оценки качества изображения.

Улучшение измерительных и изобразительных свойств снимков позволит повысить точность стереофотограмметрических работ и сократить объем полевых работ по геодезическому обоснованию съемки и дешифрированию снимков.

2. Совершенствование и применение радиолокационных и других средств, позволяющих получить информацию о местности в любое время суток и независимо от метеорологических условий. Разработка методов использования этой информации для определения координат точек местности и составления топографических карт.

3. Определение элементов внешнего ориентирования снимков в полете. Повышение точности применяемых способов и разработка новых методов определения этих элементов приведет к значительному снижению объема полевых работ.

4. Совершенствование и широкое применение аналитической фототриангуляции, основанной на использовании автоматизированных высокоточных стереокомпараторов и электронных вычислительных машин:

— повышение эффективности методов построения и уравнивания маршрутных и блочных сетей,

— совершенствование способов определения и учета ошибок снимка,

— разработка методики более точной идентификации соответственных точек на стереопарах,

— повышение эффективности методов измерения снимков,

— оптимальное использование элементов внешнего ориентирования снимков, зафиксированных в полете.

5. Автоматизация процессов составления топографических карт и фотокарт путем создания приборов и систем, позволяющих значительно поднять производительность труда и освободить оператора от выполнения однообразной и утомительной работы.

6. Разработка и освоение новых методов изучения шельфовых зон морей и океанов, омывающих территорию нашей страны.

7. Развитие методов фотограмметрии применительно к решению нетопографических задач с целью удовлетворения запросов различных отраслей науки и народного хозяйства.

8. Географические исследования и изучение природных ресурсов, а также решение других задач с помощью спутников, автоматических и пилотируемых аппаратов.

9. Исследование космического пространства по снимкам планет и их спутников, полученным с космических кораблей.

10. Разработка оптимальных методов организации труда и автоматизации управления фотограмметрическим производством.

В нашей стране созданы все условия, необходимые для успешного решения этих сложных проблем и широкого развития фотограмметрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александольский Н. М. Фотограмметрия. М., Геодезиздат, 1956, 412 с.
2. Аэросъемка и ее применение. Тр. IX Всесоюзного совещания по аэросъемке. Л. «Наука», 1967. 416 с.
3. Бобир Н. Я. Фотограмметрия. М., «Недра», 1965. 290 с.
4. Большаков В. Д. Теория ошибок наблюдений с основами теории вероятностей. М., «Недра», 1965.
5. Герасимова О. А. Исследование влияния некоторых факторов на точность стереоскопических наблюдений. — «Труды ЦНИИГАиК», 1950, вып. 74. 55 с.
6. Герасимова О. А. Фотографическое качество и измерительные свойства аэроснимков. — «Труды ЦНИИГАиК», 1955, вып. 107. 225 с.
7. Герценова К. Н., Ванин А. Г. Фотограмметрическое сгущение опорной сети. — «Труды ЦНИИГАиК», 1967, вып. 172, 156 с.
8. Гольдман Л. М. Применение цветной аэросъемки для изучения местности (дешифрирование снимков). — «Труды ЦНИИГАиК», 1960, вып. 137. 172 с.
9. Дейнеко В. Ф. Аэрофотогеодезия. М., «Недра», 1968. 328 с.
10. Дробышев Ф. В. Исследования в стереофотограмметрии. М., «Недра», 1972, 121 с.
11. Дробышев Ф. В. Основы аэрофотосъемки и фотограмметрии. М., «Недра», 1973. 287 с.
12. Ильинский Н. Д. Обоснование аналитических методов стереофотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки. М., Геодезиздат, 1959. 179 с.
13. Кемниц Ю. В. Математическая обработка зависимых результатов измерений. М., «Недра», 1970. 190 с.
14. Киенко Ю. П. Аналитические методы определения координат в наземной стереофотограмметрии. М., «Недра», 1972. 133 с.
15. Кириленко В. С., Бруевич П. Н. Составление фронтальных планов и профилей по материалам фототеодолитной съемки. М., «Недра», 1970. 124 с.
16. Кислов В. В., Заитов И. Р. Практикум по фотограмметрии. М., «Недра», 1965. 188 с.
17. Кожевников Н. П., Заитов И. Р. Фотограмметрия. Ч. II. М., «Недра», 1967. 140 с.
18. Коншин М. Д. Фотограмметрическая обработка снимков с преобразованными связками. — «Труды ЦНИИГАиК», 1944, вып. 44. 66 с.
19. Коншин М. Д., Полякова В. А. Аналитический способ построения одномаршрутных фотограмметрических сетей.—«Труды ЦНИИГАиК», 1966, вып. 165. 186 с.
20. Коншин М. Д., Орлов В. К. Фотограмметрические приборы. — В сб. — «Итоги науки. Геодезия», 1966. 62 с.
21. Коншин М. Д. Аэрофотограмметрия. М., «Недра», 1967. 348 с.
22. Космическая иконика. ИКИ АН СССР. М., «Наука», 1973. 340 с.
23. Куштин И. Ф. Рефракция световых лучей в атмосфере. М., «Недра», 1971. 130 с.
24. Лобанов А. Н. Теория трансформирования пары снимков. М., Геодезиздат, 1954. 102 с.
25. Лобанов А. Н. Фототопография. М., «Недра», 1968. 267 с.
26. Лобанов А. Н. Аэрофототопография. М., «Недра», 1971. 560 с.
27. Лобанов А. Н. Аналитическая фотограмметрия. М., «Недра», 1972. 224 с.
28. Лобанов А. Н., Овсяников Р. П. и др. Фототриангуляция с применением электронной цифровой вычислительной машины. М., «Недра», 1967. 292 с.
29. Меррит Э. Л. Аналитическая фотограмметрия. Перев. с англ. Ф. Ф. Лысенко. М., Геодезиздат, 1961. 192 с.
30. Мурашев С. А., Гебгарт Я. И., Кислицын А. С. Аэрофотогеодезия. М., «Колос», 1968. 424 с.

31. Наставление по топографическим съемкам в масштабах 1 : 10 000 и 1 : 25 000. М., «Недра», 1965. 286 с.
32. Овсянников Р. П. Фототопография. Ч. I. Теория одиночного снимка и стереоскопической пары. Под ред. проф. А. Н. Лобанова. М., ВИА, 1970. 260 с.
33. Панкратьев Ю. Н., Пузанов Б. С., Сердюков В. М. Инженерная фотограмметрия. Под общ. ред. проф. Н. Г. Видуева. Львов, 1964. 286 с.
34. Панкратьев Ю. Н., Малявко М. А. и др. Электроника в фотограмметрии. Львов, 1968. 240 с.
35. Полякова В. А., Кузнецова Ш. Е. Аналитические способы построения и уравнивания пространственных фотограмметрических сетей с применением электронных вычислительных машин. — В сб. «Итоги науки. Геодезия», 1967. 133 с.
36. Пособие по фотограмметрии. Сокращенный перевод под ред. В. И. Кораблева. М., «Недра», 1970. 216 с. и 1971. 168 с.
37. Прикладная фотограмметрия. Л., «Наука», 1969. 256 с.
38. Реферативный сборник № 14. ЦНИИГАиК, ОНТИ. М., 1971. 116 с.
39. Русинов М. М. Инженерная фотограмметрия. М., «Недра», 1966. 248 с.
40. Сердюков В. М. Фотограмметрия в инженерно-строительном деле. М., «Недра», 1970. 136 с.
41. Скиридов А. С. Стереофотограмметрия. М., Геодезиздат, 1959. 540 с.
42. Создание топографических фотокарт. — «Труды ЦНИИГАиК», вып. 194, 1972. 80 с.
43. Соколова Н. А. Фотограмметрические методы топографического картирования. — В сб. «Итоги науки и техники. Геодезия и аэрофотосъемка», т. 8. Под общ. ред. А. В. Кондрашкова. 1973. 78 с.
44. Тетерин Е. Н., Шубин Н. В. и др. Организация и планирование геодезических и топографических работ. Под ред. В. Ф. Павлова. М., «Недра», 1965. 300 с.
45. Применяемые методы определения в полете элементов внешнего ориентирования. Под общ. ред. проф. М. Д. Коншина. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1959, вып. 129. 257 с.
46. Радиогеодезический метод планового обоснования аэрофототопографической съемки масштабов 1 : 25 000—1 : 100 000. Под ред. проф. М. Д. Коншина. М., Гео — «Тр. ЦНИИГАиК», 1963, вып. 151. 96 с.
47. Трунин А. П., Финаревский И. И., Чистяков С. В. Фототеодолитная съемка в крупных масштабах. М., «Недра», 1970. 208 с.
48. Тюфлин Ю. С. Способы стереофотограмметрической обработки снимков, полученных с подвижного базиса. М., «Недра», 1971. 169 с.
49. Урмаев Н. А. Элементы фотограмметрии. М., Геодезиздат, 1941. 219 с.
50. Урмахер Л. С. Оптика фотографических и аэрофотограмметрических приборов. М., «Недра», 1965. 240 с.
51. Финаревский И. И. Методика уравнивания аналитических сетей пространственной фототриангуляции. Л., ВНИМИ, 1970. 176 с.
52. Финковский В. Я. Теория коллинеарной геометрической модели местности. М., «Недра», 1967. 128 с.
53. Фотограмметрическая обработка и дешифрирование аэроснимков. Л., «Наука», 1967. 170.
54. Чеботарев А. С. Способ наименьших квадратов с основами теории вероятностей. М., Геодезиздат, 1958. 599 с.
55. Юстанов М. Н. Уравнивание пространственной фототриангуляции. М., Геодезиздат, 1961. 70 с.
56. Юстанов М. Н. Определение элементов внутреннего ориентирования и дисторсии фотограмметрической камеры. М., «Недра», 1966. 39 с.
57. Bohonos B. Fotogrametria. Warszawa, 1964, 360 s.
58. Bonneval H. Photogrammètrie gènèrale. Paris, 1972.
59. Buchholtz A. Rüger W., Photogrammetrie. Berlin, 1973. 416 s.
60. Gal P. Fotogrametria. Bratislava, 1965.
61. Ghosh S. Theory of Stereophotogrammetry. Ohio, 1968, 219 p.
62. Hallert B. Photogrammetry. New—York, 1960, 340 p.
63. Manual of Photogrammetry. New—York, 1966, 1220 p.
64. Piasecki M. Fotogrametria. Warszawa, 1973, 694 s.
65. Finsterwalder R. Photogrammetrie. München, 1968, 378 s.
66. Хайдушки И., Станоев В. Фотография и фотограмметрия. София, 1969. 312 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрис 435
Абрисные копии 443
Автограф Вильда 307
Автоматизация стереоизмерений 411
Автоматическая межпланетная станция 449
Автоматический профилограф МИИГАиК 421
Аккомодация глаза 25
Анаглиф 37
Анаглифические очки 37
Анаглифические фильтры 37
Анаглифический способ 37
Аналитический способ
— взаимного ориентирования пары снимков 325
— внешнего ориентирования модели 351
— обработки наземных снимков 57
— пространственной фототриангуляции 56, 380, 388
— радиальной плановой фототриангуляции 218
— составления карты 319, 427
— трансформирования снимка 236, 427
— трансформирования стереопары 427
Аналитический стереоприбор 319
Аналитический фотокартограф А. Н. Лобанова и И. Г. Журкина 427
Аффинное фототрансформирование 187
Аэрорадионивелирование 366
Аэроснимок
— горизонтальный 105
— перспективный 105
— плановый 105
Аэросъемочная камера 7
Аэрофотоаппарат 7
Аэрофотограмметрия 103
Аэрофотосъемка 224, 433
Аэрофототопографическая съемка 7, 224, 433
Базис
— глазной 25
— стереоскопа 32
— фотографирования 44, 227
Базисная плоскость 228
Базисная точка 228
Базисные каретки 315
Базисные линии 328
Бинокулярное зрение 25
Бинокулярный микроскоп 53
Взаимное ориентирование
— моделей 387
— снимков 229, 260, 269, 325, 343
Влияние
— атмосферной рефракции 407
— деформации снимков 410
— дисторсии объектива 404
— кривизны Земли 408, 452
— ошибки измерения базиса 70
— ошибок измерения модели 398
— ошибок измерения снимков 70
— ошибок элементов ориентирования снимков 72
— рельефа местности 122, 128
— стеклянных пластин 193
— Угла наклона снимка 118, 123
Внешнее ориентирование модели 118, 123, 279, 331, 346
Внешнее ориентирование снимков 349
Внутреннее ориентирование снимков 103, 229, 283
Высота фотографирования 259, 351
Геодезическая основа 225, 435, 441
Геодезическая точка 209
Геодезические координаты 41, 49, 103, 205
Геометрические свойства
— аэроснимков 103, 227
— космических снимков 450
— наземных снимков 49
Геометрические условия фототрансформирования 143
Геоцентрические координаты 104
Главная базисная плоскость 228
Главная вертикаль 106
Главная вертикальная плоскость 105
Главная горизонталь 105
Главная зрительная плоскость 26
Главная точка снимка 15, 103
Главная точка схода 106
Главное расстояние стереоскопа 31
Главный луч 227
Глазной базис 25
Глубина фокуса 14, 296
Голография 430
Горизонталь 69, 226, 256, 337
Гороптер 27
Графическая фототриангуляция 208
Графическое трансформирование 141
Двойная обратная засечка 260
Двойной проектор 295, 346
Деформация модели 287, 404
Деформация фотоматериалов 19, 410
Децентрация коррекционного механизма 317
Децентрация снимка
— линейная 151, 317, 348
— угловая 153
Децентрация трансформированного изображения 341
Дешифрирование снимков 226, 433, 446
Дистанционный метод 5, 457
Дисторсия объектива 15, 404
Дифференциальное фототрансформирование 320
Дифференцированный способ составления карты 239, 433
Дополнительная проектирующая система 303
Зависимость между координатами соответственных точек вертикального и наклонного снимков 50
— горизонтального и наклонного снимков 236
— объекта и его изображений на стереопаре 47, 232
— объекта и снимка 51, 235
— предметной и картинной плоскостей 107
Зеркально — линзовый стереоскоп 31
Зеркальный стереоскоп 31
Зона допустимых искажений направлений 206
Зрительная ось глаза 24
Измерение координат точек модели 35, 65, 294
— координат точек снимка 35, 53
— поперечных параллаксов 35, 53
— продольных параллаксов 35, 53
Измерительные марки 39
Измерительный столик 298
Изогипсограф А. С. Скиридова 412
Инверсор Карпантье 158
— лекальный 174
— ленточный 164
— прямоугольный 157
— ромбический 174
— тангенциальный 168
Интерпретоскоп Цейсса 33
Искажения модели 283, 398
— снимка 19, 404
— фототриангуляции 400, 404
Искажения направлений на аэроснимке, вызываемые
— наклоном аэроснимка 123
— рельефом местности 128
Искусственный спутник Земли 449
Исправление карты 446
Камеральное дешифрирование снимков 226, 433, 446
Камеральные работы 53, 440
Каретки
— базисные 315
— параллактические 54
— снимков 313
— фокусных расстояний 313
Карта 337
Картинная плоскость 105
Картографирование планет 455
Кинотеодолит 100
Коллинеарное трансформирование 137
Комбинированный метод создания карт 7, 224
Конструктивная ось фототрансформатора 151
Контрольная сетка 182
Контрольные направления 77
Контрольные точки 79

Конхоида 121
Координатные метки 103
Координаты точки местности
— геодезические 41, 49
— геоцентрические 104
— фотограмметрические 41, 48
Координаты точки снимка
— плоские 42, 104
— пространственные 43, 104
Координаты точки фотографирования 41
Коррекционные механизмы
— стереографа 308
— стереометра 242
— стереопроектора 313
Косвенные признаки восприятия рельефа 25
Коэффициент взаимного ориентирования 328
— преобразования связи 338
— редуцирования 218
— *систематической деформации* фотобумаги 197
— трансформирования 149
— уменьшения снимков 300
Кривизна Земли 70, 408
Критерий взаимного ориентирования снимков 261
Линейные элементы внешнего ориентирования снимков *43*, *231*
Линия базисная 228
— главная базисная 228
— горизонта 105
— надирная базисная 228
— направления съемки 106
— неискаженных масштабов 114
— основания картины 105
Лучи базисные 228
— главные 228
— надирные 228
— проектирующие 228
— соответственные 228
Макетные снимки Г. А. Ошуркова 51
Марки измерительные 39
Маркировка опорных точек 435
Масштаб аэроснимка 110, 433
— *по главной вертикали 113*
— по горизонталям 114
Масштаб горизонтального аэроснимка 112
— планового аэроснимка 115
Масштаб модели 229
— фототриангуляционной сети 386
Масштабный инверсор 157, 164, 174
Метод комбинированный 224
— изучения природных ресурсов по космическим снимкам 457
— стереотопографический 81, 433
Методы создания карт 81, 224, 433
— обновления карт 441
Механизм поперечной коррекции 245
— продольной коррекции 242
Мешающее изображение 38
Мешающий фактор 38
Мнимая марка 35
Модель 6, 228
Монокулярное зрение 24
Мультиплекс 298
Надира точка 106
Надирный луч 227
Наземная фототопографическая съемка 7, *81*
Накопление ошибок в фототриангуляции 217, 398
Направляющие косинусы 43, 232
Начальное направление 130, 209
Неопределенность взаимного ориентирования снимков 278
Несимметричные точки 27
Нормальный случай съемки 44, 233
Нулевой стереоэффект 32
Нулевых искажений точка 106
Область отчетливого бинокулярного зрения 28
Обновление карт 440
Обратный стереоскопический эффект 32
Опознак 225, 435
Опорная точка 7, 225, 229
Оптико-графическое трансформирование 199
Оптическая ось фотокамеры 15
Оптические условия трансформирования 145
Оптический проектор 200
Оптический редуктор Ф. В. Дробышева 213
— Н. А. Попова 211
Оригинал карты 337
Ориентирующие точки 139
Ортофотоснимок 320
Основные случаи стереосъемки
— конвергентный 44
— нормальный 44
— общий 44
— параллельный 44
Острота бинокулярного зрения 24
— монокулярного зрения 24
Пара 6, 47, 232
Параллакс поперечный 52, 230
— продольный 52, 230
— физиологический 27
Параллактические сетки М. Д. Коншина 263
Параллактический угол 26
Перспективный инверсор 159, 167
Плоскость базисная 228
— главная вертикальная 105
— горизонта 105
— картинная 105
— надирная базисная 228
— *предметная 105*
Подобные связки 227
Полевое дешифрирование снимков 226, 433
Полевое обследование карты 448
Полевые работы 88, 224, 435, 448
Поперечный параллакс на снимках 52, 230
— на модели 326
Поперечный угол наклона модели 279
— снимка 232
Превышение 234
Предметная плоскость 105
Преобразованная модель 338
Прецизионные рычаги 307
Продольный параллакс 230
Продольный угол наклона модели 279
— снимка 231
Проектирующая система 301
Проектирующий луч 222
Пространственная фототриангуляция 372
— аналитическая 380, 388
— аналоговая 373
Прямой стереоэффект 32
Прямоугольные координаты точки объекта 41, 232
— точки снимка 42, 230
Рабочий центр аэроснимка 206
Радиальная плановая фототриангуляция 205
Радиовысотомер ЦНИИГАиК 361
Радиодальномер ЦНИИГАиК 369
Радиус бинокулярного зрения 29
Разность масштабов пары снимков 30
Разность продольных параллаксов 234
Разность продольных параллаксов 234
Разрешающая сила объектива 17
Разрешающая способность аэропленки 18
— *снимка* 17
Расчет допустимого расстояния между опознаками 225, 400, 435
Редуцирование ромбических цепей 215
Рекогносцировка 88, 448
Рефракция атмосферная 20
Рисовка контуров и рельефа 69, *337*
Ромбическая цепь 208
Самолетный радиодальномер ЦНИИГАиК 369
Сверхширокоугольный мультиплекс ЦНИИГАиК 301
Светофильтры 38
Светящаяся марка 316
Связка 227
Связующая точка 229
Сгущение опорной сети 205, 372
Сетчатка 24
Симметричные точки 26
Система координат
— геодезических 41, 103
— геоцентрических 104
— на снимке 42, 103
— фотограмметрических 41, 103
Сканирование 416
Случайная деформация фотоматериала 20
Смещение контурных точек на аэроснимке

— вследствие угла наклона снимка 118
— вследствие рельефа местности 122
Снимок горизонта 353
— звезд 353
— местности 81, 103
Совместное рассмотрение геометрических и оптических условий фототрансформирования 147
Составление оригинала карты 337
Соответственные точки 26, 228
Способ анаглифов 37
— действительной марки 36
— дифференцированный 36
— мнимой марки 35
— редуцирования 210
— трансформирования 139
— универсальный 8, 433
Стандартное положение точек 248, 274
Старение карт 440
Статоскоп ЦНИИГАиК 358
Стереоавтограф Ф. В. Дробышева 65
— Цейсса 65
Стереокартограф Сантони 307
Стереокомпаратор СКА-18 56
— СКА-30 56
— СКВ ЦНИИГАиК 56
— 1818 Цейсса 55
Стереомат Вильда 414
Стереометр Ф. В. Дробышева 239
Стереомодель 6, 35, 228
Стереопара 227, 5, 30
Стереопланиграф Цейсса 301
Стереопроектор Г. В. Романовского 313
Стереотопографический метод 8, 81, 433
Стереотригомат Цейсса 307
Стереофотограмметрические камеры И. Г. Индиченко 98
— МИИГАиК 101
— Цейсса 98
Стереофотодальномер А. Н. Лобанова 95
Стереоэффект нулевой 32
— обратный 32
— прямой 32
Супрограф Цейсса 307
Съемка аэрофототопографическая 224, 433
— космическая 449
— наземная фототопографическая 81
Съемка контуров и рельефа 69, 337
Теория коррекционного механизма стереографа 308
— коррекционного механизма стереометра 242
— коррекционного механизма стереопроектора 315
— обработки снимков с преобразованными связками 339
— одиночного снимка 103
— пары снимков 81, 226, 437
— трансформирования одиночного снимка 136
— трансформирования пары снимков 339
— фототриангуляции 205, 372
Точка главная 15
— надира 105
— нулевых искажений 105
— опорная 7, 225, 229
— отраженного импульса 362
— фиксации бинокулярного взора 25
— фиксации монокулярного взора 24
— фотографирования 41, 227, 368
— центральная 206
Точки базисные 228
— несимметричные 27
— ориентирующие 139
— симметричные 26
— соответственные 26, 228
— стандартно расположенные 248, 274
— схода 105
Точность измерения координат точек модели 398
— координат точек снимка 70, 398
— наведения измерительной марки 39
— определения элементов взаимного ориентирования 277
— определения элементов внешнего ориентирования 349
— определения элементов внутреннего ориентирования 283
— пространственной фототриангуляции 398
— радиальной фототриангуляции 217
Трансформирование аэроснимков 136, 339
Трансформирование продольного параллакса начальной точки 257
Угловые элементы внешнего ориентирования снимка 43, 231
Угол конвергенции 26
— наклона аэроснимка 105
— параллактический 26
— поворота аэроснимка 104
Универсальные стереоприборы 294
— аналитические 319
— механические 307
— оптико-механические 318
— оптические 295
Универсальный способ составления карты 8, 69, 337
Уравнение взаимного ориентирования снимков 265
— внешнего ориентирования модели 280
— внешнего ориентирования снимка 350
— ориентирования снимков на стереометре 240
Уравнивание фототриангуляции 388
Условие пересечения пары соответственных лучей 260
Установочные элементы 184
Фокусное расстояние фотокамеры 16
— объектива 13
— проектирующей камеры 300
— снимка 227
Фотовысотомер А. Н. Лобанова и И. И. Шелягина 234
Фотодальномер 94
Фотопланы 234
Фотоприставка к стереографу Ф. В. Дробышева 320
Фотостереограф Нистри 318
Фототеодолит «Геодезия» 82
— Цейсса 84
Фотосхемы 130
Фототрансформатор большой 154
— дифференциальный 137, 320
— Е-4 Вильда 178
— малый 162
— Seg — V Opton 176
— Ректимат Цейсса 180
— электронный М. П. Бордюкова 12
Фототрансформаторы первого и второго рода 150
Фототрансформирование аффинное 187
— дифференциальное 137, 320
— коллинеарное 137
— по ориентирующим точкам 181
— по установочным элементам 184
Фототриангуляция аналитическая 56, 380, 388
— аналоговая 3, 373
Цветная марка 315
Центральная проекция 105
Центральная точка 206
Центр проекции 105
Цифровая автоматическая картосоставительская система 458
Цифровая модель 99
Щелевой фототрансформатор Е. И. Калантарова и Г. П. Жукова 320
Электронный картографический трансформатор М. П. Бордюкова 12
Элементы взаимного ориентирования пары снимков 263
— взаимного ориентирования моделей 388
— внешнего ориентирования модели 279
— внешнего ориентирования снимка 43, 103, 231
— внешнего ориентирования стереопары 43, 231
— внутреннего ориентирования снимка 43, 87, 103
— центральной проекции 105

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 2

Часть первая. **Общие сведения**

Глава 1. Введение 5
§ 1. Фотограмметрия и ее связи с другими дисциплинами 5
§ 2. Фототопография. Виды и методы фототопографических съемок 7
§ 3. Краткий обзор развития фотограмметрии 9
Глава 2. Оптические основы центрального проектирования 12
§ 4. Принципиальная схема построения изображения объекта 12
§ 5. Принципиальная схема измерительной фотокамеры. Дисторсия и элементы внутреннего ориентирования 15
§ 6. Разрешающая способность снимка 17
§ 7. Влияние ошибки выравнивания фотопленки. Деформация фотоматериалов 19
§ 8. Влияние атмосферной рефракции 20
Глава 3. Наблюдение и измерение снимков и модели объекта 24
§ 9. Монокулярное зрение 24
§ 10. Бинокулярное зрение 25
§ 11. Стереоскопическое наблюдение снимков 30
§ 12. Способы измерения снимков и модели 35

Часть вторая. **Наземная фотограмметрия**

Глава 4. Основные определения и формулы наземной фотограмметрии 41
§ 13. Координаты точки объекта и ее изображений на снимках 41
§ 14. Элементы ориентирования наземных снимков 43
§ 15. Основные случаи стереосъемки 44
§ 16. Определение направляющих косинусов 45
§ 17. Определение горизонтальных и вертикальных углов по снимку 47
§ 18. Определение координат точек объекта 47
§ 19. Формулы связи между геодезическими и фотограмметрическими координатами 49
§ 20. Зависимость между координатами точек вертикального и наклонного снимков 50
§ 21. Зависимость между координатами точек снимка и объекта 51
§ 22. Продольный и поперечный параллаксы 52
Глава 5. Камеральные работы 53
§ 23. Задачи и методы камеральных работ 53
§ 24. Стереокомпаратор 53
§ 25. *Аналитический метод* 56
§ 26. Графический метод 58
§ 27. Графомеханический метод 61
Глава 6. Точность наземной стереофотограмметрической съемки 70
§ 28. Общие сведения 70
§ 29. Влияние ошибок измерения снимков и базиса 70
§ 30. Влияние ошибок элементов внутреннего ориентирования 72
§ 31. Влияние ошибок элементов внешнего ориентирования 74
§ 32. Допуски для юстировки приборов и полевых работ. Точность определения координат точки объекта 74

Стр.

§ 33. Определение ошибок элементов внешнего ориентирования по контрольным направлениям . . . 77
§ 34. Определение ошибок элементов внешнего ориентирования по контрольным точкам . . . 78
Глава 7. Применение наземной фотограмметрии в топографии . . . 81
§ 35. Фототеодолиты . . . 81
§ 36. Определение элементов внутреннего ориентирования . . . 86
§ 37. Полевые работы . . . 88
§ 38. Геодезические работы при разреженном обосновании съемки . . . 90
Глава 8. Применение наземной фотограмметрии для решения нетопографических задач . . . 92
§ 39. Наземная фотограмметрия в астрономии . . . 92
§ 40. Определение координат ориентиров и целей . . . 94
§ 41. Наземная фотограмметрия в архитектуре и строительстве . . . 95
§ 42. Определение параметров динамических процессов . . . 99
§ 43. Решение других нетопографических задач методами наземной фотограмметрии . . . 101

Часть третья. Аэрофотограмметрия

Глава 9. Геометрический анализ одиночного аэроснимка . . . 103
§ 44. Системы координат, применяемые в аэрофотограмметрии. Элементы ориентирования аэроснимка . . . 103
§ 45. Элементы центральной проекции . . . 105
§ 46. Зависимость между координатами соответственных точек предметной и картинной плоскостей . . . 107
§ 47. Общая формула масштаба аэроснимка . . . 110
§ 48. Формулы масштабов для частных случаев . . . 112
§ 49. Приближенная формула масштаба планового аэроснимка . . . 115
§ 50. Средний масштаб в произвольной точке планового аэроснимка. Средний масштаб планового аэроснимка в целом . . . 117
§ 51. Смещение контурных точек на аэроснимке, вызываемое наклоном аэроснимка . . . 118
§ 52. Смещение контурных точек на аэроснимке, вызываемое рельефом местности . . . 122
§ 53. Искажение направлений на аэроснимке, вызываемое наклоном аэроснимка . . . 123
§ 54. Искажение направлений на аэроснимке, вызываемое рельефом местности 128
Глава 10. Фотосхемы . . . 130
§ 55. Понятие о фотосхемах . . . 130
§ 56. Точность определения расстояний по маршрутной фотосхеме . . . 131
Глава 11. Трансформирование аэроснимков . . . 136
§ 57. Общее понятие. Анализ трансформированного изображения. Способы трансформирования . . . 136
§ 58. Определение ориентирующих (трансформационных) точек . . . 139
§ 59. Графическое трансформирование аэроснимков по четырем ориентирующим точкам . . . 141
§ 60. Геометрические условия фототрансформирования аэроснимков . . . 143
§ 61. Оптические условия фототрансформирования аэроснимков . . . 145
§ 62. Совместное рассмотрение геометрических и оптических условий фототрансформирования. Фототрансформаторы первого и второго рода . . . 147
§ 63. Понятие о конструктивной оси фототрансформатора. Линейная и угловая децентрация. Автоматизация установок . . . 150
§ 64. Большой фототрансформатор (ФТБ). Описание и основные характеристики . . . 154
§ 65. Масштабный инверсор большого фототрансформатора . . . 157
§ 66. Перспективный инверсор большого фототрансформатора . . . 159
§ 67. Выполнение геометрических и оптических условий при трансформировании на ФТБ . . . 162
§ 68. Малый фототрансформатор (ФТМ). Описание и основные характеристики . . . 162
§ 69. Масштабный инверсор малого фототрансформатора . . . 164

Стр.

§ 70. Перспективные инверсоры малого фототрансформатора 167
§ 71. Выполнение геометрических и оптических условий при трансформировании на ФТМ 173
§ 72. Лекальный и ромбический масштабные инверсоры 174
§ 73. Фототрансформатор Seg-V 176
§ 74. Фототрансформатор Е-4 Вильда 178
§ 75. Фототрансформатор «Ректимат» 180
§ 76. Фототрансформирование по ориентирующим точкам 181
§ 77. Фототрансформирование по установочным элементам 184
§ 78. Фототрансформирование по зонам 185
§ 79. Аффинное фототрансформирование 187
§ 80. Фототрансформирование деформированного аэроснимка 191
§ 81. Влияние физических факторов на точность фототрансформирования 193
§ 82. Фотопланы 198
§ 83. Оптико-графическое трансформирование 199
Глава 12. Радиальная плановая фототриангуляция 205
§ 84. Общие замечания 205
§ 85. Зона допустимых искажений направлений на плановом аэроснимке, обусловленных наклоном аэроснимка 206
§ 86. Определение превышений, при которых можно принять за вершину направлений главную точку и центральные точки 207
§ 87. Графическая фототриангуляция. Построение ромбической цепи 208
§ 88. Сущность и способы редуцирования 210
§ 89. Оптический редуктор Н. А. Попова 211
§ 90. Оптический редуктор Ф. В. Дробышева 213
§ 91. Редуцирование ромбических цепей по геодезическим точкам на оптических редукторах Н. А. Попова и Ф. В. Дробышева 215
§ 92. Четырехпроекторный оптический редуктор Н. П. Кожевникова 215
§ 93. Точность графической фототриангуляции 217
§ 94. Аналитическая радиальная плановая фототриангуляция 218
Глава 13. Комбинированный метод создания карт 224
§ 95. Понятие о комбинированном методе 224
§ 96. Расчет допустимого расстояния между опознаками 225
§ 97. Технологические схемы работ 226
Глава 14. Анализ пары снимков 227
§ 98. Основные определения 227
§ 99. Координаты и параллаксы точек стереопары 230
§ 100. Элементы ориентирования пары аэроснимков 231
§ 101. Зависимость между координатами точки объекта и координатами ее изображений на аэроснимках 232
§ 102. Основные формулы для одиночного аэроснимка 235
§ 103. Связь между координатами точек и продольными параллаксами на горизонтальных и наклонных снимках 236
Глава 15. Измерение продольных параллаксов и стереорисовка рельефа на снимках 239
§ 104. Общие сведения о стереометре 239
§ 105. Уравнение ориентирования снимков на стереометре 240
§ 106. Теория коррекционных механизмов 242
§ 107. Ориентирование снимков по установочным величинам 247
§ 108. Ориентирование снимков по шести точкам 248
§ 109. Ориентирование снимков по четырем точкам 253
§ 110. Определение высот точек и проведение горизонталей 256
§ 111. Трансформирование продольного параллакса начальной точки 257
§ 112. Определение высоты фотографирования 259
Глава 16. Взаимное ориентирование пары снимков 260
§ 113. Способы решения задачи ориентирования снимков. Условия взаимного ориентирования пары снимков 260
§ 114. Элементы взаимного ориентирования 263
§ 115. Уравнения взаимного ориентирования 265
§ 116. Определение элементов взаимного ориентирования способом последовательных приближений 269
117. Определение элементов взаимного ориентирования по координатам стандартно расположенных точек 273

Стр.

§ 118. Неопределенность взаимного ориентирования 278
Глава 17. Внешнее ориентирование модели 279
§ 119. Элементы внешнего ориентирования модели 279
§ 120. Уравнения внешнего ориентирования модели 280
§ 121. Аналитические способы определения элементов внешнего ориентирования модели по опорным точкам 281
§ 122. Требования к точности сохранения элементов внутреннего ориентирования *при построении модели по паре снимков* 283
§ 123. Деформация модели 287
Глава 18. Универсальные стереоприборы 294
§ 124. Назначение и классификация универсальных стереоприборов 294
§ 125. Принципиальные схемы оптических универсальных стереоприборов 295
§ 126. Мультиплексы 298
§ 127. Стереопланиграф Цейсса 301
§ 128. Принципиальные схемы механических универсальных стереоприборов 307
§ 129. Стереограф Ф. В. Дробышева 308
§ 130. Стереопроектор Г. В. Романовского 313
§ 131. Принципиальная схема оптико-механических универсальных стереоприборов 318
§ 132. Принципиальная схема аналитических универсальных стереоприборов 319
§ 133. Дифференциальное трансформирование снимков на универсальных стереоприборах 320
§ 134. Основные направления развития универсальных стереоприборов 324
Глава 19. Ориентирование и обработка снимков на универсальных стереоприборах 325
§ 135. Взаимное ориентирование снимков 325
§ 136. Внешнее ориентирование модели 331
§ 137. Составление оригинала карты 337
§ 138. Построение преобразованной модели по горизонтальным снимкам 338
§ 139. Трансформирование пары снимков на универсальном стереоприборе 335
§ 140. Взаимное ориентирование снимков с преобразованными связками 343
§ 141. Построение и внешнее ориентирование преобразованной модели
Глава 20. Внешнее ориентирование снимка 349
§ 142. Классификация способов 349
§ 143. Определение элементов внешнего ориентирования снимка по опорным точкам 350
§ 144. Определение угловых элементов внешнего ориентирования снимка с помощью гиростабилизирующих устройств и по снимкам горизонта и звезд 353
§ 145. Определение разностей высот фотографирования по показаниям статоскопа 358
§ 146. Использование показаний радиовысотомера для определения высот фотографирования 361
§ 147. *Аэрорадионивелирование* 366
§ 148. Определение координат точек фотографирования с помощью радиогеодезических систем 368
Глава 21. Пространственная фототриангуляция 372
§ 149. Назначение и классификация пространственной фототриангуляции 372
§ 150. Фототриангуляция на универсальных стереоприборах 373
§ 151. Аналитическая маршрутная фототриангуляция 380
§ 152. Аналитическая блочная фототриангуляция 388
Глава 22. Точность пространственной фототриангуляции 398
§ 153. Точность построения одиночной модели 398
§ 154. Точность маршрутной фототриангуляции 400
§ 155. Точность блочной фототриангуляции 403
§ 156. Влияние систематических ошибок и методы исключения деформации модели 404
Глава 23. Автоматизация стереоизмерений 411
§ 157. Общие сведения 411
§ 158. Способы решения задачи 412
§ 159. Аналоговые автоматические устройства Стереомат 414
§ 160. Автоматический профилометр МИИГАиК (АПМ) 421
§ 161. Устройства, основанные на цифровой вычислительной технике . . . 425

Стр.
§ 162. Аналитический фотокартограф 427
§ 163. Перспективы развития автоматизации стереоизмерений 427
Глава 24. Стереотопографический метод создания карт 433
§ 164. Универсальный и дифференцированный способы 433
§ 165. Технологические схемы создания карт 437
Глава 25. Обновление топографических карт 440
§ 166. Основные требования к обновлению карт 440
§ 167. Методы обновления карт 441
§ 168. Подготовительные работы 443
§ 169. Камеральное дешифрирование снимков и исправление карты 446
§ 170. Полевое обследование исправленной карты 448
Глава 26. Использование фотограмметрии для изучения космического пространства 449
§ 171. Проникновение в космос. Приоритет СССР 449
§ 172. Способы получения снимков из космоса и их геометрические свойства 450
§ 173. Картографирование планет и их спутников 455
§ 174. Методы изучения природных ресурсов по снимкам из космоса 457
Перспективы развития фотограмметрии 460

Список литературы 463

Предметный указатель 464

Николай Яковлевич Бобир
Алексей Николаевич Лобанов
Геннадий Дмитриевич Федорук

ФОТОГРАММЕТРИЯ

Редактор издательства Н. В. Протопопова
Техн. редактор Л. Г. Лаврентьева
Корректоры С. С. Борисова, Н. А. Громова
Переплет художника В. М. Аладьева

Сдано в набор 21 V 1974 г. Подписано в печать 24/IX 1974 г.
Т-16289. Формат 70×100¹/₁₆. Бумага № 2. Печ. л. 29,5.
Усл. л. 38,35. Уч.-изд. л. 35,58. Тираж 14 000 экз.
Заказ 1034/4564-15. Цена 1 р. 58 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19.
Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
196006, г. Ленинград, Московский пр., 91

1р.58к.

1276

НЕДРА - 1974