

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

Радиолокационная фотограмметрия. М., Недра, 1979, 239 с. Авт.: В. И. Аковецкий, Г. Н. Донсков, Ю. Н. Корнеев, Л. Б. Неронский.

Книга представляет собой систематизацию материалов по радиолокационной фотограмметрии в СССР и за рубежом, дополненных теоретическими исследованиями в этой области.

В книге изложены некоторые вопросы использования радиолокационных изображений, полученных радиолокационными системами; рассмотрена геометрия построения этих изображений; изложены фотограмметрические методы обработки и дешифрирования изображений; рассмотрены геометрические искажения радиолокационных изображений и методы их устранения; систематизированы методы аналитической обработки.

Книга рассчитана на научных работников аэрофотогеодезических служб при проектировании аэрофотосъемки для картографии, геологии, геодезии, сельского и лесного хозяйства и последующего исследования внешней среды. Книга может быть использована проектировщиками радиолокационной бортовой и наземной аппаратуры как основа теории и практики разработки и использования оптико-электронных и механических приборов, а также при анализе и оценке получаемого изображения.

Табл. 41, ил. 67, список лит.— 210 назв.

Авторы: В. И. АКОВЕЦКИЙ, Г. Н. ДОНСКОВ, Ю. Н. КОРНЕЕВ, Л. Б. НЕРОНСКИЙ.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга представляет собой систематизированные материалы по радиолокационной фотограмметрии, изданные в СССР и за рубежом, дополненные теоретическими исследованиями в этой области.

Быстрое развитие радиоэлектроники послужило основой для применения современных методов воздушно-космической радиолокационной съемки местности в различных областях народного хозяйства.

Радиолокационная фотограмметрия — это прикладная наука об использовании современных совершенных бортовых радиолокационных систем для целей составления и обновления топографических карт, опознавания объектов местности, определения их координат и высокоточного измерения расстояний между ними.

В настоящей книге уделено основное внимание вопросам фотограмметрической обработки и дешифрирования радиолокационных изображений и в меньшей степени — радиолокационному оборудованию, используемому для получения изображения.

Главное внимание уделяется принципиальным вопросам построения радиолокационной аппаратуры для различных целей, а не техническим элементам самой радиолокационной аппаратуры [86].

В книге собраны материалы, помещенные в советской и иностранной литературе за период 1960—1976 гг., дополненные теоретическими исследованиями авторов в этой области.

Книга написана коллективом авторов под общей редакцией Г. Н. Донскова: глава I написана В. И. Аковецким и Г. Н. Донсковым; § 4 и 5 — В. И. Аковецким и Л. Б. Неронским; § 6, 7, 8, 9 — Л. Б. Неронским; § 10, 12, 13, 23, 24 — В. И. Аको-

вещким и Ю. Н. Корнеевым; § 14, 15, 16, 17 — Ю. Н. Корнеевым; § 18, 19 — В. И. Аковецким и Г. Н. Донсковым; § 20, 21, 22 — Г. Н. Донсковым; § 25, 26, 27 — Ю. Н. Корнеевым.

Настоящая книга — первый опыт создания пособия, содержащего необходимый материал для наземной обработки изображений, получаемых радиолокационной аппаратурой.

§ 1. Введение

Радиолокационной фотограмметрией, или радарграмметрией, называется раздел фотограмметрии, в котором рассматриваются вопросы использования радиолокационных снимков в картографических целях.

Возникновение такого раздела связано со стремлением постоянного и высококачественного исследования внешней среды дистанционными методами. Эти методы предусматривают применение различных технических средств сбора информации об изучаемых объектах. Такими средствами являются аэрофото съемка, инфракрасная, лазерная, телевизионная и радиолокационная съемка местности. Наиболее изученными и совершенными являются аэрофотографические средства. Однако эти средства (как, впрочем и телевизионные, лазерные и инфракрасные) обладают весьма существенным недостатком — большой зависимостью от метеорологических условий. Низкая естественная освещенность весьма затрудняет воздушное фотографирование, а наличие облачности порой не только затрудняет, но и может совсем исключить возможность аэрофотографирования ландшафта.

Как показывают исследования [56], вероятность наличия удовлетворительных погодных условий для выполнения аэрофотосъемки над территорией Северного полушария (табл. 1) весьма мала. Радиолокационная аэросъемка свободна от этой зависимости. Проведение радиолокационной съемки местности возможно как днем, так и ночью, при ясном небе и значительной облачности.

Радиолокационная аэросъемка, кроме того, имеет по сравнению с аэрофотосъемкой следующие преимущества:

- независимость разрешающей способности станции от дальности объекта (принципиально);
- возможность съемки без непосредственного пролета над объектом (на удалении десятков километров);
- большая полоса захвата на местности при малой высоте полета;
- возможность обнаружения объектов по их радиолокационным, а не оптическим контрастам;

Таблица 1

УСРЕДНЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ОБЛАЧНОСТИ ДЛЯ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Страны	Облачность в % ночью			Облачность в % днем		
	январь — июль			январь — июль		
	0-16	2-66	7-106	0-16	2-66	7-106
1	2	3	4	5	6	7
Австрия	23/32	11/19	66/50	20/19	25/31	55/50
Бельгия	22/39	6/16	72/45	6/10	10/21	84/69
Великобритания	20/11	26/21	54/68	13/3	21/18	66/79
Гибралтар	39/76	26/19	35/5	26/61	26/34	48/5
Греция	33/85	26/7	41/4	20/75	23/20	67/5
Дания	16/19	20/19	64/62	9/12	23/25	68/64
Индия	67/10	20/23	13/67	50/3	30/15	20/82
Иордания	39/97	16/3	45/—	10/89	29/6	61/5
Ирак	40/98	24/2	36/—	18/90	21/9	61/1
Иран	33/73	25/19	42/9	12/59	29/31	59/10
Ирландия	18/10	15/21	67/69	8/4	18/12	74/83
Исландия	16/12	17/20	67/68	9/11	28/21	63/68
Испания	38/71	21/16	41/14	22/53	23/27	55/20
Италия	31/67	23/22	46/11	18/44	28/40	54/6
Ливан	3/13	26/14	71/73	—/21	45/29	55/50
Люксембург	19/39	10/24	71/37	16/8	—/34	84/58
Мальта	29/92	46/8	25/—	15/84	51/16	34/—
Нидерланды	21/31	9/18	70/51	15/5	16/31	69/64
Норвегия	16/7	20/15	64/78	6/7	23/22	71/71
Оман	—	—	—	32/48	55/34	13/18
Пакистан	66/40	17/27	17/33	48/30	25/29	27/41
Португалия	24/38	26/27	50/35	15/25	23/33	62/42
Саудовская Аравия	59/69	17/21	24/10	41/62	31/20	28/18
Сирия	36/32	10/15	54/53	26/8	8/9	66/83
Турция	15/77	17/13	68/10	7/52	18/37	75/13
Финляндия	21/16	11/34	68/50	8/4	20/33	72/63
Франция	24/42	15/19	61/39	15/21	28/24	68/55
ФРГ	19/30	7/20	64/50	13/10	10/26	77/64
Швейцария	15/35	7/18	78/47	12/28	4/29	84/43
Швеция	21/19	14/29	65/52	10/5	18/31	72/64
Шри Ланка	40/33	30/32	30/45	13/7	46/30	41/63
Южная Корея	13/92	26/8	61/—	5/83	15/15	80/2
Япония	20/17	14/19	66/64	15/8	14/65	71/77

— возможность передачи полученной информации с борта носителя на наземные пункты по радиоканалу на значительные расстояния.

К преимуществу радиолокационной аэросъемки перед другими видами воздушной съемки следует отнести и тот факт, что радиолокационное изображение, полученное радиолокационной станцией бокового обзора (РЛС БО) на малых высотах имеет проекцию, близкую к ортогональной.

Среди недостатков следует отметить, что радиолокационная аэросъемка имеет относительно низкую разрешающую способность по сравнению с аэрофотосъемкой. Радиолокационная

Таблица 2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ АЭРОСЪЕМКИ

Возможности аэросъемки	Радиолокационная	Инфракрасная	Аэрофото-съемка
Независимость от времени суток	10	10	5
Независимость от облачности	9	2	1
Преодоление атмосферной дымки	10	6	3
Выявление разности температур	1	10	2
Выявление состава почв	3	6	4
Стереоскопичность изображения	5	2	10
Точность изображения	5	6	9
Дешифрируемость изображения	6	6	9
Сумма	49	48	43

аэросъемка по разрешающей способности в настоящее время может быть условно разделена на детальную с разрешающей способностью равной $3 \div 10$ м и общую с разрешающей способностью в сотни метров.

Говоря об особенностях радиолокационной съемки местности, приведем сравнительный анализ различных видов аэросъемки, выполненный специалистами в баллах (табл. 2).

Анализ, приведенный в таблице, показывает потенциальные возможности радиолокационной аэросъемки. Улучшение разрешающей способности и доведение ее до $0,3 \div 3$ м на местности поставит радиолокационные системы в первые ряды дистанционных информационных систем по эффективности их использования для изучения внешней среды и ее ресурсов.

§ 2. Исторический путь развития радиолокационной съемки

Современное состояние радиолокации подготовлено целым рядом открытий и исследований, выполненных учеными разных стран за последние восемьдесят лет.

Назначение радиолокационных систем — обнаружение и определение местонахождения различных объектов радиотехническими методами. В основе разработки новейших радиотехнических средств для этих целей лежат многие оригинальные идеи и исследования, высказанные русскими учеными. Первым в этом списке стоит имя А. С. Попова, который впервые (в 1897 г.) обнаружил и описал свойство радиоволн отражаться от предметов, встречающихся на пути их распространения, т. е. свойство, которое лежит в основе современной радиолокации.

В 1904 г. немецкий инженер Х. Хюльс Майер получил патент на способ обнаружения металлических объектов по отражению ими радиоволн.

В 1907 г. русский профессор Б. Л. Розинг впервые предложил принимать изображения на электронно-лучевую трубку, создав этим основу современных электронно-лучевых индикаторов.

В 1922 г. американские ученые А. Тейлор и Н. Юнг наблюдали нарушение радиосвязи при прохождении корабля между передающей и приемной станциями. Дальнейшие исследования советскими и зарубежными учеными распространения ультракоротких волн над земной поверхностью, успехи в области радионавигации способствовали развитию радиолокации. Работы по созданию радиолокационных станций велись в СССР отдельными группами ученых с начала 30-х годов (П. К. Ощепков, Ю. К. Коровин, Б. К. Шембель и др.).

В 1935 г. английским ученым-исследователем ионосферы Р. Уотсоном-Уаттом были начаты опыты по обнаружению движущихся целей, приведших в 1938 г. к созданию первых в Англии образцов радиолокационной аппаратуры.

В США подобные работы были начаты также в 1935 г.

В годы второй мировой войны радиолокация развивалась столь стремительно, что трудно перечислить все те радиотехнические средства, которые были созданы в этот период в различных странах.

На заре своего развития бортовые радиолокационные станции использовались для общего обзора местности в целях навигации.

Первыми станциями были так называемые индикаторы кругового обзора (ИКО). Разрешающая способность этих станций не позволяла распознавать малоразмерные объекты, применять эти станции для детального изучения подстилающей поверхности и использовать в картографических целях.

В начале 50-х годов появились радиолокационные станции бокового обзора (РЛС БО) с реальной (длинной) вдольфюзеляжной антенной, при этом длина антенны могла достигать 5—17 м, что привело к существенному увеличению (на порядок) разрешающей способности в горизонтальной плоскости. Однако эти станции все же не позволяли получать разрешающую способность изображения, близкую к аэрофотосъемочным системам, а увеличение длины антенны практически ограничивалось длиной фюзеляжа.

В конце 50-х годов появились радиолокационные станции бокового обзора с синтезированной антенной. Это явилось новым существенным шагом в увеличении разрешающей способности станции, близко приближающейся к разрешающей способности фотографических систем. Это позволило применить радиолокационную аэросъемку для картографирования труднодоступных районов в масштабе 1 : 250 000, 1 : 1 000 000 [1, 10, 20, 25, 127, 164].

Полученные в 1963 г. результаты радиолокационной аэросъемки говорят о высокой разрешающей способности примененных при съемке радиолокационных станций. Так, с высоты

полета носителя, равной 21 км, при наклонной дальности 100 км, разрешающая способность оказалась выше 4 м.

Как показали исследования, условия съемки могут изменяться в широких пределах без заметного ухудшения результатов. Так, высота полета может меняться от 60 м до 30 км, а скорость полета от 700 до 3000 км/ч [1, 202].

Процесс развития радиолокационной техники характеризуется тенденцией к укорочению длины применяемой волны. Первые радиолокационные станции работали в диапазоне метровых волн (от 8 до 1,5 м), затем применялись дециметровые и сантиметровые волны. В настоящее время используются миллиметровые волны, которые, однако, имеют ряд ограничений. Стремление к укорочению волны связано с возможностью уменьшения размеров антенной системы и сужения диаграммы направленности, что позволяет получить не только большую дальность при той же мощности, большую разрешающую способность и большую помехоустойчивость, но и большую зависимость от метеорологических условий.

В табл. 3 приведены некоторые характеристики современных станций, применяемых в картографических целях [6].

§ 3. Области применения радиолокационных средств

Специфические особенности радиолокационных средств способствуют привлечению их для решения таких задач, в которых получить необходимую информацию с помощью других технических средств или затруднительно, или совсем не удастся. Это обстоятельство ставит радиолокационные средства в первые ряды дистанционных средств получения информации об окружающей среде и о ее природных ресурсах.

Ниже приводятся основные задачи, которые могут быть решены с помощью радиолокационных средств:

а) картография рассматривает способы создания и обновления топографических карт по радиолокационным изображениям, особенно на труднодоступные районы;

б) геодезия с помощью радиолокационных изображений изучает сушу и водные пространства;

в) геология использует радиолокационные изображения для составления и обновления структурных геологических карт на обширные пространства;

г) сельское хозяйство использует радиолокационные изображения для составления карт распределения посевов, почв, карт землепользования;

д) ледовая разведка использует радиолокационные изображения для точного определения местоположения льдов, разрывов между льдами, границ наводнений и береговой линии, гидрогеологических изысканий.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

01

Название радиолокационной станции	Стабилизация антенны	Длина волны, мм	Длина антенны, м	Ширина картографируемой полосы, км	Ширина первичной фотопленки, мм	Разрешение на местности, м		Масса, кг	Примечание
						вдоль полета	поперек полета		
РРТ (ИКО)	Тангаж, крен	—	6	До 180	35	—	—	—	Ширина вторичной фотопленки может быть до 241 мм
AN/APQ-69 PCA	Тангаж, крен, рыскание, угол сноса	—	17	45—90	—	0,12	—	114	Станция работает при $H < 20\,000$ м
AN/APQ-102 PCA	То же	31	1,27	19; 28; 37; 56 две полосы	127	15	15	196	Горизонтальная поляризация
AN/APS-73 РЛС БО	Тангаж, крен, рыскание, угол сноса	—	1,2	18—55	—	15	15	226	—
AN/APS-85 РЛС БО	—	30	6	от 10 до 80 две полосы	125	100	100	320	Обеспечивает передачу данных на наземный пункт
AN/APS-94A РЛС БО	—	25	5	25—90 две полосы	70	7,7 · R км	30	346	То же
AN/APQ-86 PCA	Тангаж, крен, рыскание, угол сноса	30	1,5	20	—	15	15	193	—
AN/APQ-97 РЛС БО	Полностью стабилизирована	8,6	5	80	230	1,7 · R км	8	—	Двухполяризационная
AN/UPD-1 PCA	Тангаж, крен, рыскание и угол сноса	—	1,5	40	35	10	10	320	Пленка обрабатывается на Земле после посадки носителя
AN/UPD-2 РЛС БО	То же	8,6	3	40, 25+90 две полосы	70	3,5 · R км	15	215	Обеспечивает передачу и запись на Землю через несколько секунд
AN/UPD-10 PCA	Полностью стабилизирована	31	1,5	—	—	<10	<10	—	—
Голографическая РЛС	То же	31	1	—	—	0,076 м	0,018 рад	—	Длина волны 1,78 см
SEASAT-A PCA	—	235	11	100	—	25	25	220	Космическая для океанографических исследований
SPACE SHUTTLE PCA	—	30 250	12	63—100	—	25	50	—	Для многоразового транспортного космического корабля

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

§ 4. Принцип построения РЛС обзора земной поверхности

Получение изображения местности радиолокационными методами основано на том, что при облучении элементов подстилающей поверхности высокочастотной электромагнитной энергией часть энергии отражается (перезлучается) в сторону излучения и может быть принята и зафиксирована соответствующими устройствами. Уровень отраженного сигнала зависит от характера наблюдаемой поверхности, что позволяет дешифровать элементы местности по форме и интенсивности отражения радиоизлучения, фиксируемых на радиолокационном снимке. Для получения этой информации в РЛС должны входить устройства, обеспечивающие генерирование электромагнитных колебаний и их излучение, прием отраженного сигнала, а также регистрацию получаемого радиолокационного изображения.

Принципы действия радиолокационных станций обзора земной поверхности описаны в литературе достаточно подробно [20, 61, 81, 86, 164]. Однако имеет смысл кратко остановиться на них еще раз, чтобы затем более подробно рассмотреть особенности использования этих РЛС для картографирования.

В зависимости от способа обзора поверхности различают панорамные РЛС и радиолокаторы бокового обзора. Принципы их построения во многом близки, различаются лишь способ построения изображения и ряд технических характеристик. Панорамные РЛС обладают значительно худшей разрешающей способностью и точностными характеристиками изображения и менее пригодны для исследования природных ресурсов и целей картографирования по сравнению с РЛС бокового обзора, особенно их современным развитием с использованием принципа синтезированной антенны. Поэтому основное внимание будем уделять РЛС бокового обзора.

Принцип действия РЛС бокового обзора

Принцип действия радиолокационной станции бокового обзора (РЛС БО) можно пояснить на примере функциональной схемы, показанной на рис. 1. Станция размещается на борту

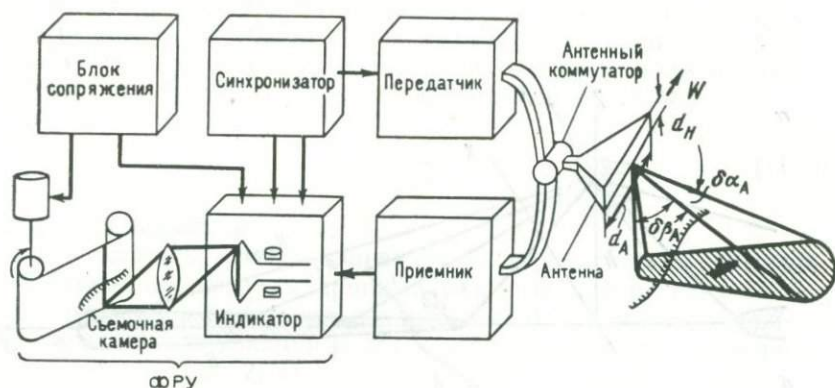


Рис. 1.

самолета или другого летательного аппарата. В ее состав входят передатчик, антенна, антенный коммутатор, приемник, фоторегистрирующее устройство (ФРУ), синхронизатор и блок сопряжения РЛС с навигационной аппаратурой носителя.

В передатчике возбуждается зондирующий сигнал в виде периодической последовательности импульсов электромагнитных колебаний (радиоимпульсов). Обычно это импульсы малой длительности, следующие с определенным периодом повторения, задаваемым синхронизатором*. Зондирующий сигнал через антенный коммутатор (его называют также переключателем «прием — передача») поступает в антенну и излучается в пространство. Антенный коммутатор служит для подключения к антенне передатчика в момент зондирующего импульса, а в остальное время — для подключения антенны ко входу приемника.

В РЛС БО используют антенну с ножеобразным лучом. Ее устанавливают вдоль фюзеляжа самолета таким образом, чтобы плоскость луча была перпендикулярна к линии полета (или расположена под заданным углом) и чтобы луч был направлен вниз к земной поверхности (рис. 2). Часто используют двусторонний обзор вправо и влево относительно линии полета носителя.

При облучении радиоимпульсами земной поверхности или объектов, находящихся на ней, происходит рассеивание элек-

* Иногда для повышения средней мощности зондирующего сигнала в целях увеличения дальности действия РЛС применяют технику сжатия импульсов: излучают длинный широкополосный сигнал с частотной модуляцией внутри импульса. При приеме эти сигналы преобразуются в короткие импульсы. В дальнейшем мы не будем касаться техники сжатия импульсов, отмечая лишь в отдельных случаях специфические особенности аппаратуры с применением этого метода.

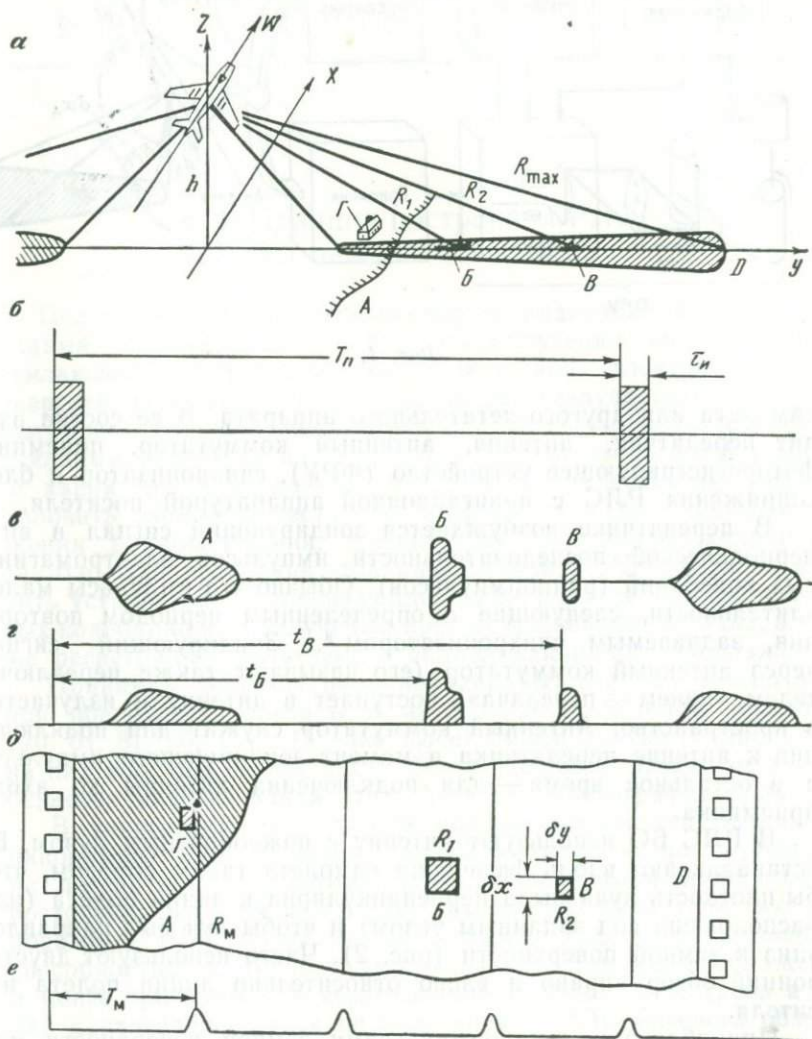


Рис. 2. Геометрия обзора пространства и формирование радиолокационного изображения:

а — геометрия обзора пространства; б — зондирующий сигнал; в — отраженный сигнал; г — огибающая отраженного сигнала; д — радиолокационное изображение; е — калибровочные импульсы; А, Б, В, Г — радиолокационные цели; R_M — метки дальности

ромагнитной энергии и отражение ее в сторону РЛС. Отраженный сигнал от объектов (их называют радиолокационными целями) приходит с задержкой относительно зондирующего импульса на время (t_3) распространения радиоволн

$$t_3 = \frac{2R}{c}, \quad (11.1)$$

где R — дальность до цели;

c — скорость распространения электромагнитной энергии.

Отраженные сигналы принимаются антенной и через антенный коммутатор поступают в приемник. В приемнике отраженные сигналы усиливаются и детектируются — из них выделяется огибающая (рис. 2, z).

Выходной сигнал приемника, несущий информацию об отражающей способности местности (видеосигнал) поступает на индикатор с электронно-лучевой трубкой, входящий в бортовое фоторегистрирующее устройство. Пятно на экране индикатора движется по диаметру от одного края к другому, описывая строку. Начало строки соответствует моменту излучения зондирующего импульса или задержано относительно него на определенное время. В момент прихода отраженного сигнала от цели яркость пятна пропорциональна мощности отраженного сигнала. Изображение экрана индикатора с помощью объектива съемочной камеры проектируется на фотопленку и экспонирует ее.

При каждом излучении зондирующего импульса на фотопленке регистрируется строка, соответствующая ширине зоны облучения антенны. В процессе поступательного движения РЛС по траектории луч антенны последовательно облучает участок земной поверхности в полосе вдоль линии пути и на фотопленке, протягиваемой со скоростью, пропорциональной скорости полета, регистрируется отраженный сигнал от этого участка. После химико-фотографической обработки фотопленки на ней образуется радиолокационное изображение местности.

Протяжкой фотопленки в ФРУ управляет блок сопряжения РЛС с навигационной аппаратурой носителя. Он получает сигналы от измерителя путевой скорости, а также служебную информацию о параметрах полета (курс, высота, время и т. д.), которая может впечатываться на полях кадра для привязки изображения к местности. Кроме этих функций, блок сопряжения может также осуществлять коррекцию изображения, вызванную колебаниями самолета относительно центра масс (в случае жесткого крепления антенны в фюзеляже самолета).

Положение объектов съемки на экране индикатора и на фотопленке однозначно связано с координатами этих объектов относительно летательного аппарата (при отсутствии погрешностей и аппаратурных нестабильностей). Расстояние отметки

объекта от начала развертки y_p определяет наклонную дальность до объекта.

$$R = c \left(\frac{y_p}{V_{рп}} + t_{нач} \right), \quad (11.2)$$

где c — скорость света,

$V_{рп}$ — скорость развертки индикатора вдоль строки,

$t_{нач}$ — время задержки начала развертки относительно зондирующего импульса.

Горизонтальная дальность по поверхности земли вычисляется через наклонную дальность и высоту полета (H)

$$R_r = \sqrt{R^2 - H^2}. \quad (11.3)$$

Изображение на фотопленке в РЛС БО напоминает карту местности. Существенное различие состоит в том, что на экране регистрируется не горизонтальная, а наклонная дальность. Это вносит искажения, особенно при съемке с больших высот: масштаб изображения на малых дальностях резко меняется, а на краю может появиться темная полоса, дальность которой определяется высотой полета. Для исключения этих искажений в индикаторе иногда применяют гиперболическую развертку так, чтобы сохранялась линейность изображения по горизонтальной дальности.

Яркость изображения в каждой точке экрана индикатора определяется мощностью сигнала, отраженного от соответствующего участка местности (или объекта). На уровень мощности влияют свойства отражающей поверхности, условия наблюдения (дальность, угол визирования), а также ряд технических параметров аппаратуры. Подробно влияние этих факторов рассмотрено в следующих разделах.

В синхронизаторе РЛС обычно имеется калибратор дистанции. Он вырабатывает последовательность импульсов, задержанных относительно зондирующего импульса на строго определенных интервалах времени, например, на 33, 333 мкс, что соответствует задержке сигнала на дистанции 5 км. Калибрационные импульсы смешиваются с видеосигналом и поступают на вход индикатора, давая на экране изображения ярких точек. В результате на радиолокационном снимке (при негативной регистрации) образуются тонкие темные линии, соответствующие отсчету дальности через соответствующие интервалы (метки дальности).

Рассмотренная функциональная схема РЛС БО носит иллюстративный характер для пояснения принципа действия РЛС. В реальной аппаратуре имеются также блоки питания, контроля, пульт управления и другие устройства. Возможно также применение радиолинии для передачи видеосигнала на наземные пункты приема. Тогда фоторегистрирующее устройство

устанавливают не на борту, а на земле. Возможны и другие варианты построения РЛС БО, например, с покадровой регистрацией, однако они не имеют принципиальных отличий.

Основные технические параметры РЛС БО

Рассмотрим основные параметры РЛС БО, которые оказывают существенное влияние на информативность радиолокационного изображения.

Рабочая длина волны определяется несущей частотой колебаний, возбуждаемых в передатчике. На практике РЛС землесбора могут работать в широком диапазоне волн от долей сантиметра до десятков сантиметров. Влияние длины волны сказывается на характеристиках отражения радиоволн от местности (см. § 5).

Разрешающая способность на местности является одним из важнейших параметров РЛС, характеризующих информативные свойства радиолокационного изображения. Разрешающая способность определяется разрешением по наклонной дальности и вдоль линии пути. Поскольку интервалы разрешения вдоль и поперек радиолокационного снимка могут различаться, то говорят о разрешении на местности поперек линии пути (по горизонтальной дальности) и вдоль линии пути (по путевой дальности).

Разрешение поперек линии пути связано с разрешением станции по наклонной дальности и углом наблюдения

$$\delta Y = \frac{\delta R}{\cos \beta}, \quad (II.4)$$

где δR — разрешение по наклонной дальности,
 β — угол наблюдения, отсчитываемый от горизонтальной плоскости.

Разрешение по наклонной дальности в первую очередь определяется длительностью зондирующего импульса (влияние остального тракта РЛС пока не рассматриваем, см. § 9)

$$\delta R = \frac{c\tau_n}{2}, \quad (II.5)$$

где τ_n — длительность зондирующего импульса,
 c — скорость света.

Разрешение вдоль линии пути зависит от ширины луча антенны РЛС в горизонтальной плоскости

$$\delta \alpha_A = \frac{\lambda}{d_A}, \quad (II.6)$$

где λ — длина волны РЛС,
 d_A — горизонтальный раскрыв антенны.



3011

Линейное разрешение вдоль линии пути (по путевой дальности) ухудшается пропорционально наклонной дальности цели

$$\delta X = R \delta \alpha_A = \frac{R \cdot \lambda}{d_A}. \quad (II.7)$$

Для современных РЛС БО разрешение на местности может составлять десятки и даже сотни метров. Оно, в основном, определяется возможностью реализации разрешения по путевой дальности, которое ограничивается габаритами (горизонтальным размером) антенны, размещаемой на летательном аппарате. Так, например, при длине волны РЛС $\lambda = 2$ см, размере антенны $d_A = 3$ м и наклонной дальности цели $R = 15$ км разрешение по линии пути составляет $\delta X = 100$ м.

В ряде случаев для описания процесса на выходе системы, например, определения экспозиции фотопленки при наблюдении объектов сложной формы, знание только разрешающей способности системы недостаточно и необходимы более детальные характеристики. К ним относится аппаратурная функция системы, характеризующая зависимость мощности выходного процесса от координат на местности при наблюдении одиночной малоразмерной (точечной) цели. При этом тракт РЛС принимают линейным.

Если не рассматривать влияние всего тракта РЛС, то аппаратурная функция по наклонной дальности определяется формой зондирующего импульса и для прямоугольного импульса имеет вид

$$H(\Delta R) = \begin{cases} 1 & -\frac{c \cdot \tau_n}{4} < \Delta R < \frac{c \cdot \tau_n}{4}, \\ 0 & \Delta R < -\frac{c \cdot \tau_n}{4}, \Delta R > \frac{c \cdot \tau_n}{4}, \end{cases} \quad (II.8)$$

где $\Delta R = R - R_{ц}$ — смещение точки наблюдения по наклонной дальности.

Аппаратурная функция по путевой дальности определяется формой диаграммы направленности антенны РЛС, которая в простейшем случае, когда используется антенна с равномерным синфазным распределением поля по раскрытию имеет вид

$$G(\alpha) = \left(\frac{\sin \frac{\pi \cdot d_A \cdot \alpha}{\lambda}}{\frac{\pi \cdot d_A \cdot \alpha}{\lambda}} \right)^2, \quad (II.9)$$

где λ — длина волны РЛС,
 d_A — горизонтальный раскрыв антенны.

При формировании аппаратурной функции диаграмма антенны учитывается дважды — на передачу и на прием

$$H(\Delta X) = G^2(R \cdot \alpha) = \left(\frac{\sin \frac{\pi \cdot d_A}{R \cdot \lambda} \Delta X}{\frac{\pi \cdot d_A}{R \cdot \lambda} \Delta X} \right)^4, \quad (\text{II.10})$$

где $\Delta X = X - X_{ц}$ — смещение точки наблюдения по линии пути;
 R — дальность цели.

Разрешающая способность системы является числовой характеристикой аппаратурной функции системы, обычно равная ее ширине на уровне 0,5 относительно максимума. Для рассмотренных аппаратурных функций разрешение по наклонной дальности составляет $\delta R = \frac{c \cdot \tau_{ш}}{2}$, а по путевой дальности $\delta X = 0,64 \frac{R \cdot \lambda}{d_A}$, в отличие от приближенного выражения (II.7).

Кроме аппаратурной функции можно рассматривать также частотную характеристику системы, аналогично частотно-контрастным характеристикам для оптической и телевизионной аппаратуры.

Аппаратурная функция системы формируется при последовательном прохождении сигнала от цели через все звенья тракта РЛС. Если звеньев в тракте достаточно много, то форма аппаратурной функции приближается к колоколообразной и расчет разрешения значительно упрощается (см. § 9).

Зона обзора определяет ширину участка вдоль линии пути, который регистрируется на радиолокационном снимке. Зона обзора определяется энергетическим потенциалом РЛС и числом элементов разрешения, воспроизводимых на экране индикатора (порядка 2—4 тысяч). Практически зона обзора РЛС БО составляет 20—100 км.

Энергетический потенциал РЛС определяет условия обнаружения целей на радиолокационном изображении. Он зависит от многих параметров РЛС — мощности передатчика, усиления антенны, чувствительности приемника. Влияние энергетического потенциала РЛС БО на характер изображения рассматривается в § 6.

Поляризация антенны характеризует направление в пространстве вектора электрического поля электромагнитных колебаний. В РЛС землеобзора обычно используют плоскополяризованное поле с вертикальной или горизонтальной поляризацией. Обычно передающая и приемная антенны совмещены, как это было рассмотрено в функциональной схеме РЛС, представленной на рис. 2 (здесь антенна имеет вертикальную поляризацию). Тогда поляризация при приеме соответствует поляризации излучения. Возможен случай более сложного

построения РЛС, например, двухканального, когда в нее добавляется еще один приемный канал с антенной, имеющей ортогональную поляризацию по отношению поляризации излучения.

Влияние поляризации излучения и приема сказывается на уровне отраженного сигнала от различных подстилающих поверхностей и объектов (см. § 5).

Радиолокационные станции бокового обзора являются эффективным средством исследования земной поверхности. К их достоинствам относятся сравнительная простота, высокое качество и информативность изображения (по сравнению с панорамными РЛС). Некоторым недостатком РЛС БО является однократное получение изображения без перекрытия, как в щелевых аэрофотоаппаратах. Это затрудняет стереоскопическую обработку снимков и исправление по снимкам погрешностей внешнего ориентирования. Указанный недостаток может быть исправлен установкой на борту двухлучевой РЛС с косоугольным обзором (один луч направлен вперед, а другой назад относительно перпендикуляра к линии полета) [74]. Антенны, формирующие эти лучи, могут иметь разную поляризацию, что позволяет получить дополнительную информацию о поляризационных характеристиках подстилающей поверхности.

Существенным недостатком РЛС БО является то, что по разрешающей способности они значительно уступают аэрофотоаппаратам, ибо для получения сравнимого с ними разрешения антенна РЛС должна иметь длину, равную сотням метров. Естественно, что установить такую антенну на самолете не представляется возможным.

Дальнейшим совершенствованием методов бокового обзора является применение принципа синтезированной антенны. Он позволяет значительно улучшить разрешение по линии пути и сделать его одинаковым по всему полю снимка. В целом качество изображения радиолокаторов с синтезированной антенной (РСА) приближается к качеству аэрофотоснимков, что делает эти средства наиболее эффективными для картографирования и исследования природных ресурсов.

Принцип построения РСА

Принцип синтезирования можно пояснить на следующем примере (рис. 3). Выше было отмечено, что ширина луча диаграммы антенны обратно пропорциональна ее раскрытию. Так, для антенны с горизонтальным раскрытием d_A и вертикальным раскрытием d_H ширина луча в вертикальной плоскости составляет $\Delta\beta_A \approx \frac{\lambda}{d_H}$, а в горизонтальной плоскости $\Delta\alpha_A \approx \frac{\lambda}{d_A}$. Такую вытянутую ан-

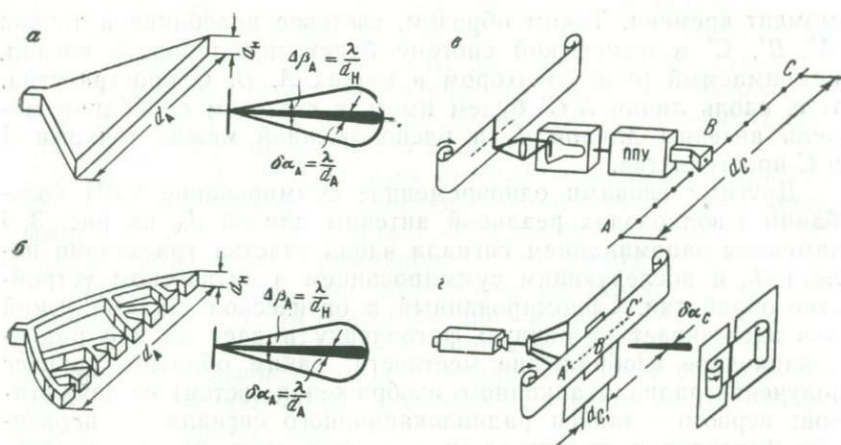


Рис. 3. Принцип построения РСА:

a — синфазная антенна и ее диаграмма направленности; *б* — синфазная антенна, составленная из элементарных отражателей; *в* — бортовая аппаратура РСА; *г* — оптическая обработка информации, ППУ — приемно-передающее устройство

тенну можно заменить набором маленьких антенн, показанных на рис. 3, *б* и питаемых высокочастотными колебаниями с одной и той же фазой (длина пути от общего волновода до каждой антенны должна быть одинаковой). Диаграммы такой расчлененной и нерасчлененной антенн будут совпадать. Принцип синтезирования состоит в том, что на самолете устанавливается малая антенна, приемопередатчик делается когерентным*, способным определять не только огибающую, но и фазу отраженного сигнала. Сигнал с выхода приемника соответствует уже не амплитуде отраженного сигнала, а произведению амплитуды $a_{ц}$ на косинус фазы $\varphi_{ц}$

$$U_c = a_{ц} \cdot \cos \varphi_{ц}. \quad (\text{II.11})$$

Этот сигнал подается на индикатор и регистрируется на фотопленке (первичной, находящейся на борту самолета). Картина, записанная на первичной пленке, не будет давать изображения местности, а будет его голограммой. Для получения радиолокационного изображения местности первичную пленку помещают в оптическое устройство обработки, где она, освещенная плоским световым пучком от лазера, передаст в световое колебание, прошедшее первичную фотопленку, амплитуду и фазу сигнала, принятого антенной радиолокатора в соответствующий

* В отличие от обычных РЛС БО, в которых используются излучение и прием некогерентных сигналов.

момент времени. Таким образом, световое колебание в точках A', B', C' в оптической системе будет моделировать сигнал, принимаемый радиолокатором в точках A, B, C пространства, т. е. вдоль линии $A'C'$ будем иметь в световом колебании модель антенны длиной d_c и расположенной между точками A и C пространства.

Другими словами одновременное суммирование СВЧ колебаний в волноводах реальной антенны длиной d_A на рис. 3, б заменяем запоминанием сигнала вдоль участка траектории полета d_c и последующим суммированием в оптическом устройстве обработки. Сформированный в оптической системе узкий луч засвечивает вторичную фотопленку и дает на ней радиолокационное изображение местности. Таким образом, процесс получения радиолокационного изображения состоит из двух этапов: первого — записи радиолокационного сигнала на первичную фотопленку, протягиваемую со скоростью, пропорциональной путевой скорости самолета, и второго этапа — в оптической обработке информации, записанной на первичной пленке, и преобразовании ее в изображение местности; при этом первичная и вторичная пленки протягиваются со скоростями, отношение которых определяется масштабами преобразований. Этот процесс может происходить либо на борту самолета, либо на земле. Естественно, что в последнем случае должны выполняться и промежуточные операции: доставка первичной пленки на наземное устройство обработки, а также химико-фотографическая обработка первичной и вторичной фотопленки.

Разрешающая способность РСА по линии пути определяется не раскрытием реальной антенны, установленной на самолете, а длиной синтезирования. Она равна (угловое разрешение)

$$\delta\alpha_c = \frac{\lambda}{2d_c}. \quad (\text{II.12})$$

Это выражение отличается от выражения для обычной антенны (II.6) множителем 2 в знаменателе. Множитель объясняется тем, что при формировании луча обычной антенны разность фаз сигналов, принимаемых элементами антенны по ее раскрытию от какой-нибудь точечной цели, зависит от расстояния между этой целью и данным элементом. В синтезированной антенне в каждом положении самолета сигнал проходит от антенны до цели и обратно от цели до антенны, в результате чего он получает двойной фазовый набег.

Линейное разрешение РСА по путевой дальности определяется длиной синтезированной антенны и наклонной дальностью

$$\delta X = \frac{R \cdot \lambda}{2d_c}. \quad (\text{II.13})$$

Длина синтезированной антенны определяется шириной окна (апертуры) в оптическом устройстве обработки*. Окно может быть сделано различной ширины пропорционально дальности. Тогда будет обеспечена независимость линейного разрешения по путевой дальности от значения наклонной дальности. Это является одним из преимуществ РСА.

К недостаткам РСА следует отнести сложность аппаратуры, а также повышенную по сравнению с обычными (некогерентными) РЛС БО зернистость изображения, вызываемую случайным характером отраженного от местности сигнала.

Следует отметить, что оптическая обработка не является единственным методом синтеза антенны. Может, например, применяться обработка с помощью электронных методов или цифровых вычислительных машин, при этом радиолокационное изображение может получаться в темпе получения информации в процессе полета.

В зависимости от способа построения аппаратуры в РСА может реализоваться полная — оптимальная обработка принимаемого сигнала (тогда говорят о фокусированной синтезированной антенне) или упрощенная обработка (нефокусированная РСА). В последнем случае может быть реализовано разрешение по линии пути не лучше, чем $\delta X = \sqrt{R\lambda}$. Различие между фокусирующим и нефокусирующим режимом более подробно рассмотрено в § 7.

Одной из разновидностей РЛС, использующих методы синтеза диаграммы направленности антенны, являются голографические РЛС [159]. Разрешение вдоль линии пути у этих станций создается таким же образом, как в РСА. Разрешение поперек пути образуется не за счет излучения коротких импульсов и селекции отраженных сигналов по времени их запаздывания, а путем использования непрерывного излучения и многоканальной фазиремкой антенной решетки.

Фазиремкая решетка представляет собой многоэлементную антенну такую, как показана на рис. 3, б, но помещенную поперек пути и направленную вниз. Каждый из элементарных рупоров этой антенны подсоединен не к общему волноводу, а ко

* Наилучшее разрешение, которое может обеспечить РСА, будет в том случае, если окно в оптической системе соответствует длительности всего сигнала, принимаемого антенной РЛС, т. е. когда длина синтезированной антенны равна разрешению некогерентной РЛС

$$\alpha_c = \delta X = \frac{R\lambda}{d_A}.$$

Величина предельного разрешения РСА составит

$$\delta X_c = \frac{R\lambda}{2d_c} = \frac{d_A}{2},$$

что на практике может составлять единицы метров.

входу приемника, аналогичного применяемому в РСА. Сигнал с выхода каждого приемника подается на запоминающее устройство, например, на однострочный индикатор, периодически опрашивающий все приемники и регистрирующий сигнал на первичной фотопленке.

В процессе полета РЛС на фотопленке регистрируется голограмма радиолокационного изображения. При обработке ее в оптическом устройстве происходит синтезирование вдоль и поперек пути. При этом построение изображения оказывается таким же, как при съемке местности с помощью щелевого фотоаппарата: изображение представляет собой центральную проекцию и полоса обзора размещается непосредственно под летательным аппаратом.

Разрешающая способность голографических РЛС вдоль линии пути определяется длиной синтезированной антенны (II.13), а поперек пути — размером фазированной решетки d_ϕ и углом визирования β' относительно вертикали

$$\delta\beta'_\phi = \frac{\lambda}{d_\phi \cos \beta'} \quad (II.14)$$

Разрешение поперек пути на местности равно

$$\delta Y = \frac{\lambda H}{d_\phi \cos^2 \beta'} \quad (II.15)$$

Преимуществом голографических РЛС является обзор пространства непосредственно под летательным аппаратом. К недостаткам голографических РЛС следует отнести относительно невысокое разрешение поперек пути (ограниченное размером антенной решетки) и большую сложность аппаратуры даже по сравнению с РСА*. Поэтому эти РЛС пока не получили распространения и мы в дальнейшем не будем на них останавливаться.

§ 5. Характеристика объектов радиолокационной съемки

К объектам радиолокационной съемки, представляющим интерес для целей землеобзора, относятся рельеф земной поверхности, растительный покров, элементы гидрографии, сельскохозяйственные угодья, населенные пункты, инженерные сооружения, постройки, дороги и другие объекты, обнаружение и опознавание которых на радиолокационном снимке дает полезную информацию для картографирования и исследования при-

* Следует иметь в виду, что число элементов разложения выходного изображения поперек пути соответствует числу каналов фазированной антенной решетки, поэтому для получения изображения с четкостью, например, 600 элементов, как в телевидении, нужно иметь систему из 600 антенн и приемников.

родных ресурсов. Все эти объекты носят название радиолокационных целей.

Основной фактор, определяющий воздействие данной цели на тракт РЛС и, в первую очередь, энергию принимаемого сигнала,— это отражательная способность цели, характеризующая свойство переизлучать большую или меньшую долю падающей на нее электромагнитной энергии. При облучении радиоволной какого-либо объекта в нем наводятся электрические токи, создающие в свою очередь электромагнитное поле, распространяющееся в направлении РЛС. Радиоволны, как всякое электромагнитное поле, имеют векторные свойства, которые характеризуются поляризацией, определяющей направление векторов электрического и магнитного полей в пространстве.

Параметры отраженного поля, его энергетические, фазовые и поляризационные характеристики определяются многими факторами: размерами, конфигурацией, электрическими характеристиками (диэлектрической постоянной, затуханием) объекта или его элементов, расположением относительно направления облучения, а также параметрами РЛС — длиной волны, излучаемой мощностью, поляризацией передающей антенны и т. д.

Для учета поляризационных свойств целей их в общем случае характеризуют матрицей рассеяния [46, 48], которая описывает преобразование амплитуды, фазы и поляризации волны, облучающей цель. Однако в практических случаях цели определяют только энергетическими характеристиками — эффективной площадью рассеяния (ЭПР). ЭПР является количественной мерой отношения плотности мощности сигнала, рассеянного в направлении приемника, к мощности излученных СВЧ электромагнитных волн, падающих на цель при заданных поляризациях передающей и приемной антенн. Следует отметить, что реальные цели при облучении их под разными углами могут дать различную энергию отражения. Это вызывает флюктуации принимаемого сигнала. Тогда говорят о средней ЭПР и об уровнях ее флюктуаций.

По характеру воздействия на тракт РЛС и по методу определения ЭПР радиолокационные цели удобно разделить на простые (элементарные) и сложные. К элементарным целям относятся простейшие геометрические конструкции: металлический шар, цилиндр, лист, вибратор, уголкового отражатель. Их ЭПР может быть посчитана аналитически по формулам. Так, например, для металлической сферы диаметром, много большим длины волны, эффективная площадь рассеяния равна площади поперечного сечения сферы

$$S_{\text{эф}} = \pi a^2, \quad (\text{II.16})$$

где a — радиус сферы.

Из элементарных целей наиболее важны уголкового отражатели, которые могут служить радиолокационными ориентирами и эталонными объектами для измерения разрешающей способности РЛС и калибровки чувствительности ее тракта. С этой целью оборудуются целые измерительные полигоны [61]. Использование для оборудования полигонов уголкового отражателей очень удобно, так как они при относительно небольших размерах имеют большую ЭПР, мало зависящую от направления облучения. Это свойство объясняется тем, что при изменении угла падения лучей в больших пределах отражение происходит почти строго в обратном направлении.

Применяются два типа уголкового отражателей: с треугольными (рис. 4) и квадратными гранями. Предпочтительнее первые, так как они требуют меньшей точности изготовления и имеют равномерную диаграмму отражения в большем угле. Эффективная площадь рассеяния уголкового отражателя с треугольными гранями вычисляется по формуле

$$S_{эф} = \frac{4}{3} \pi \frac{a^4}{\lambda^2}, \quad (II.17)$$

где a — длина грани,
 λ — длина волны РЛС.

К сложным целям относятся большинство реальных объектов. Их эффективная отражающая площадь может быть определена только экспериментально и задана статистически, так как отраженный ими сигнал меняется при малейшем случайном перемещении элементов их конструкции относительно РЛС. Сложные цели могут быть точечные, групповые и распределенные.

Точечные цели — это такие, линейные и угловые размеры которых значительно меньше элемента разрешения РЛС на местности, например, опоры линий электропередач, мелкие суда на воде, автомашины и т. д. Групповые цели соизмеримы с элементом разрешения РЛС или занимают несколько элементов. Это здания, крупные корабли, мосты. Распределенные цели имеют однородную отражающую способность в пределах некоторого участка, это — луга, поля, леса, водная поверхность, ледовые поля, дороги, просеки и т. п.

При наблюдении идеальной гладкой поверхности раздела двух сред происходит зеркальное отражение радиоволн от поверхности и преломление луча внутрь второй поверхности (рис. 5).

Радиолокатор будет принимать сигнал, отраженный от идеальной поверхности раздела только в том случае, если она перпендикулярна линии визирования. Иначе происходит зеркальное отражение в сторону от РЛС.

В реальных условиях протяженные объекты радиолокационной съемки отличаются от идеальной ровной плоскости и

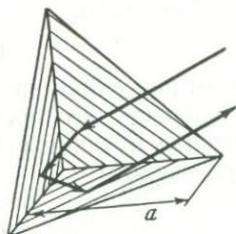


Рис. 4. Эталонный уголкового стражатель с треугольными гранями

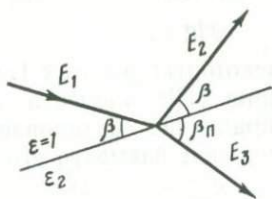


Рис. 5. Геометрия отражения лучей от поверхности раздела двух сред с разными диэлектрическими постоянными:

E_1 — падающая волна; E_2 — отраженная волна; E_3 — преломленная волна

представляют собой шероховатые поверхности. Шероховатость характеризуют величиной неровности h — уклонения от идеальной плоскости. Если величина неровностей мала по сравнению с длиной волны РЛС (удовлетворяется условие Релея), то поверхность будет характеризоваться зеркальным отражением

$$h \leq \frac{\lambda}{16 \sin \beta}, \quad (\text{II.18})$$

где λ — длина волны РЛС,

β — угол наблюдения, отсчитываемый от горизонтальной плоскости (угол скольжения).

Поскольку длина волны в РЛС землеобзора обычно велика, зеркальное отражение происходит от сравнительно гладких поверхностей, таких, как спокойная водная поверхность, асфальтовые (бетонированные) дороги, взлетные полосы аэродромов и т. д. При реальных углах наблюдения, отличных от 90° , такие объекты не дадут отражения в сторону РЛС и соответственно мощность сигнала в приемной антенне будет равна нулю.

Большинство подстилающих поверхностей имеют неровности, соизмеримые или превышающие длину волны РЛС. Они дают диффузное (рассеянное) отражение во все стороны, в том числе и в направлении РЛС.

Отражающую способность подстилающей поверхности характеризуют коэффициентом рассеяния, который представляет собой удельную эффективную площадь рассеяния — отношение ЭПР элемента разрешения на местности $S_{\text{эф}}$ к значению его геометрической площади

$$\sigma^{\circ} = \frac{S_{\text{эф}}}{S_{\text{геом}}} = \frac{S_{\text{эф}}}{\delta X \delta Y}, \quad (\text{II.19})$$

где δX , δY — линейное разрешение РЛС по координатам на местности.

Обычно удельную ЭПР выражают в децибеллах (дБ):

$$\sigma_{\text{дБ}}^{\circ} = 10 \lg \sigma^{\circ}. \quad (11.20)$$

В некоторых работах [75] коэффициентом рассеяния называют отношение ЭПР элемента разрешения к площади его проекции на направление визирования (во избежание путаницы будем в дальнейшем называть его показателем рассеяния)

$$\gamma = \frac{S_{\text{эф}}}{\delta X \delta Y \sin \beta} = \frac{\sigma^{\circ}}{\sin \beta}, \quad (11.21)$$

где β — угол наблюдения (скольжения).

Показателем рассеяния γ удобно определять поверхности, близкие по своему характеру к идеально шероховатой поверхности, для которой рассеяние подчиняется закону Ламберта, тогда $\sigma = \sigma_{\text{max}}^{\circ} \sin^2 \beta$ и $\gamma = \sigma_{\text{max}}^{\circ} \sin \beta$. Показатель рассеяния также обычно выражают в децибеллах.

Удельная отражающая способность природных объектов определяется как физическими свойствами их поверхности (и близких к поверхности слоев), так и параметрами аппаратуры. К физическим свойствам поверхности относятся ее шероховатость и комплексная диэлектрическая проницаемость (диэлектрическая постоянная и проводимость). В свою очередь эти характеристики зависят от структуры поверхности, ее вещества, а также содержания влаги.

К параметрам аппаратуры, влияющим на значение удельной ЭПР, относятся длина волны РЛС, поляризация передающей и приемной антенн, направление излучения по углам места и азимуту.

На рис. 6—15 приведены характерные зависимости, иллюстрирующие влияние свойств подстилающей поверхности и параметров аппаратуры на отражающую способность (более подробные данные см., например, [75]). Рассмотрим влияние этих факторов.

Угол наблюдения

Влияние угла наблюдения на уровень отраженного сигнала определяется степенью шероховатости поверхности. Гладкие поверхности — бетон, асфальт, гравий (рис. 6) характеризуются резкой зависимостью мощности отраженного сигнала от угла наблюдения: показатель рассеяния γ может меняться на 10—15 дБ при изменении угла в пределах 10—60°, что соответствует изменению удельной ЭПР или мощности отраженного сигнала на 18—23 дБ (предполагается, что разрешение РЛС не зависит от угла наблюдения). Аналогичный характер имеет угловая зависимость отражения от пашни, песчаной и холмистой пустыни и снежного покрова (рис. 7, 8). Отражения от травяного покрова в 8-мм диапазоне характеризуются зави-

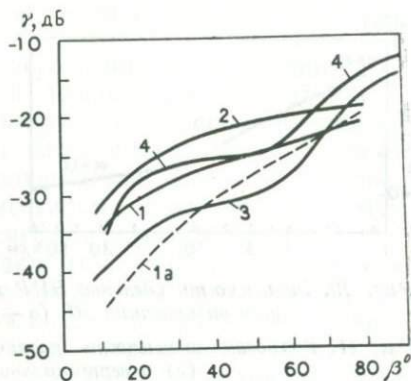
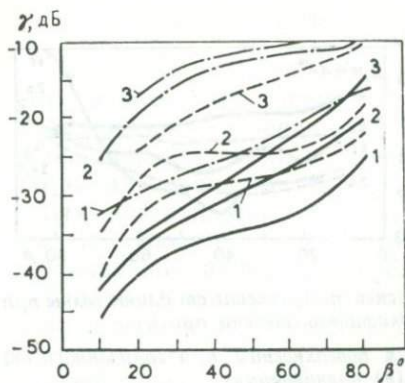


Рис. 6. Зависимость показателя рассеяния γ от углов визирования для гладких поверхностей в различных диапазонах волн (поляризация горизонтальная): гладкого бетона (сплошные линии), гладкого асфальта (пунктир), гравия (штрих-пунктир); 1 — диапазон 3 см; 2 — диапазон 2 см; 3 — диапазон 8 мм

Рис. 7. Зависимость показателя рассеяния γ от угла визирования в трехсантиметровом диапазоне волн для гладких и шероховатых поверхностей:

1 — асфальт (вертикальная поляризация); 1а — асфальт (горизонтальная поляризация), 2 — пашня; 3 — песчаная пустыня; 4 — холмистая пустыня с растительностью. Для кривых 2—4 вертикальная и горизонтальная поляризация имеют близкие значения γ

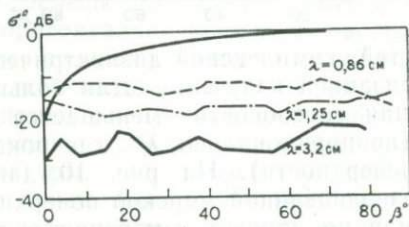
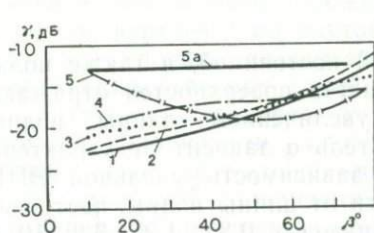


Рис. 8. Зависимость показателя γ от угла в 2-см диапазоне волн для снежного покрова и травы (поляризация вертикальная):

1 — снежный покров толщиной 10 см, содержание воды 171 г/дм³, температура -7°C ; 2 — бурьян (ноябрь); 3 — снег со следами колес, температура -7°C ; 4 — снег с тонкой коркой, содержание воды 155 г/дм³, температура -14°C ; 5 — зеленая трава высотой 5 см (5а — отражение от травы в 8,6-мм диапазоне)

Рис. 9. Зависимость удельной ЭПР лесистой местности от угла наблюдения для различных диапазонов волн, плавная кривая соответствует $\gamma = \text{const}$

симостью $\gamma = \text{const}$. Более «шероховатые» поверхности, например лесистая местность, имеют почти изотропное отражение — их удельная ЭПР σ° практически не зависит от угла наблюдения (рис. 9).

Длина волны РЛС

На прием отраженных сигналов большое влияние оказывает выбор частоты излучения или длины волны РЛС [119]. Зависимость от длины волны связана с шероховатостью поверхно-

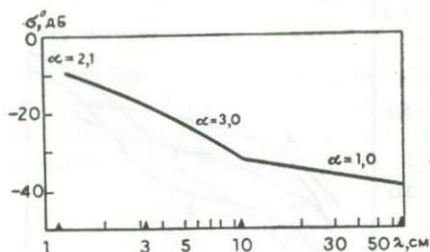


Рис. 10. Зависимость удельной ЭПР морской поверхности от длины волны при угле визирования 50° (α — показатель степени при λ)

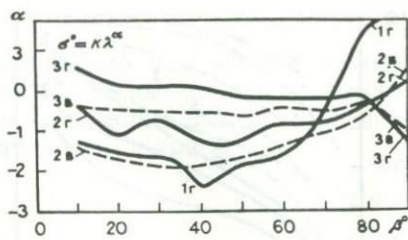


Рис. 11. Волновая зависимость различных поверхностей при горизонтальной (г) и вертикальной (в) поляризациях:

1 — взволнованная морская поверхность (диапазон волн 0,86—71 см); 2 — лес (диапазон волн 3—20 см); 3 — городская застройка (диапазон волн 2—3 см)

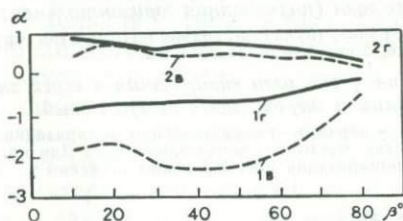


Рис. 12. Волновая зависимость отражения от травы (1) и снега (2) при горизонтальной (г) и вертикальной (в) поляризациях (диапазон волн 1,25—3 см)

стей, комплексной диэлектрической постоянной, а также поляризацией излучения. Для большинства поверхностей отражающая способность уменьшается с увеличением длины волны (пропорционально λ^α , где показатель α зависит от характера поверхности). На рис. 10 дана зависимость удельной ЭПР взволнованной морской поверхности от длины волны, построенная по данным измерения в диапазонах 0,86; 1,25; 3,2; 10 и 70 см (отмечено на рисунке по оси λ). На рис. 11, 12 показаны значения показателя степени α при λ для различных поверхностей при горизонтальной и вертикальной поляризации в зависимости от угла визирования. Следует отметить, что в отличие от других поверхностей снег имеет возрастающую зависимость отражающей способности от длины волны (рис. 12), отражающая способность застроенной территории практически не зависит от длины волны.

В общем случае величина удельной ЭПР растет с увеличением частоты излучаемых сигналов (уменьшением длины волны). Это положение справедливо для любого типа земной или водной поверхности. Исключением являются случаи земной поверхности с травяным покровом и местность, покрытая торфяными болотами в летнее время, для которых σ^0 на волне 1,25 см ниже, чем на волне 3,2 см, что объясняется сильным поглощением электромагнитной энергии с длиной волны 1,25 см водяными парами.

Мощность сигнала, попадающего в приемную антенну РЛС для данного типа подстилающей поверхности зависит как от поляризации излучения, так и взаимного направления поляризаций при излучении и приеме. Если поляризации излучения и приема совпадают, то для большинства достаточно шероховатых поверхностей (пашня, местность, покрытая растительностью) уровни отраженного сигнала для горизонтальной и вертикальной поляризации близки (см. рис. 7). Исключения составляют гладкие поверхности (бетон, асфальт, гравий, спокойная водная поверхность). Для них, особенно в более длинноволновом диапазоне (3 см и более), отраженный сигнал при горизонтальной поляризации меньше, чем при вертикальной (до 16 дБ при малых углах скольжения).

Влияние поляризации сказывается на подчеркивании контрастов объектов, протяженных по длине в направлении, совпадающем с направлением поляризации. Так, при вертикальной поляризации подчеркиваются контрасты объектов, протяженных по высоте, опоры линий электропередач, деревья (особенно ель), волнение моря и т. д. При горизонтальной поляризации могут дать интенсивный сигнал провода линий электропередач или железнодорожные рельсы при соответствующем ракурсе, деревья с вытянутой горизонтально кроной. В частности, это явление позволяет на радиолокационных снимках различать лиственные и хвойные породы леса.

Кроме случаев передачи и приема излучений при одной и той же поляризации, горизонтальной или вертикальной, возможно такое построение аппаратуры, когда передачу выполняют при одной поляризации, а прием при другой (кроссполяризация). В кроссполяризованном канале уменьшается отраженный сигнал от гладких поверхностей и подчеркиваются контрасты различных поверхностных особенностей (вид дороги, участка лавы, осадочных пород и т. д.) [139].

В общем случае коэффициент рассеяния σ° земной и водной поверхности при вертикальной поляризации выше, чем при горизонтальной и перекрестной. Особенно сильно это различие проявляется при малых углах наклона и при гладких поверхностях.

При малых углах наклона значение σ° морской поверхности может быть на 22 дБ выше, чем при горизонтальной, в случае спокойного моря. Эта разность постепенно уменьшается с увеличением волнения морской поверхности и угла наклона и практически исчезает при скоростях ветра 28—37 км/ч и углах наклона от 60 до 90°.

Состояние и характеристики земной и водной поверхности

Данные, полученные в результате измерений отражательной способности, свидетельствуют о том, что характер измененной удельной ЭПР σ° для суши резко отличается от характера измененной σ° для водной поверхности, так как в последнем случае сильно сказывается наличие зеркального отражения, особенно при углах наклона, близких к нормали.

Основным фактором, определяющим величину радиолокационного отражения от суши, является, как уже указывалось, «шероховатость» земной поверхности. Поэтому в ходе экспериментов все типы земной поверхности часто разбиваются на две группы: гладкая поверхность и «шероховатая» поверхность.

Гладкая поверхность имеет непрерывную однородную структуру, у которой величина среднеквадратических отклонений от плоскости («шероховатость») гораздо меньше длины волны излучаемого сигнала. К гладким типам поверхности относятся, например, шоссе с асфальтовым или бетонным покрытием.

К шероховатым поверхностям относится местность с различным растительным покровом, у которой среднеквадратическое значение отклонений от плоскости может быть в несколько раз больше длины волны. Для гладкой поверхности ясно видна разница между отражениями при вертикальной и при горизонтальной поляризации, а также тенденции к быстрому увеличению мощности отраженного сигнала с увеличением угла наклона. Для шероховатой поверхности оказывается, что показатель рассеяния γ практически не зависит ни от направления поляризации, ни от угла наклона: чем больше шероховатость, тем выше γ .

Наиболее удобным методом выявления характера зависимости радиолокационного отражения от диэлектрической постоянной поверхности суши является анализ данных об отражении в разные времена года. Для местности, покрытой обычной растительностью, например травой, значение γ весной может достигать — 3 дБ, а зимой падать до 18 дБ (рис. 13). Это объясняется изменением содержания воды в растительности и свидетельствует о том, что γ не зависит от высоты травы. Влага на поверхности с растительным покровом приводит к увеличению γ на 3 дБ. Это объясняется увлажнением растений от капель влаги. Вода на гладкой поверхности приводит при малых углах наклона к снижению значений γ примерно на 10 дБ. Влияние воды на гладкой поверхности на изменение γ обусловлено двумя факторами: изменением диэлектрической постоянной поверхности земли и тем, что поверхность, покрытая водой, становится более гладкой.

На рис. 14 иллюстрируется влияние влажности почвы на коэффициент рассеяния [132]. Измерения проводились на двух

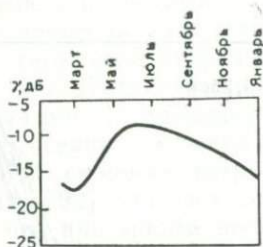


Рис. 13. Сезонное изменение отражающей способности травы в диапазоне волн 0,86 см при углах визирования $10-80^\circ$

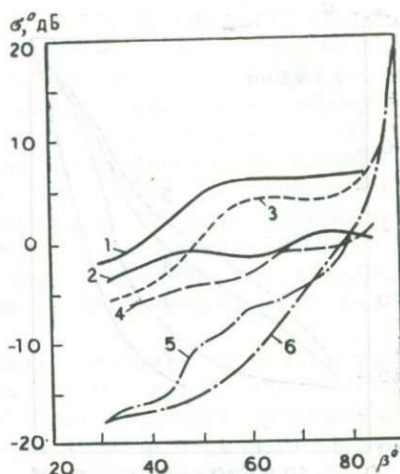


Рис. 14. Влияние влажности почвы на коэффициент рассеяния:

1 — орошаемый участок ($\lambda = 2, 25$ см); 2 — неорошаемый участок ($\lambda = 2, 25$ см); 3 — усредненная кривая для орошаемых участков ($\lambda = 2, 25$ см); 4 — усредненная кривая для неорошаемых участков ($\lambda = 2, 25$ см); 5 — усредненная кривая для орошаемых участков ($\lambda = 75$ см); 6 — усредненная кривая для неорошаемых участков ($\lambda = 75$ см)

длинах волн 2,25 см и 75 см по участкам с посевами пшеницы, люцерны, сахарной свеклы и сорго. Приведены кривые для одного типового участка (пшеница — кривые 1, 2) и усредненные кривые по всем участкам (кривые — 3—6). В ходе экспериментов отмечено наличие разницы σ° в 7 дБ для углов скольжения, больших 50° , при меньших углах разницы в σ° уменьшается.

Наиболее слабыми отражателями электромагнитной энергии являются промерзшая почва, лед на море, пустыня, промерзшие торфяные болота, безлесная тундра и густой лес зимой. Это было подтверждено в ходе экспериментальных исследований, проведенных в 1952 г. в Северной Канаде [80]. Результаты измерений показали, что промерзшая почва и лед имеют больший коэффициент рассеяния, чем сухой песок пустыни. Коэффициент рассеяния промерзшего торфяного болота и безлесной тундры, а также толстого слоя льда на поверхности моря примерно равен коэффициенту рассеяния сухого песка. Гораздо ниже оказывается коэффициент рассеяния густой лесистой местности зимой, когда деревья и земля засыпаны толстым слоем снега.

Отражения от морской поверхности имеют сложный характер. Здесь кроме аппаратных факторов и угла наблюдения необходимо учитывать состояние волнения, скорость ветра, направление волнения относительно РЛС. Основным фактором, определяющим состояние морской поверхности, является, как

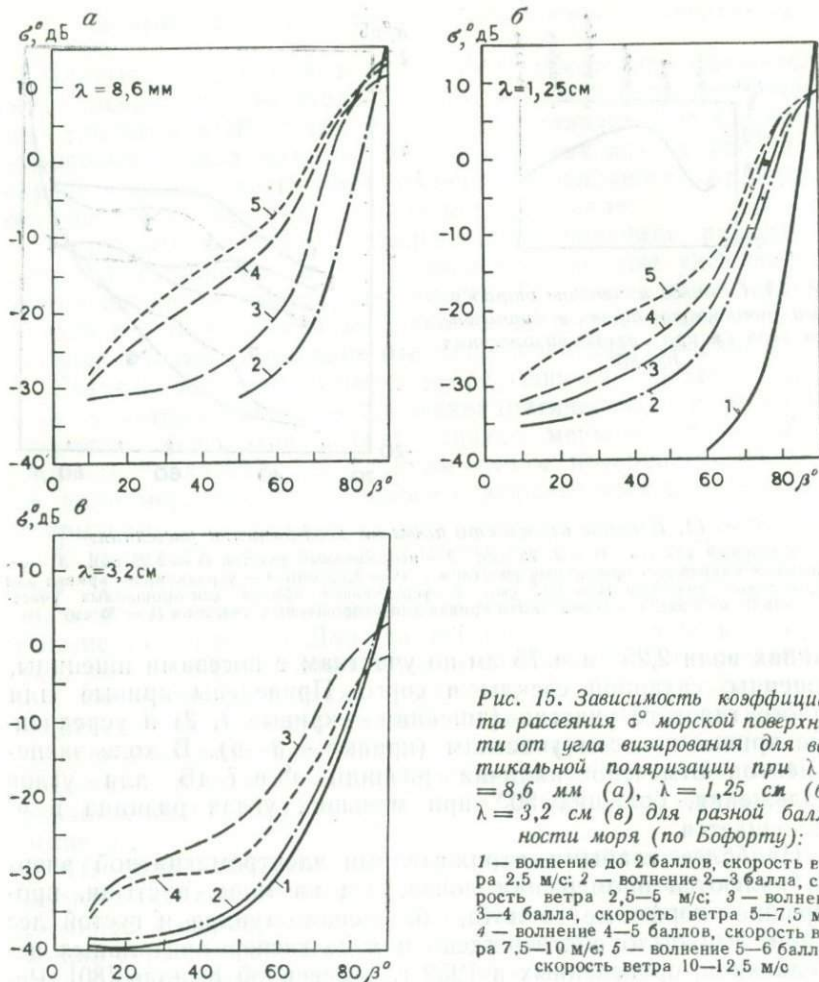


Рис. 15. Зависимость коэффициента рассеяния σ^0 морской поверхности от угла визирования для вертикальной поляризации при $\lambda = 8,6 \text{ мм}$ (а), $\lambda = 1,25 \text{ см}$ (б), $\lambda = 3,2 \text{ см}$ (в) для разной балльности моря (по Бофорту):

1 — волнение до 2 баллов, скорость ветра 2,5 м/с; 2 — волнение 2—3 балла, скорость ветра 2,5—5 м/с; 3 — волнение 3—4 балла, скорость ветра 5—7,5 м/с; 4 — волнение 4—5 баллов, скорость ветра 7,5—10 м/с; 5 — волнение 5—6 баллов, скорость ветра 10—12,5 м/с

известно, скорость ветра. По мере увеличения скорости ветра несколько уменьшается величина зеркального отражения при нормальном падении, в то время как рассеяние при малых углах наблюдения становится гораздо больше. При углах наклона, меньших 70° , увеличение скорости ветра на 20 узлов приводит к росту σ^0 больше чем на 20 дБ.

Установлено, что действие местных ветров приводит к появлению на поверхности моря так называемой вторичной структуры, которая представляет собой небольшие волны и рябь. Длина этих волн меньше 30 см и они располагаются поверх больших волн. Сложная зависимость характеристик радиолокационного отражения морской поверхности от ее структуры

отмечалась многими исследованиями. Отмечается, что в настоящее время не существует метода заблаговременного определения характера вторичной структуры морской поверхности, так как нет достаточно точного способа ее описания [95].

На рис. 15 приведены характерные зависимости коэффициента рассеяния морской поверхности от углов визирования при разной скорости ветра (балльности волнения по шкале Бофорта [92] для трех диапазонов волн РЛС). По графикам видно, что при малом волнении отражение от моря приближается к зеркальному и при реальных углах визирования $10-60^\circ$ сигнал в направлении РЛС очень мал. Увеличение ветра приводит к возрастанию сигнала, причем на более коротких волнах это сказывается сильнее.

При оценке уровня отраженного сигнала от подстилающей поверхности следует учитывать возможность проникновения радиоволн в подповерхностный слой. Глубина проникновения зависит от состояния и в первую очередь от комплексной диэлектрической проницаемости подповерхностного слоя. На рис. 16 представлена зависимость глубины проникновения радиоволн для различных подстилающих поверхностей от длины волны РЛС. Эти зависимости рассчитаны на основании измеренных значений диэлектрической проницаемости почвы, льда и водной поверхности [127].

Для сопоставления экспериментальных данных по отражающей способности различных подстилающих поверхностей приведем значения динамического диапазона изменений показателя рассеяния γ на трех частотах (рис. 17) и усредненные характеристики зависимости коэффициента рассеяния σ° от угла визирования для 3-см диапазона (рис. 18) [61].

Влияние флуктуаций отраженного сигнала

Приведенные выше зависимости касались средних значений удельной эффективной отражающей поверхности. Между тем, каждый участок фона представляет собой хаотический набор элементарных отражателей с различной эффективной отражающей площадью и по-разному ориентированных. В пределах каждого элемента разрешения РЛС происходит суммирование энергий отраженных от этих элементарных отражателей и формируется суммарный сигнал, причем, как правило, доля энергии каждого отражателя много меньше суммарной энергии в элементе разрешения. Сигнал, принимаемый РЛС от данного элемента разрешения, будет иметь случайное значение ЭПР ($S_{эф}$), которое может изменяться от элемента к элементу (или от захода к заходу при съемке) в несколько раз. Принимаемая энергия, усредненная по элементам разрешения или заходам, будет соответствовать средней ЭПР

$$\bar{S}_{эф} = \sigma \cdot \delta X \cdot \delta Y = \gamma \cdot \sin \beta \cdot \delta X \cdot \delta Y. \quad (II.22)$$

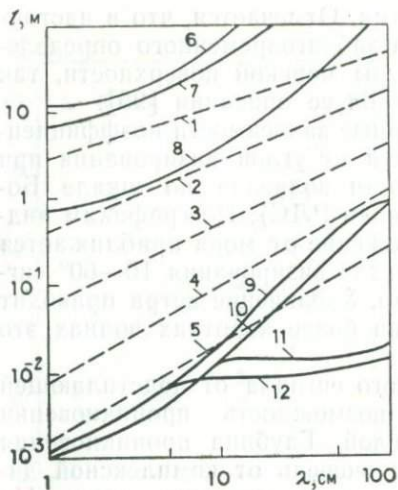


Рис. 16. Зависимость глубины проникновения радиоволны от длины волны (для влажной почвы и водной поверхности и льда):

1 — сухая почва, влажность $p = 0$; 2 — $p = 1-2\%$; 3 — $p = 2-10\%$; 4 — $p = 10-20\%$; 5 — очень влажная почва; 6 — пресноводный лед, температура 0° ; 7 — пресноводный лед, температура -20° ; 8 — морской лед, температура -20° ; 9 — пресная вода (озера), температура 20° ; 10 — пресная вода, температура 0° ; 11 — море, температура 0° ; 12 — море, температура 20°

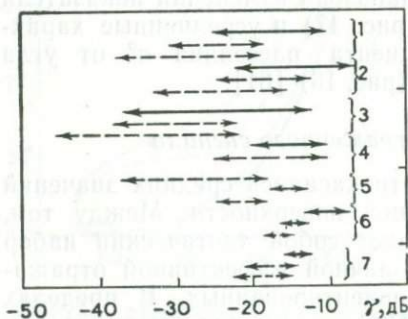


Рис. 17. Динамический диапазон изменений параметра γ для различных типов земной поверхности на трех частотах — 8-м диапазон, — 2-см диапазон, — 3-см диапазон

1 — дорога с асфальтовым покрытием; 2 — дорога с покрытием из асфальта и щебенки; 3 — дорога с бетонным покрытием; 4 — шлак и гравий; 5 — продлинновое поле; 6 — посева высотой 7,5 см; 7 — травы высотой 5 см

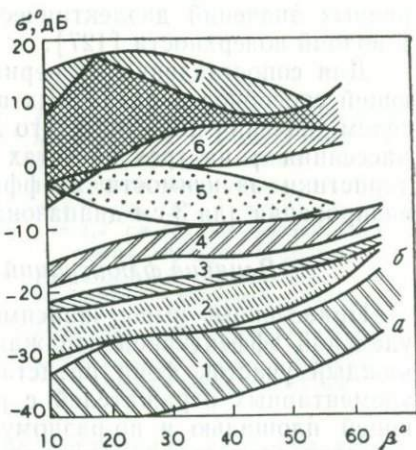


Рис. 18. Отражающая способность элементов подстилающей поверхности в 3-сантиметровом диапазоне волн.

1 — морская поверхность: а — ветер со скоростью $0-18$ км/ч; б — ветер со скоростью $28-37$ км/ч; 2 — засушливая песчаная пустыня; 3 — пересеченная пустыня; 4 — обильный растительный покров; 5 — жилые городские районы; 6 — торговые городские районы; 7 — промышленные районы

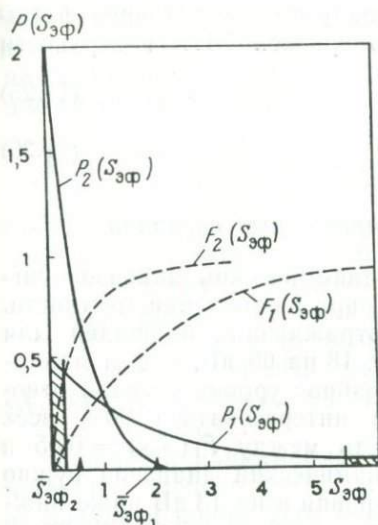
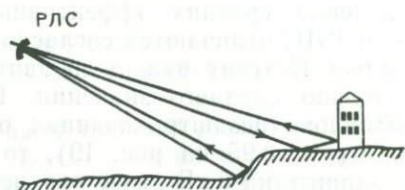


Рис. 19. Закон распределения вероятностей и интегральные законы распределения для двух целей со средней ЭПР $\bar{S}_{эф,1} = 2$ и $\bar{S}_{эф,2} = 0,5$

Рис. 20. Образование двугранных углов при отражении от рельефа и объектов на местности



Если для данной поверхности известна средняя ЭПР, принимаемый от каждого элемента этой поверхности сигнал будет соответствовать частному значению ЭПР $S_{эф}$, вероятность появления которого характеризуется экспоненциальным законом распределения (релеевский закон распределения амплитуды принимаемого сигнала) в соответствии с формулой

$$P(S_{эф}) = \frac{1}{\bar{S}_{эф}} e^{-\frac{S_{эф}}{\bar{S}_{эф}}} \quad (\text{II. 23})$$

Закон распределения вероятности показан на рис. 19 для двух поверхностей с разной отражающей способностью $S_{эф,1} = 2$; $\bar{S}_{эф,2} = 0,5$ (условные значения). Закон характеризует частоту, с которой для данного типа поверхности ЭПР цели имеет величину, равную $S_{эф}$. В частности, возможны случаи, когда у обеих поверхностей будет наблюдаться одна и та же ЭПР или даже некоторые элементы второй поверхности будут иметь большее отражение, чем элементы первой поверхности.

Вероятность того, что наблюдаемая ЭПР в данном элементе поверхности превысит некоторое значение, определится интегральным законом распределения

$$F(S) = P(S_{эф} > S) = 1 - e^{-\frac{S}{\bar{S}_{эф}}} \quad (\text{II. 24})$$

Отклонения наблюдаемой ЭПР от среднего значения можно характеризовать дисперсией или среднеквадратичным уровнем флуктуаций. Их величину находят по закону распределения. В частности, для экспоненциального закона дисперсия равна

квадрату средней ЭПР, а среднеквадратичное значение флюктуаций ЭПР соответственно равно средней ЭПР поверхности

$$D_{S_{\text{эф}}} = [\bar{S}_{\text{эф}}]^2, \quad (11.25)$$

$$m_{S_{\text{эф}}} = \sqrt{D_{S_{\text{эф}}}} = \bar{S}_{\text{эф}}. \quad (11.26)$$

Динамический диапазон отраженных сигналов

Представляет интерес оценить динамический диапазон сигналов, действующих на входе РЛС при наблюдении местности. Значения средних эффективных отражающих площадей для 3-см РЛС отличаются согласно рис. 18 на 60 дБ, т. е. в миллион раз. К этому нужно добавить разброс уровня сигнала относительно среднего значения. Если интересоваться 90% всех сигналов (незаштрихованная область между $F_1(S_{\text{эф}}) = 0,05$ и $F_2(S_{\text{эф}}) = 0,95$ на рис. 19), то динамический диапазон нужно расширить на 5 дБ выше верхнего уровня и на 13 дБ ниже нижнего уровня. Кроме распределенных целей на радиолокационном изображении будут наблюдаться точечные и групповые цели. Из них наиболее мощный сигнал может дать эффект сверкания, когда энергия отражается от соответственно ориентированных площадок, дающих зеркальное отражение в направлении РЛС или образующих двугранный угол, работающий как уголкового отражатель. Типичными объектами такого рода являются городские кварталы или здания, плоскости стен которых перпендикулярны к плоскости радиолокационного излучения; опушка леса, кромка высокого берега реки, насыпи, горный рельеф. На рис. 20 даны примеры таких объектов. Сигналы, отраженные от таких объектов, могут превышать средний уровень отражения на 10—20 и более децибелл. Таким образом суммарный динамический диапазон отраженных сигналов, действующих на входе РЛС землеобзора, может составлять 80—90 дБ. Прием, преобразование, регистрация и дешифрование таких сигналов вызывает определенные трудности, которые необходимо учитывать при проектировании РЛС и обработке получаемой ею информации.

§ 6. Прохождение радиолокационных сигналов через тракт некогерентной РЛС БО

Рассмотрим процесс прохождения радиолокационных сигналов через тракт РЛС БО (некогерентной) и найдем связь технических параметров аппаратуры и принципов ее построения с характеристиками выходного радиолокационного изображения. Один из важных вопросов, который приходится решать при проектировании РЛС,— это обеспечение необходимого уровня

сигнала на входе приемника и отношения его к собственным шумам аппаратуры. Мощность сигнала от цели на входе приемника связана с основными параметрами РЛС уравнением радиолокационной дальности

$$\bar{P}_ц = \frac{P_{изл} G^2 \lambda^2 S_{эф}}{(4\pi)^3 R^4} = \frac{P_{изл} G^2 \lambda^2 \sigma \delta X \delta Y}{(4\pi)^3 R^4}, \quad (\text{II.27})$$

где $P_{изл}$ — импульсная мощность передатчика,
 G — коэффициент усиления антенны в направлении на цель,
 λ — длина волны РЛС,
 $S_{эф}$ — эффективная площадь рассеяния цели,
 R — дальность до цели,
 σ — удельная ЭПР наблюдаемой поверхности,
 $\delta X, \delta Y$ — разрешение вдоль и поперек линии пути на местности.

Мощность принимаемого сигнала обратно пропорциональна четвертой степени расстояния. Поэтому сигналы, приходящие от начала и конца зоны обзора по дальности и отраженные от одинаковых целей, могут резко отличаться по своему уровню. Это будет затруднять их дешифрирование. Чтобы этого не произошло, диаграмму антенны РЛС в вертикальной плоскости делают специальной формы, ослабляющей сигнал на ближних дальностях и подчеркивающей его на больших дальностях.

Наиболее часто используют диаграмму направленности вида

$$\frac{G(\beta)}{G(\beta_0)} = \frac{\text{cosec}^2 \beta}{\text{cosec}^2 \beta_0}, \quad (\text{II.28})$$

где β_0 — угол наибольшего усиления антенны.

Такая диаграмма обеспечивает постоянство сигнала от целей, ЭПР которых не зависит от угла визирования.

Для формирования такой диаграммы используют специальное распределение поля по раскрыву антенны. Следует отметить, что при ограниченном вертикальном раскрыве антенны добиться особой строгости формирования луча нельзя, да это и не требуется, так как при изменении высоты полета закон несколько меняется, а, кроме того, различный характер отражения местности меняет уровень принимаемого сигнала. Для корректировки закона изменения мощности сигнала от дальности применяют также автоматическую регулировку усиления приемника (АРУ) — программную по времени (ВАРУ) или мгновенную (МАРУ), поддерживающую средний уровень выходного сигнала.

Кроме формы главного луча диаграммы антенны необходимо учитывать, что у нее есть боковые, побочные лепестки, уровень которых стараются сделать по возможности меньшим. По этим лепесткам на вход приемника поступают сигналы от посторонних целей, которые находятся в данный момент в стороне

от направления визирования. Если уровень этих целей большой (например, промышленные сооружения), они могут дать ложные отметки на слабом фоне (водная поверхность, равнина). Опасность представляют не только дальние, но и ближние лепестки, они, как правило, большего уровня ($-13 \div -20$ дБ) и ухудшают разрешающую способность РЛС при наблюдении сложных целей.

К эхо-сигналу от местности добавляются собственные (тепловые) шумы аппаратуры. Так же как и сигнал от местности, они представляют собой случайный процесс, только с очень широким спектром частот. Приемник выделяет из шума полосу, соответствующую своей полосе усиления. Прохождение сигналов и шумов через некогерентный (РЛС БО) и когерентный (РСА) приемники несколько различаются, поэтому мы будем рассматривать оба случая отдельно.

Приемный канал некогерентной РЛС включает в себя радиотракт (усилитель СВЧ, преобразователь, усилитель промежуточной частоты), детектор огибающей, видеоусилитель, индикатор и съемочную камеру. Каждое из этих устройств имеет ограниченную полосу пропускания сигналов и ухудшает общую разрешающую способность РЛС. Однако для простоты мы будем считать, что только два устройства имеют полосу, влияющую на разрешение РЛС: радиотракт и индикатор. В таком случае при приеме радиолокационных сигналов будут выполняться следующие операции: фильтрация (радиотракт), выделение огибающей (детектор), нелинейное преобразование (индикатор и фотопленка), последетекторное сглаживание (накопленные экспозиции на фотопленке). В радиотракте возможно также регулирование уровня огибающей сигнала путем автоматической регулировки усиления (АРУ), изменения усиления по времени (ВАРУ) или выбором специальной формы амплитудной характеристики, обычно логарифмической.

В простейшем случае постоянства коэффициента усиления приемника временной сигнал на входе детектора (по мощности) после каждого импульса зондирования повторяет распределение эффективных площадей рассеяния участков местности, расположенных на соответствующих дальностях, плюс мощность шумов. Наименьший сигнал от зеркальных поверхностей (спокойная вода) будет равен шуму. Превышение сигнала от целей над шумами будет определяться энергетическим потенциалом РЛС, который при прочих равных условиях пропорционален излучаемой мощности. Потенциал РЛС выбирают таким образом, чтобы достаточно слабые цели с заданной ЭПР имели определенное превышение над шумами для того, чтобы обеспечивалась необходимая вероятность их обнаружения на фоне шумов аппаратуры

$$\xi_0 = \frac{P_{\text{ц}}}{P_{\text{ш}}}, \quad (11.29)$$

где $P_{\text{ц}_0}$ — мощность сигнала от целей с заданной ЭПР,

$P_{\text{ш}}$ — мощность шумов на входе приемника.

Мощность шумов на входе приемника определяется выражением

$$P_{\text{ш}} = k \cdot \Delta F_{\text{ш}} [T_{\text{с}} + T_0 (\text{Ш} - 1)] = 4 \cdot 10^{-21} \cdot \Delta F_{\text{ш}} \cdot \text{Ш}, \quad (\text{II.30})$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/Гц, k — постоянная Больцмана,

T_0 — абсолютная температура источника сигнала (для РЛС обзора земной поверхности принимают $T_{\text{с}} = T_0 = 290^\circ$),

$\Delta F_{\text{ш}}$ — эквивалентная шумовая полоса пропускания приемника (обычно близка к реальной полосе приемника по промежуточной частоте),

Ш — шумфактор приемника; он определяется в основном параметрами усилителя СВЧ и преобразователя, а также потерями в СВЧ тракте; практически величина шумфактора составляет $\text{Ш} = 2 \div 10$ ($3 \div 10$ дБ).

Величина необходимого превышения мощности сигналов от заданных целей на входе приемника над мощностью шумов ξ_0 (отношение сигнал/шум по мощности) определяется как заданной вероятностью обнаружения цели, так и способом построения выходного тракта РЛС и, в частности, наличия последетекторного накопления. В свою очередь величина ξ_0 определяет динамический диапазон сигналов на входе приемника и характер передачи градаций на выходном радиолокационном изображении.

При дальнейших расчетах будем исходить из условия, чтобы мощность сигнала от суши с расчетным значением удельной ЭПР $\sigma^0 = -27$ дБ (песчаная пустыня на рис. 18) имела превышение над мощностью шумов на 3 дБ $\xi_0 = 2$.

Отсюда через уравнение дальности (II.27) можно вычислить потребную мощность передатчика (расчет обычно ведут для максимальной дальности)

$$P_{\text{изл.}} = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_{\text{ш}} \xi_0}{G^2 \lambda^2 \sigma^0 \delta X \delta Y}, \quad (\text{II.31})$$

где вместо ЭПР цели $S_{\text{эф}}$ подставлено ее выражение через произведение удельной ЭПР σ^0 на площадку разрешения РЛС $\delta X \cdot \delta Y$.

Динамический диапазон сигналов на входе приемника РЛС определим как отношение средней мощности на входе приемника при наблюдении наиболее интенсивных целей $P_{\text{вх. max}}$ к мощности шумов $P_{\text{ш}}$. Здесь мы пренебрегаем случайным характером принимаемого сигнала, что на практике дает несущественные искажения в области очень малых или очень больших сигналов.

Удельная ЭПР наиболее интенсивных целей согласно рис. 18 составляет $\sigma_{\text{max}}^0 = +18$ дБ, что на 45 дБ превышает расчетную удельную ЭПР σ^0 . Если учесть выбранное превышение средней мощности сигналов от суши над мощностью шумов

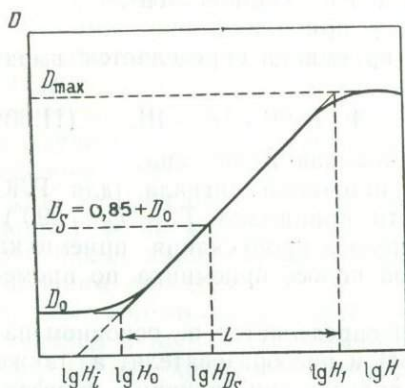


Рис. 21. Сенситометрическая кривая фотопленки

(без учета статистического характера сигнала)

$$Q_{\text{вх}} = \sqrt{\frac{P_{\text{вх. max}}}{P_{\text{вх. min}}}} = 316. \quad (\text{II.33})$$

Такое же отношение амплитуд сильного и слабого сигналов сохранится и на входе детектора, если используется линейный приемник с постоянным коэффициентом усиления. Линейный детектор, выделяя огибающую сигнала, не изменит этого соотношения. Сигнал с выхода детектора поступает на индикатор, который превращает его в модуляцию луча по яркости. Рассмотрим преобразование сигналов при прохождении их через индикатор и при регистрации их на фотопленке.

Для типовых электронно-лучевых трубок яркость луча связана с напряжением на модулирующем электроде нелинейной зависимостью:

$$I(u) = ku^{\gamma_{\text{п}}}, \quad (\text{II.34})$$

где u — напряжение сигнала на входе индикатора, k — множитель пропорциональности (коэффициент передачи), $\gamma_{\text{п}}$ — параметр, обычно лежащий в пределах 1,5—3.

Экспозиция на фотопленке при регистрации одиночной развертки будет пропорциональна яркости и длительности послесвечения люминофора $t_{\text{св}}$ и определяется из выражения

$$H_{\text{экв}} = I(u) t_{\text{св}} = k_u t_{\text{св}} u^{\gamma_{\text{п}}}. \quad (\text{II.35})$$

Зависимость прозрачности фотопленки от экспозиции также нелинейна. Фотоматериалы определяются сенситометрической кривой, выражающей связь плотности почернения от логарифма экспозиции [71], типичный вид сенситометрического графика показан на рис. 21. Он имеет три характерных участка: область

3 дБ, максимальный сигнал от цели будет превышать мощность шумов на 48 дБ. Это и определит динамический диапазон сигналов на входе приемника. Для расчетов примем округленно динамический диапазон входных сигналов равным 50 дБ:

$$\frac{P_{\text{вх. max}}}{P_{\text{вх. min}}} = \frac{P_{\text{п. max}} + P_{\text{ш}}}{P_{\text{ш}}} \approx \frac{P_{\text{п. max}}}{P_{\text{ш}}} = 5 \cdot 10^5, \quad (\text{II.32})$$

что соответствует отношению по амплитуде входных сигналов

недодержек (вуали), линейный участок нормальных экспозиций, область передержек.

Основные параметры, с помощью которых описывают свойства фотоматериалов, следующие:

τ — прозрачность, или коэффициент пропускания, фотопленки,

$D = -\lg \tau$ — плотность почернения,

D_0 — плотность вуали (можно также ввести прозрачность вуали $\tau_n = 10^{-D_0}$),

γ_k — коэффициент контрастности, определяющий наклон сенситометрического графика и зависящий от типа фотоэмульсии и режима проявления,

$S_{0,85}$ — чувствительность фотоэмульсии для выбранного режима проявления, она определяется через экспозицию, обеспечивающую почернение на 0,85 выше плотности вуали $S_{0,85} = 10/H_{D_0+0,85}$,

D_{\max} — максимальная плотность почернения на верхнем загибе сенситометрической кривой,

$L_\phi = \lg H_1 - \lg H_0$ — фотографическая широта, определяющая перепад логарифмов экспозиции по концам линейного участка сенситометрической кривой.

Чтобы упростить анализ воспроизведения сигналов от местности на фотопленке аппроксимируем сенситометрическую кривую линейно-ломаной с двумя участками — вуали и линейным; режим насыщения рассматривать не будем. Плотность почернения будет выражаться соотношением *

$$D = \begin{cases} D_0 & H < H_0, \\ D_0 + \gamma_k \cdot \lg \frac{H}{H_0} & H \geq H_0, \end{cases} \quad (11.36)$$

где H_0 — экспозиция, соответствующая точке перегиба кривой, ее можно найти через чувствительность пленки и коэффициент контрастности

$$H_0 = 10^{\frac{1-0,85}{\gamma_k}} : S_{0,85}.$$

Теперь можно найти зависимость плотности почернения фотопленки от напряжения сигнала на входе индикатора:

$$D = \begin{cases} D_0 & u < u_0, \\ D_0 + \gamma_k \cdot \gamma_n \cdot \lg \frac{u}{u_0} & u \geq u_0, \end{cases} \quad (11.37)$$

* Обычно линейный участок определяют через точку инерции H_i [87], а не через точку перегиба, но последняя аппроксимация удобнее для дальнейших расчетов.

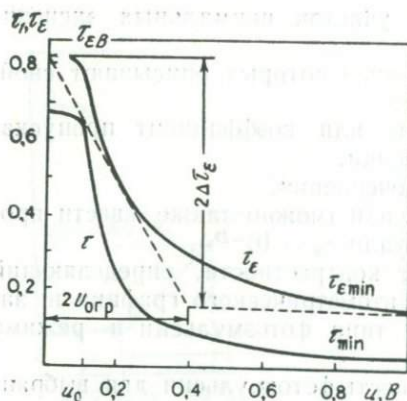


Рис. 22. Зависимость прозрачности τ и амплитудного пропускания τ_e от напряжения на входе индикатора

На рис. 22 приведена типичная выходная характеристика регистрирующего устройства — зависимость прозрачности фотопленки от напряжения на входе индикатора (кривая τ).

Фотографическая широта негативных фотоматериалов обычно не превышает $L_\Phi = \lg \frac{H_1}{H_0} = 1,5 \div 2$. Она и определяет допустимый динамический диапазон сигналов на входе индикатора, который можно характеризовать отношением амплитуды максимального допустимого сигнала к минимальному:

$$Q_{\text{инд}} = \frac{u_{\text{max}}}{u_0} = 10 \frac{L_\Phi}{\gamma_k \cdot \gamma_{\text{п}}} \quad (11.40)$$

Для $L_\Phi = 1,5$; $\gamma_{\text{п}} = 1,5$ и $\gamma_k = 1^*$ будем иметь $Q_{\text{инд}} = 10$ (20 дБ). Величина $Q_{\text{инд}}$ определяет динамический диапазон сигналов, который можно записать на пленку в такой РЛС. Сигналы от остальных целей попадут в область ограничения и не будут различаться.

Чтобы устранить указанное несоответствие динамических диапазонов сигналов от целей и регистрирующего устройства, используют приемник с нелинейной (логарифмической) амплитудной характеристикой либо автоматической регулировкой усиления (АРУ). В реальных устройствах амплитудная харак-

где u_0 — напряжение на входе индикатора, соответствующее излому сенситометрической кривой в точке $H_0 = k \times t_{\text{св}} \cdot u_0^{\gamma_{\text{п}}}$.

Таким образом, зависимость плотности почернения от уровня сигнала на входе индикатора определяется такой же сенситометрической кривой, но с наклоном, увеличенным в $\gamma_{\text{п}}$ раз. Прозрачность изображения определится выражением

$$\begin{aligned} \tau &= 10^{-D} = \tau_B \left(\frac{H_0}{H} \right)^{\gamma_k} = \\ &= \tau_B \left(\frac{u_0}{u} \right)^{\gamma_k \cdot \gamma_{\text{п}}} \end{aligned} \quad (11.38)$$

* Следует иметь в виду, что уменьшение γ_k не приводит к расширению динамического диапазона регистрирующего устройства, так как одновременно уменьшается максимальная плотность почернения фотопленки D_{max} и фотографическая широта L_Φ .

теристика имеет обычно линейный начальный участок и аппроксимируется зависимостью

$$u_{\text{вых}} = A \lg(1 + a \cdot u_{\text{вх}}), \quad (II.41)$$

где $u_{\text{вх}}$, $u_{\text{вых}}$ — амплитуда входного и выходного сигналов приемника соответственно,

A и a — некоторые (размерные) параметры.

Амплитудную характеристику приемника удобно представить в нормализованном виде

$$\frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх.0}}} = \lg\left(1 + b \frac{u_{\text{вх}}}{u_{\text{вх.0}}}\right) = \lg(1 + b \cdot Q), \quad (II.42)$$

где $u_{\text{вх.0}}$ — амплитуда некоторого начального сигнала, мощность которого равна средней мощности шумов на входе приемника,

$u_{\text{вых.0}}$ — амплитуда выходного сигнала, соответствующего начальному сигналу на входе,

$Q = \frac{u_{\text{вх}}}{u_{\text{вх.0}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{ш}}}}$ — отношение амплитуды сигнала к начальному уровню, численно равно отношению сигнал/шум по амплитуде,

$b = \frac{a}{u_{\text{вх.0}}}$ — безразмерный параметр, характеризующий степень логарифмичности амплитудной характеристики.

Предполагается, что мощность входного сигнала является суммой мощности на входе приемника, создаваемой мощностью отраженного сигнала от цели $P_{\text{ц}}$, и мощности шумов $P_{\text{ш}}$

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{ц}} + P_{\text{ш}}. \quad (II.43)$$

Примеры амплитудных характеристик приемника приведены на рис. 23. По осям отложены нормализованные уровни входного и выходного сигналов, параметром кривых является степень логарифмичности. Предельный случай $b \rightarrow 0$ соответствует линейному приемнику, при $b \geq 10$ приемник приближается к идеальному логарифмическому.

Такой же характер будут иметь зависимости для напряжения на входе индикатора. Оно связано с выходным напряжением приемника коэффициентом передачи детектора.

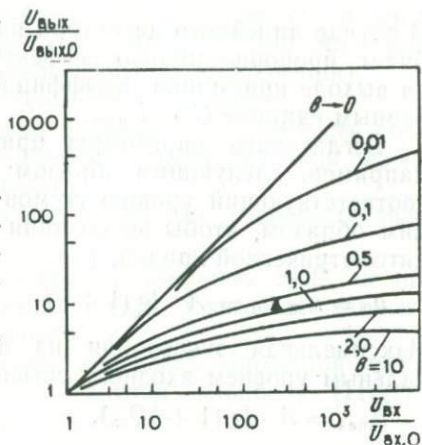


Рис. 23. Амплитудные характеристики приемника

В случае линейного детектора напряжение на входе индикатора будет пропорционально эффективному значению напряжения на выходе приемника. Коэффициент передачи детектора примем равным единице $U = U_{\text{вых}}$.

Согласовать параметры приемника и индикатора можно, например, следующим образом: начальный выходной сигнал, соответствующий уровню шумов приемника, устанавливаем таким образом, чтобы экспозиция от него была на перегибе сенситометрической кривой, т. е.

$$u_0 = u_{\text{вых-0}} = A \cdot \lg(1 + b). \quad (II.44)$$

Максимальная экспозиция на фотопленке определится максимальным уровнем входного сигнала

$$u_{\text{max}} = A \cdot \lg(1 + bQ_{\text{вх}}), \quad (II.45)$$

где $Q_{\text{вх}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ц. max}}}{P_{\text{ш}}}}$ — динамический диапазон входных сигналов по амплитуде.

Теперь можно записать условие согласования динамических диапазонов входных сигналов и индикатора

$$Q_{\text{инд}} = \frac{u_{\text{max}}}{u_0} = \frac{\lg(1 + bQ_{\text{вх}})}{\lg(1 + b)}. \quad (II.46)$$

Это трансцендентное уравнение можно решить методом итераций, либо по графикам рис. 23, отложив $Q_{\text{вх}}$ по оси абсцисс и $Q_{\text{инд}}$ по оси ординат. Так, например, для $Q_{\text{вх}} = 316$ (50 дБ) и $Q_{\text{инд}} = 10$ (20 дБ) $b = 0,72$ (отмечено на рисунке треугольником).

По полученным данным можно найти зависимость почернения фотопленки от уровня входного сигнала. Плотность почернения определится выражением

$$D = D_0 + \gamma_{\text{к}} \gamma_{\text{п}} \lg \frac{u}{u_0} = D_0 + \gamma_{\text{к}} \gamma_{\text{п}} \lg \left[\frac{\lg(1 + bQ)}{\lg(1 + b)} \right]. \quad (II.47)$$

Прозрачность негатива будет равна

$$\tau = \tau_{\text{в}} \left[\frac{\lg(1 + b)}{\lg(1 + bQ)} \right]^{\gamma_{\text{к}} \gamma_{\text{п}}}. \quad (II.48)$$

По этим формулам могут быть рассчитаны зависимости плотности почернения и прозрачности фотопленки от удельной ЭПР целей при изменении аппаратурных факторов и условий наблюдения: усиления антенны, наклонной дальности, характеристики ВАРУ, разрешающей способности РЛС, угла наблюдения. Эти факторы учитываются в величине отношения сигнал/шум по амплитуде Q (если окажется, что $Q \leq 1$, то берут $Q = 1$)

$$Q = k_{\text{п}}^* \sqrt{1 + \frac{P_{\text{ц}}}{P_{\text{ш}}}} = k_{\text{п}}^* \sqrt{1 + k_{\text{р}} \cdot \xi_0 \cdot 10^{(\sigma^* - \sigma_{\text{р}}^*)/10}}, \quad (II.49)$$

где k_n — изменение коэффициента усиления приемника за счет действия ВАРУ относительно значения, для которого делался расчет потенциала (расчетного значения),
 $P_{ц}, P_{ш}$ — мощности отраженного сигнала и шумов,
 k_p — коэффициент, учитывающий изменение мощности сигнала от цели относительно расчетного значения, из-за изменения дальности цели,
 ξ — заданное отношение сигнал/шум для расчетного значения удельной ЭПР,
 σ, σ_p^0 — реальное и расчетное значения удельных ЭПР целей в децибеллах; σ^0 подставляется с учетом ее зависимости от угла наблюдения.

Коэффициент k_p может быть вычислен через отношения фактических параметров, входящих в уравнение дальности (II.27), к их расчетным значениям

$$k_p = \left(\frac{G}{G_p}\right)^2 \left(\frac{R_p}{R}\right)^4 \frac{\delta X}{\delta X_p} \cdot \frac{\delta Y}{\delta Y_p} = \left(\frac{G}{G_p}\right)^2 \left(\frac{R_p}{R}\right)^3 \frac{\cos \beta_p}{\cos \beta} \quad (\text{II.50})$$

Здесь учтено, что разрешение некогерентной РЛС БО по линии пути пропорционально наклонной дальности и что разрешение поперек пути зависит от косинуса угла наблюдения β .

На рис. 24 приведены зависимости прозрачности $\tau_{\text{нег}}$ и плотности почернения $\Delta D = D_{\text{нег}} - D_0$ (для $b = 0,72$) негатива от удельной ЭПР наблюдаемой местности. Принято, что плотность вуали $D_0 = 0,17$, коэффициент контрастности $\gamma_k = 1$, фотографическая широта $L_\phi = 1,5$, соответственно максимальная плотность $D_{\text{макс}} = 1,67$. Для сравнения приведена кривая для прозрачности позитивного изображения (отпечатка), которая при коэффициентах контрастности негатива и отпечатка, равных $\gamma_{\text{нег}} = \gamma_{\text{поз}} = 1$, характеризуется прямой зависимостью от экспозиции негатива

$$\begin{aligned} \tau_{\text{поз}} &= \tau_b \text{ поз} \left(\frac{H_0 \text{ поз}}{H_2 \tau_{\text{нег}}} \right)^{\gamma_{\text{поз}}} = \tau_b \text{ поз} \left(\frac{H}{H_s} \right)^{\gamma_{\text{нег}} \gamma_{\text{поз}}} = \\ &= \tau_b \text{ поз} \left[\frac{\lg(1 + bQ)}{\lg(1 + bQ_{\text{вх}})} \right]^{\gamma_{\text{нег}} \gamma_{\text{поз}} \gamma_p} \end{aligned} \quad (\text{II.51})$$

По оси абсцисс обозначены также границы удельной ЭПР для различного типа подстилающей поверхности согласно рис. 18. Приведены кривые для трех видов амплитудной характеристики приемника: для оптимального согласования динамических диапазонов входного сигнала и индикатора $b = 0,72$ (сплошные кривые), для линейного приемника $b \rightarrow 0$ (штрих-пунктир) и для идеального логарифмического приемника с $b = 10$ (пунктир).

Как видно из рис. 24, при оптимальном согласовании динамических диапазонов на фотопленке регистрируется весь динамический перепад мощностей отраженного сигнала от $\sigma^0 = -30$ дБ (спокойное море) до $\sigma^0 = +20$ дБ (промышленные

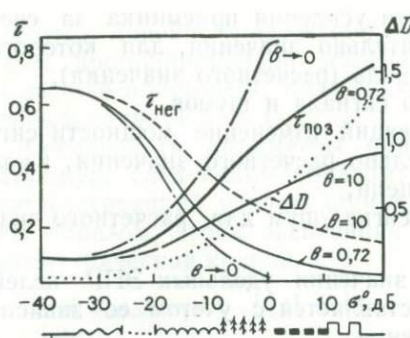


Рис. 24. Зависимости прозрачности τ_{neg} , плотности почернения D_{neg} негативных изображений и прозрачности $\tau_{\text{поз}}$ положительного изображения от удельной ЭПР наблюдаемой поверхности для различного вида амплитудных характеристик приемника

районы). При этом характеристика фотопленки используется полностью от вуали до максимальной плотности. Однако контрасты при передаче градаций на выходном изображении оказываются небольшими. Так, при изменении мощности входного сигнала на 10 дБ (в 10 раз) плотность на выходном изображении возрастает не более чем на 0,3 (две градации сенситометрического клина, используемого для испытания фотопленки). Это означает, что на РЛИ будут хорошо различаться типы подстилающих поверхностей (вода, суша, лес и т. д.), однако возможность различения градаций в пределах одного типа поверхности (отличие лиственного леса от хвойного, одного типа сельскохозяйственной культуры от другого и т. д.) будет ограничена.

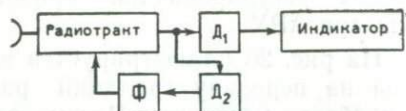
По аналогии с сенситометрическими параметрами фотографических изображений можно ввести понятие о фотометрической или градационной характеристике радиолокационного изображения — зависимости плотности почернения на снимке от мощности отраженного сигнала от цели (II.47), (II.49) и сквозном коэффициенте контрастности РЛИ — отношении приращенной плотности почернения к приращению логарифма мощности входного сигнала

$$\gamma_{\text{РЛ}} = \frac{D_2 - D_1}{\lg P_2 - \lg P_1} = \frac{\Delta D}{\lg \frac{P_2}{P_1}} \quad (\text{II.52})$$

В случае оптимального логарифмического приемника сквозной коэффициент контрастности для рассматриваемого примера составляет максимум $\gamma_{\text{РЛ}} = 0,3$, а в среднем по снимку $\gamma_{\text{РЛ}} = 0,25$.

Для идеального логарифмического приемника с $b=10$ (пунктир) также регистрируется весь динамический диапазон входных сигналов, однако сквозной коэффициент контрастности еще меньше $\gamma_{\text{РЛ}} < 0,18$. При этом полезный перепад плотностей почернения фотопленки используется не полностью.

Рис. 25. Функциональная схема приемника с АРУ



Для линейного приемника $\nu \rightarrow 0$ (штрих-пунктир) сквозной коэффициент контрастности значительно больше, до $\gamma_{рл} = 0,75$, однако на пленке регистрируется только часть динамического диапазона входных сигналов.

Следует отметить, что при регистрации радиолокационного изображения на негативной фотопленке прозрачность изображения в области интенсивных целей оказывается очень малой (что соответствует большой плотности почернения). Это может затруднять различение градаций для таких целей в случаях, когда основное поле снимка занимают менее отражающие объекты и глаз оператора адаптируется к светлому фону. В этом случае может оказаться более целесообразным дешифрирование позитивного изображения (отпечатка), для которого зависимость прозрачности от мощности показана на рис. 24 кривой $\tau_{поз}$.

Рассмотрим теперь процесс формирования выходного изображения при использовании в приемнике автоматической регулировки усиления (АРУ), он будет сложнее, чем в приемнике с нелинейной характеристикой, так как придется учитывать совместное прохождение сигналов, принимаемых в различных элементах дальности. Функциональная схема приемника с АРУ показана на рис. 25. Кроме основного канала сигнал со входа детектора D_1 радиотракта поступает на дополнительный детектор D_2 АРУ, где выделяется управляющее напряжение. Приемник с АРУ характеризуется регулировочной кривой и постоянной времени АРУ.

Регулировочная кривая показывает как изменяется коэффициент усиления тракта от уровня или мощности выходного сигнала, и определяет форму амплитудной характеристики приемника, т. е. зависимость выходного сигнала от входного. Эта зависимость носит нелинейный характер, приближающийся к логарифмическому. Частный случай — АРУ с очень большой глубиной регулирования обеспечивает постоянство уровня выходного сигнала при изменении входного в широких пределах (идеальная АРУ).

Постоянная времени АРУ определяет тот участок местности, по которому формируется управляющий сигнал. Так, например, при постоянной времени 33 мкс управляющий сигнал будет усредняться на участке 5 км по дальности.

Величина выходного сигнала в каждом элементе разрешения в приемнике с АРУ будет сложным образом зависеть от характера распределения отражающей способности местности и эффективной отражающей площади данного элемента, а также

формы регулировочной кривой и частотной характеристики фильтра АРУ.

На рис. 26 иллюстрируется влияние типа приемного устройства на передачу градаций радиолокационного изображения при обзоре местности. Рассмотрены случаи приемника с линейной амплитудной характеристикой, с идеальной логарифмической характеристикой, с идеальной АРУ и АРУ, имеющей логарифмическую характеристику регулирования. Влияние сглаживающего фильтра АРУ задано интервалом $\Delta R_{\text{АРУ}}$, по которому усредняется сигнал, управляющий усилением приемника.

При линейном приемнике не будут воспроизводиться различия в малых и больших уровнях сигналов. Для логарифмического приемника выходной сигнал на входе индикатора будет повторять распределение средних эффективных площадей рассеяния местности, взятое в децибеллах, однако контраст воспроизведения градаций будет невелик. В приемнике с АРУ коэффициент усиления для каждого элемента дальности будет зависеть от среднего уровня сигнала по участку длиной $\Delta R_{\text{АРУ}}$ предшествующему данному элементу.

В частности, при постоянной времени АРУ, равной нулю (мгновенное регулирование), приемник с АРУ имеет такие же характеристики, что и приемник с нелинейной амплитудной характеристикой. При бесконечной постоянной времени коэффициент усиления приемника оказывается постоянным для всех сигналов, т. е. приемник приближается к линейному (такой случай применяют для исключения температурных уходов коэффициента усиления, например, АРУ по шумам).

Основное различие радиолокационного изображения в приемниках с нелинейной (логарифмической) амплитудной характеристикой и с АРУ заключается в том, что при использовании АРУ все естественные контрасты на местности в пределах зоны усреднения АРУ сохраняются в выходном сигнале приемника и претерпевают изменения только при нелинейном процессе регистрации, средние же значения выходного сигнала преобразуются в соответствие с регулировочной кривой приемника, что дает сжатие динамического диапазона сигналов перед их регистрацией. Применение АРУ в приемном тракте позволяет получить большие контрасты при наблюдении соседних целей, он как бы подчеркивает контуры изображения. Это свойство помогает дешифровать РЛИ. Кроме того, приемник с АРУ проще в изготовлении и более стабилен в эксплуатации.

Вместе с тем, участки местности, имеющие одинаковую отражающую способность, будут иметь разную плотность на радиолокационном снимке, в зависимости от характера местности, окружающей данный участок. Это затрудняет отождествление характера наблюдаемой местности по тону изображения на

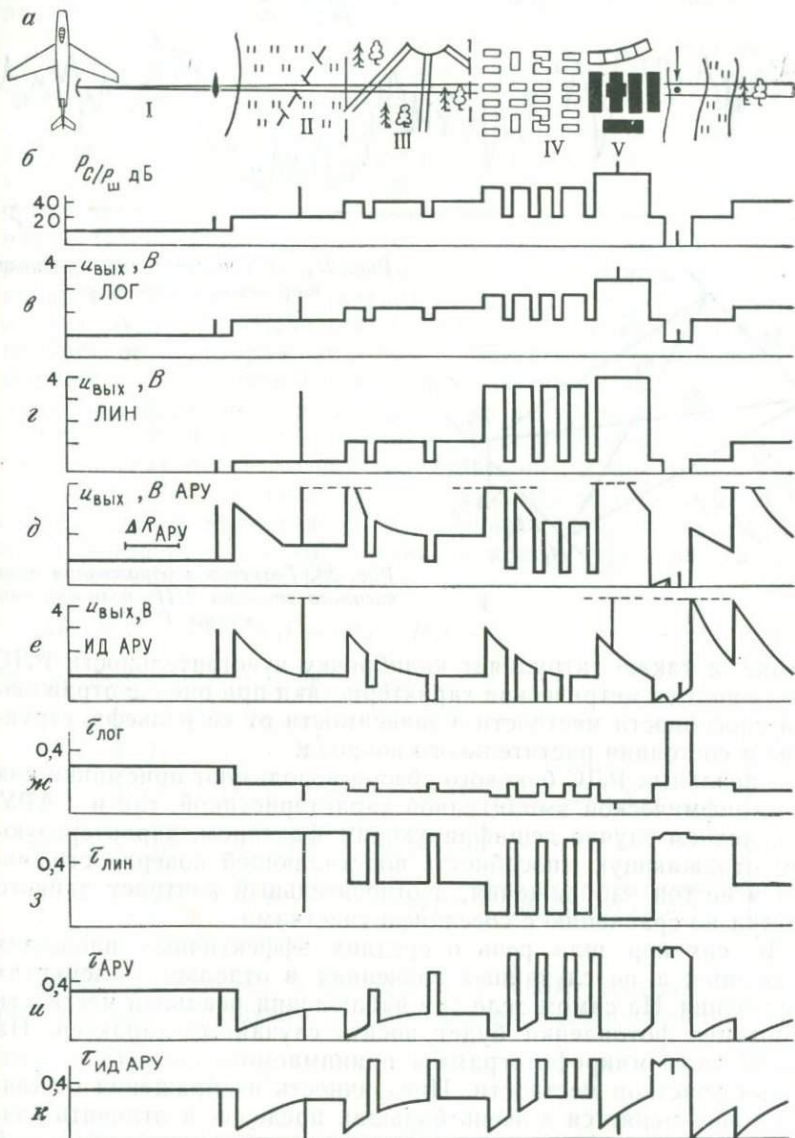


Рис. 26. Воспроизведение градиентов фона и целей в некогерентной РЛС: а — наблюдаемая местность (I — море, II — равнина, III — лес, IV — жилая застройка, V — промышленные сооружения); б — отношение сигнал/шум на входе приемника РЛС; в — е — выходное напряжение приемника с логарифмической (в) линейной (е) амплитудной характеристиками, приемника с логарифмической (д) и идеальной (е) АРУ; ж — к прозрачности негатива для соответствующих типов приемников

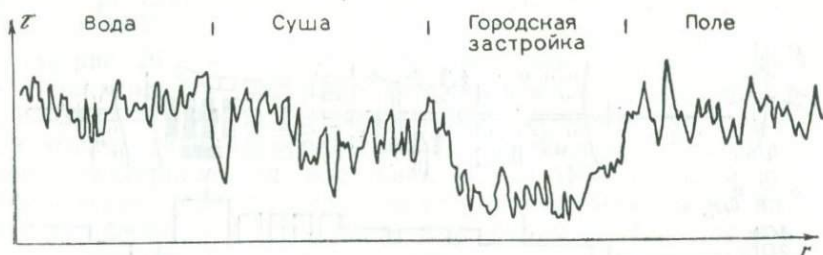


Рис. 27. Микрофотограмма радиолокационного изображения

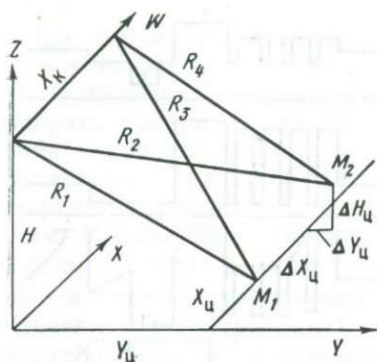


Рис. 28. Геометрия образования независимого отсчета ЭПР цели при движении РЛС

снимке, а также затрудняет калибровку чувствительности РЛС и ухудшает ее метрические характеристики при оценке отражающей способности местности в зависимости от ее рельефа, структуры и состояния растительного покрова.

В реальных РЛС бокового обзора используют приемники как с логарифмической амплитудной характеристикой, так и с АРУ. В последнем случае дешифрирующим фактором, характеризующим отражающую способность подстилающей поверхности, является не тон изображения, а относительный контраст данного участка по сравнению с соседними участками.

До сих пор шла речь о средних эффективных площадях отражения, а не случайных значениях в отдельных элементах разрешения. На самом деле при наблюдении реальной местности экспозиция фотопленки будет носить случайный характер. На рис. 27 даны микрофотограммы принимаемого сигнала от различных участков местности. Прозрачность изображения от точки к точке меняется в очень больших пределах и отличить различные участки фона можно только усреднением по большой площади.

Случайный характер принимаемого сигнала от местности создает зернистость радиолокационного изображения и значительно ухудшает его дешифрируемость. Однако в некогерентных РЛС имеется простая возможность сглаживания флюктуаций принимаемого сигнала и получения изображения, соответ-

ствующего средней эффективной площади рассеяния каждого элемента фона*.

Рассмотренная картина получения и регистрации сигнала от местности относится к одному зондирующему импульсу. Вместе с тем в процессе обзора РЛС перемещается в пространстве и облучает элемент фона под разными ракурсами. При этом эффективная отражающая площадь цели меняется по закону распределения вероятности (II.23) со средним значением, определяемым характером поверхности. Движение РЛС вызывает смаз изображения, но пока он невелик и много меньше разрешения РЛС вдоль линии пути, все отраженные сигналы попадают в одно место (пятно) на пленке так, что экспозиция от них будет складываться. Степень уменьшения флюктуаций прозрачности изображения будет зависеть от количества суммируемых (усредняемых) независимых образцов сигнала, т. е. таких, которые приходят под разными ракурсами.

Считается, что при наблюдении цели, состоящей из множества случайных отражателей, распределенных в некотором объеме $\Delta X_{ц}, \Delta Y_{ц}, \Delta H_{ц}$ (от точки M_1 до точки M_2 на рис. 28), независимые отсчеты эффективной отражающей площади образуются тогда, когда разность хода лучей на краях этого участка изменится на длину волны РЛС $-\lambda$.

$$\Delta R(X_k) = (R_3 - R_4) - (R_2 - R_1) = \lambda. \quad (II.53)$$

В соответствии с рис. 28 имеем

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \sqrt{H^2 + Y_{ц}^2 + X_{ц}^2} \\ R_2 &= \sqrt{(H + \Delta H_{ц})^2 + (Y_{ц} + \Delta Y_{ц})^2 + (X_{ц} + \Delta X_{ц})^2} \\ R_3 &= \sqrt{H^2 + Y_{ц}^2 + (X_{ц} - X_k)^2} \\ R_4 &= \sqrt{(H + \Delta H_{ц})^2 + (Y_{ц} + \Delta Y_{ц})^2 + (X_{ц} + \Delta X_{ц} - X_k)^2} \end{aligned} \right\} \quad (II.54)$$

Учитывая, что $X_k, \Delta X_{ц}, \Delta Y_{ц}, \Delta H_{ц}$ много меньше R , после преобразования получим условие независимости отсчетов:

$$\Delta R = \frac{X_k \cdot \Delta X_{ц}}{R} = \lambda. \quad (II.55)$$

Отрезок $X_k = \frac{R \cdot \lambda}{\Delta X_{ц}}$, характеризующий перемещение РЛС, при котором сигналы, наблюдаемые от данного элемента местности, становятся независимыми, называется интервалом корреляции.

* В РСА такая возможность также имеется, но она реализуется не во всех случаях.

В частности, для РЛС БО, в которых размер цели по линии пути равен разрешению $\Delta X_{\text{ц}} = \delta X = \frac{R \cdot \lambda}{d_A}$ (II.7) интервал корреляции сигнала равен горизонтальному раскрыву антенны

$$X_{\text{к}} = \frac{R\lambda}{\delta X} = d_A. \quad (\text{II.56})$$

Число независимых образцов сигнала, усредняемых при регистрации изображения (так называемое последетекторное интегрирование) определится из соотношения [76]

$$N = \frac{\delta X}{X_{\text{к}}} = \frac{R\lambda}{d_A^2}. \quad (\text{II.57})$$

Это дает уменьшение флюктуаций эффективной отражающей площади при наблюдении однородного фона в \sqrt{N} раз, т. е.*

$$m_S = \frac{m_{S_{\text{эф}}}}{\sqrt{N}} = \frac{\bar{S}_{\text{эф}} \cdot d_A}{\sqrt{R \cdot \lambda}}, \quad (\text{II.58})$$

где $m_{S_{\text{эф}}}$ — среднеквадратичное значение флюктуаций ЭПР без интегрирования,
 $\bar{S}_{\text{эф}}$ — среднее значение ЭПР.

Наличие флюктуаций сигнала, отраженного от подстилающих поверхностей, приводит к тому, что приведенные на рис. 24 и 26 графики реализуются только «в среднем». В каждой же точке снимка будет случайное значение плотности почернения (прозрачности), в результате чего изображение будет иметь зернистый (гранулярный) характер. Размер зерен определится разрешающей способностью снимка, а величина отклонения от среднего (размах флюктуаций) — степенью некогерентного накопления, а также законом распределения ЭПР, которым характеризуется наблюдаемая поверхность. Поэтому зернистость изображения, хотя и ухудшает дешифрируемость РЛИ, но ее характер (текстура) может служить дополнительным дешифрирующим признаком для идентификации типа подстилающей поверхности.

§ 7. Обработка сигналов в РСА

Принципиальное отличие РСА от некогерентных РЛС состоит в том, что операции выделения информации об отражающей способности элементов на местности предшествует запоминание принятых вдоль траектории полета сигналов и их последующее когерентное суммирование (формирование синтезированной диаграммы). Эта последняя операция может выполняться с

* Среднеквадратичное значение флюктуаций ЭПР при отсутствии последетекторного накопления ($N = 1$) для поверхностей с экспоненциальным законом распределения ЭПР численно равно среднему значению ЭПР.

помощью оптических решающих устройств, с применением быстродействующих ЦВМ, электронными устройствами, либо другими методами.

Рассмотрим более подробно РСА с оптической обработкой информации, наиболее распространенной в настоящее время [20]. В таких РСА отраженные от местности сигналы, принятые РСА, запоминают на фотопленке в бортовом фоторегистрирующем устройстве (ФРУ). Оно аналогично

ФРУ некогерентной РЛС БО и отличается тем, что на его вход поступают сигналы не от детектора огибающей, как в РЛС БО, а с фазового детектора, который в сущности является преобразователем частоты, переводящим принятые радиочастотные сигналы в область видеочастот. Входной сигнал ФРУ может быть как положительной, так и отрицательной полярности, поэтому для его регистрации рабочая точка индикатора выбирается не на спаде синусоидальной кривой фотопленки, а на линейном участке (в районе $u_{\text{раб}} = 0,2 \text{ В}$ по характеристике рис. 22).

Пусть на входе приемника действует сигнал от одиночной точечной цели. Он будет иметь вид

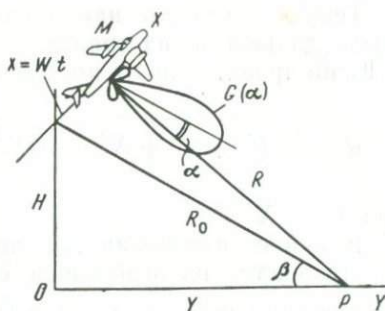


Рис. 29. Геометрия обзора с помощью РСА

$$u_{\text{пр}}(t) = a_{\text{ц}} G(\alpha - \alpha_{\text{Л}}) u_{\text{изл}} \left(t - \frac{2R}{c} \right) \times \cos \left[2\pi \cdot f_0 \left(t - \frac{2R}{c} \right) + \varphi_{\text{изл}} + \varphi_{\text{ц}} \right], \quad (\text{II.59})$$

где $a_{\text{ц}}$ — амплитуда сигнала, определяемая энергетическими соотношениями в системе и эффективной площадью рассеяния цели;

$u_{\text{изл}}(t)$ — форма зондирующего импульса, в простейшем случае импульс прямоугольный, длительностью $\tau_{\text{и}}$,

$$u_{\text{изл}}(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \tau_{\text{и}} \\ 0 & t < 0, \quad t > \tau_{\text{и}} \end{cases} \quad (\text{II.60})$$

$G(\alpha)$ — форма диаграммы направленности вдоль линии пути, α — угол визирования цели, отсчитываемый в плоскости визирования (рис. 29),

$\alpha_{\text{Л}}$ — угол установки антенны (на рисунке $\alpha_{\text{Л}} = 0$),

t — текущее время,

R — наклонная дальность до цели,

$\varphi_{\text{изл}}$ — начальная фаза излучения передатчика,

$\varphi_{\text{ц}}$ — фаза отражения от цели,

f_0 — несущая частота РЛС.

Текущее значение наклонной дальности может быть выражено через дальность на траверзе R_0 и расстояние X , проходимое РЛС по траектории от положения траверза

$$R = \sqrt{H^2 + Y^2 + X^2} = \sqrt{R_0^2 + X^2} \approx R_0 + \frac{X^2}{2R_0}, \quad (II.61)$$

при $R_0 \gg X$.

Влияние изменения дальности (запаздывания) практически не отражается на огибающей сигнала и сказывается только на фазе принимаемых колебаний (так как $\tau_n \gg \frac{1}{f_0}$). Таким образом, сигнал на входе приемника в каждом периоде зондирования будет представлять собой импульсы, заполненные несущей частотой f_0 . Амплитуда импульсов медленно меняется вдоль линии пути от зондирования к зондированию по закону изменения усиления антенны $G(\alpha)$. Фаза меняется по квадратичному закону вдоль траектории полета, а при равномерном прямолинейном полете $X = W \cdot t$ и по времени. Форма сигнала принимает вид

$$\begin{aligned} u_{\text{пр}}(t) &= a_{\text{ц}} G(\alpha - \alpha_A) \cos\left(2\pi f_0 t - \frac{2\pi X^2}{R_0 \lambda} - \varphi\right) = \\ &= a_{\text{ц}} G\left(\frac{Wt}{R_0} - \alpha_A\right) \cos\left(2\pi f_0 t - \frac{2\pi W^2 t^2}{R_0 \lambda} - \varphi\right), \end{aligned} \quad (II.62)$$

где

$$\varphi = -\varphi_{\text{изл}} - \varphi_{\text{ц}} + \frac{4\pi R_0}{\lambda},$$

$$\alpha = \frac{Wt}{R_0}$$

— угол визирования.

Сигнал на выходе приемника (фазовом детекторе) усиливается в k_n раз (k_n — коэффициент усиления приемника для данного уровня сигнала на входе) и смещается по частоте на f_0 в область видеочастот

$$u_{\text{ф.д.видео}}(t) = k_n \cdot a_{\text{ц}} \cdot G\left(\frac{W \cdot t}{R_0} - \alpha_A\right) \cos\left(\frac{2\pi \cdot W^2 \cdot t^2}{R_0 \cdot \lambda} + \varphi\right). \quad (II.63)$$

Изменение фазы от импульса к импульсу по квадратичному закону может также рассматриваться как изменение доплеровской частоты F_d , вызванной относительным движением РЛС и цели по линейному закону от больших значений, когда цель находится впереди относительно РЛС, через нуль, когда цель

на траверзе, и снова к большим значениям *

$$F_d = \frac{2W}{\lambda} \sin \alpha \approx \frac{2W\alpha}{\lambda} = \frac{2W^2 \cdot t}{R_0 \lambda}, \quad (\text{II.64})$$

где $\alpha \approx \frac{W \cdot t}{R}$ — угол визирования,
 W — путевая скорость РЛС,
 R_0 — дальность на траверзе,
 λ — длина волны РЛС.

График зависимости частоты и фазы сигнала от угла (по времени) показан на рис. 30. Антенна вырезает из спектра узкую полосу с центральной частотой, обычно смещенной от нуля (антенна отворачивается от перпендикулярного направления на некоторый угол α_A). Там же изображены сигналы, принимаемые от точечной цели, подаваемые на вход индикатора и регистрируемые на первичной фотопленке в виде участков с переменным почернением.

Экспонированная и проявленная первичная фотопленка помещается в машину оптического преобразования информации (МОПИ). МОПИ представляет собой многоканальный оптический фильтр, выполняющий операцию формирования синтезированного луча в оптической модели РЛС (рис. 31). МОПИ включает в себя источник монохроматического света (лазер), коллиматор, формирующий плоский световой пучок 1, фильмовый канал 2 с первичной фотопленкой 3, анаморфотную оптическую систему 4, вторичную цель 5 и вторичную фотопленку 6, на которой регистрируется выходное изображение. Первичная и вторичная фотопленки приводятся в движение с постоянным отношением скоростей с помощью устройства протяжки первичной и вторичной пленок.

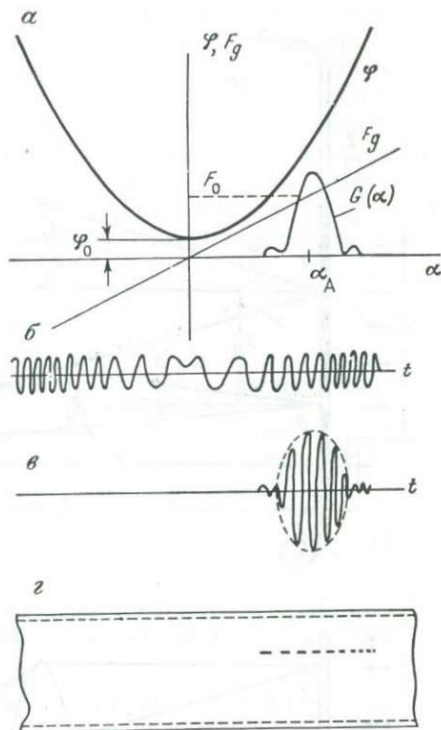


Рис. 30. Формирование сигнала в РСА: а — фазовая и частотная характеристики; б, в — вид сигнала без учета (б) и с учетом (в) диаграммы антенны; г — вид сигнала, записанного на первичной фотопленке в ФРУ

* Линейность сохраняется при малых углах α , что обеспечивается на практике.

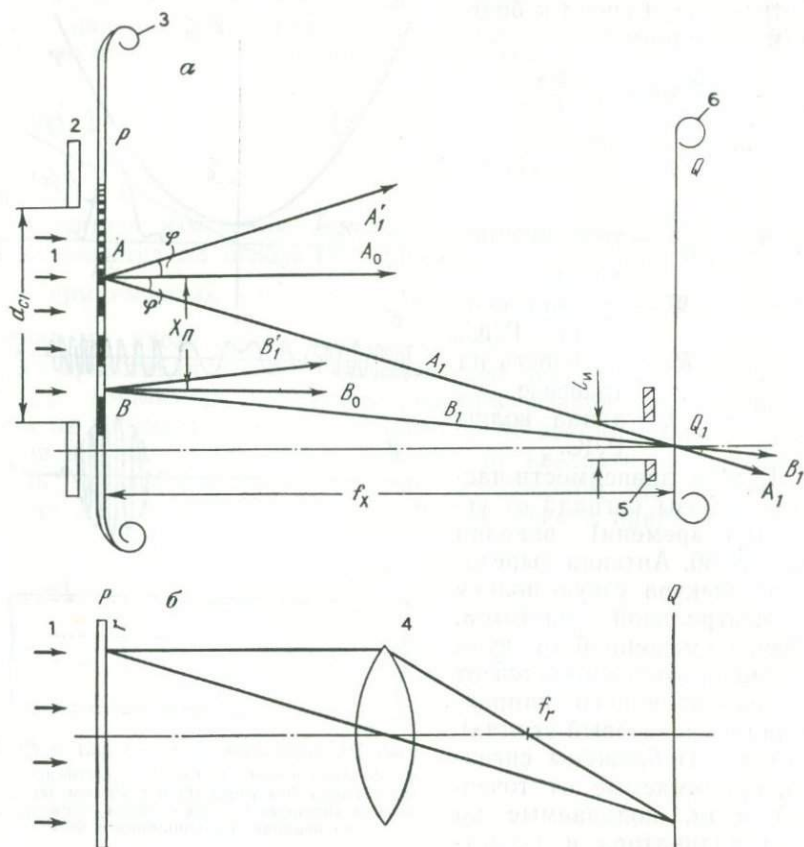


Рис. 31. Оптическая схема МОПИ в сечениях вдоль (а) и поперек (б) первичной фотопленки

Главным элементом МОПИ является аноморфная оптическая система, т. е. такая система, у которой оптические свойства различны по разным сечениям. В сечении поперек фотопленок (по наклонной дальности) оптическая система переносит изображение из плоскости первичной пленки P в плоскость вторичной пленки Q (рис. 31, б). Она может быть представлена как бесконечно тонкая линза с фокусным расстоянием f_r . Масштаб преобразования изображений определяется обычными формулами оптики и обычно выбирается равным $\Gamma_r = 1$.

В сечении оптической системы вдоль пленок происходит преобразование сигнала, записанного на первичной пленке, в радиолокационное изображение. Следует отметить, что этот процесс в принципе может происходить без оптических элементов, как как образовавшаяся на первичной пленке дифракционная ре-

шетка с переменным периодом (линейным изменением частоты) обладает свойством фокусирования. Однако получение приемлемых геометрических размеров устройства и равномерности изображения требует применения соответствующей оптики.

Рассмотрим процесс формирования изображения одиночной точечной цели сначала в устройстве без оптики. Эхо-сигнал, принятый от цели в процессе движения РЛС по траектории полета и имеющий вид (II.63), подается на индикатор и регистрируется на первичной фотопленке, протягиваемой со скоростью, пропорциональной путевой скорости РЛС:

$$V_{p.1.x} = \frac{W}{M_{1.x}}, \quad (II.65)$$

где $M_{1.x} = \frac{W}{v_{p.1.x}}$ — знаменатель масштаба записи сигнала на первичную пленку (вдоль линии пути).

Период дифракционной решетки на пленке определится частотой принимаемого сигнала и скоростью протяжки:

$$d = \frac{v_{p.1.x}}{F_d} \approx \frac{R_0 \lambda}{2x_1 M_{1.x}^2}, \quad (II.66)$$

где F_d — доплеровская частота принимаемого сигнала, связанная с параметрами движения РЛС выражением (II.64),

$x_1 = \frac{X}{M_{1.x}}$ — расстояние по первичной пленке, соответствующее перемещению РЛС от положения траверза цели до текущей точки на траектории полета.

Дифракция светового пучка на решетке вызовет появление ряда лучей, отклоненных от оси системы на угол φ , зависящий от периода решетки d и длины волны света λ_c . Угол отклонения определится из соотношения

$$d \cdot \sin \varphi = K \lambda_c, \quad (II.67)$$

где $K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Наиболее интенсивными из этих лучей будут нулевой (A_0 на рис. 31, а), соответствующий прохождению немодулированного света, и лучи первого порядка A_1 и A'_1 , угол отклонения которых определяется условием

$$\sin \varphi = \frac{\lambda_c}{d} = \frac{2x_1 M_{1.x}^2 \lambda_c}{R_0 \lambda}. \quad (II.68)$$

Наклонный луч A_1 пересечет оптическую ось системы в точке Q_1 , расстояние которой от первичной пленки будет равно (малость λ_c позволяет делать замену $\text{tg } \varphi \approx \sin \varphi \approx \varphi$):

$$f_x = \frac{x_1}{\text{tg } \varphi} \approx \frac{x_1}{\sin \varphi} \approx \frac{\lambda}{\lambda_c} \cdot \frac{R}{2M_{1.x}^2}. \quad (II.69)$$

Удаление точки пересечения оптической оси от первичной пленки не зависит от x_1 , т. е. оно одно и то же для любого участка первичной пленки в пределах существования записи от точечного сигнала. Это значит, что все наклонные лучи A_1, B_1 , образованные дифракционной решеткой переменного шага, будут пересекать ось в одной точке Q_1 . Световой пучок, составленный из этих лучей, — сходящийся. Расстояние точки фокусировки от первичной пленки f_x называется фокусом голограммы, которой является запись сигнала на первичной пленке. Пучок света, образованный лучами A'_1, B'_1 , отклоненными под зеркальными углами, — расходящийся, он исходит от мнимого фокуса, расположенного на расстоянии f_x перед пленкой.

Вторичная пленка, на которой выделяется изображение, помещается в плоскости Q , проходящей через точку фокусирования Q_1 . Перед ней ставится диафрагма B (вторичная цель), ограничивающая световой поток, экспонирующий вторичную пленку, и исключаяющая попадание на нее света от нулевого и рассеянного пучков.

При движении первичной пленки в процессе обработки информации изображение точки Q_1 будет перемещаться по плоскости Q , оставаясь всегда против точки на пленке, где цель находилась на траверзе. Если вторичную фотопленку перемещать с той же скоростью, что и первичную, экспозиция от цели будет попадать на одну и ту же точку вторичной пленки и будет накапливаться в пределах вторичной цели.

Выше была рассмотрена геометрия построения выходного изображения точечной цели. Разберем теперь этот процесс более подробно с позиций волновой оптики. Первичная фотопленка освещается плоским равномерным пучком монохроматического света с интенсивностью I_0 . Световой поток можно представить как электромагнитное колебание, характеризующееся амплитудой, частотой и фазой

$$e_0(t) = \epsilon_0 \cos(2\pi f_c t + \varphi_0), \quad (11.70)$$

где ϵ_0 — амплитуда светового колебания,

f_c — частота светового колебания,

φ_0 — начальная фаза.

Амплитуда светового колебания связана с освещенностью первичной фотопленки светом лазера соотношением

$$\epsilon_0 = \sqrt{2I_0}. \quad (11.71)$$

Свет, пройдя через первичную фотопленку, приобретает амплитудную модуляцию, причем интенсивность (мощность) света на выходе пропорциональна прозрачности фотопленки τ , а амплитуда — амплитудному пропусканию τ_e , равному квадратному корню из прозрачности

$$\tau_e = \sqrt{\tau} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0}. \quad (11.72)$$

Зависимость амплитудного пропускания фотопленки от напряжения на входе индикатора имеет нелинейный характер (см. рис. 22). При подаче на вход индикатора переменного напряжения сигнала с выхода приемника относительно рабочей точки $u_{\text{раб}}$, выбираемой на середине характеристики, световое колебание, прошедшее первичную пленку, будет иметь три основные составляющие: постоянную, немодулированную, определяемую средней прозрачностью пленки, сигнальную, пропорциональную записанному сигналу, и высшие гармоники, вызванные нелинейным характером зависимости коэффициента передачи от напряжения на входе индикатора. Обычно уровень сигнала на первичной пленке стараются выбирать таким образом, чтобы высшие гармоники, уменьшающие контраст выходного изображения и дающие ложные отметки от целей, не ухудшали заметно изображение. Поэтому при дальнейшем анализе мы их учитывать не будем*. Тогда световое колебание на выходе первичной пленки может быть представлено как функция времени и текущей координаты вдоль пленки x_1 , т. е. по апертуре (раскрыву) синтезированной антенны:

$$\begin{aligned}
 e_1(t, x_1) = & \varepsilon_0 \tau_{\varepsilon,0} \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t + \varphi_c) + \varepsilon_0 k_s \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t + \\
 & + \varphi_c) u_{\text{ц}} \cdot G(\alpha - \alpha_A) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot x_1^2 M_{1,x}^2}{R_0 \cdot \lambda} + \varphi\right) = \varepsilon_0 \cdot \tau_{\varepsilon,0} \cos(2\pi \cdot f_c \cdot \\
 & \cdot t + \varphi_c) + \frac{\varepsilon_0 \Delta \tau_{\varepsilon, \text{ц}}}{2} \cos\left(2\pi \cdot f_c \cdot t + \frac{2\pi M_{1,x}^2 \cdot x_1^2}{R_0 \cdot \lambda} + \varphi_c + \varphi\right) + \\
 & + \frac{\varepsilon_0 \Delta \tau_{\varepsilon, \text{ц}}}{2} \cdot \cos\left(2\pi \cdot f_c \cdot t - \frac{2\pi M_{1,x}^2 \cdot x_1^2}{R_0 \cdot \lambda} + \varphi_c - \varphi\right), \quad (II.73)
 \end{aligned}$$

где

$$\Delta \tau_{\varepsilon, \text{ц}} = k_s u_{\text{ц}}, \quad (II.74)$$

$\Delta \tau_{\varepsilon, \text{ц}}$ — модуляция амплитудного пропускания фотопленки, вызванная целью,

$\tau_{\varepsilon,0}$ — амплитудное пропускание фотопленки для постоянной составляющей (в рабочей точке — для малых сигналов или усредненное по кривой — для больших сигналов, попадающих в область нелинейностей),

k_s — крутизна зависимости амплитудного пропускания от амплитуды цели,

$u_{\text{ц}} = a_{\text{ц}} \cdot G(\alpha - \alpha_A)$ — амплитуда сигнала от цели на входе ФРУ (в дальнейшем можно принять для простоты диаграмму направленности реальной антенны РЛС равномерной в пределах апертуры синтезированной антенны $G(\alpha - \alpha_A) = 1$).

*Уровень помех, создаваемых высшими гармониками, даже при полном ограничении сигнала на пленке (при очень большом уровне входного сигнала) не очень велик и обычно ниже 20 дБ относительно уровня основного сигнала.

Выражение (II.73) показывает, что амплитудная модуляция светового колебания сигналом дает два световых пучка с квадратичным изменением фазы по раскрытию синтезированной антенны с противоположными значениями фаз — положительными и отрицательными*.

Световое колебание в любой точке плоскости вторичной пленки по принципу Гюйгенса определится суммированием световых колебаний вдоль светового окна с учетом их амплитуды и фаз и с учетом фазового запаздывания от данной точки первичной пленки до точки на вторичной плоскости. В частности, для точки Q_1 величина запаздывания составляет

$$\Delta t = \frac{A \cdot Q_1}{c} = \sqrt{\frac{f_x^2 + x_1^2}{c}} \approx \frac{f_x}{c} + \frac{x_1^2}{2f_x \cdot c} \quad (\text{II.75})$$

при $x_1 \ll f_x$, что обычно обеспечивается на практике. Вызываемый этим запаздыванием фазовый сдвиг будет равен

$$\Delta \varphi = 2\pi \cdot f_c \cdot \Delta t = -\frac{2\pi \cdot c \cdot \Delta t}{\lambda_0} = \Delta \varphi_0 - \frac{2\pi x_1^2}{2f_x \cdot \lambda_0}, \quad (\text{II.76})$$

где

$$\Delta \varphi_0 = -\frac{2\pi f_x}{\lambda_0}.$$

Световое колебание в точке Q_1 , образованное светом, прошедшим через первичную фотопленку на расстоянии x_1 от оси оптической системы, будет состоять также из трех составляющих, из которых в одной фазовый набег, вызванный прохождением радиоволн в пространстве, оказывается скомпенсированным запаздыванием света в оптической системе, т. е.

$$\frac{2\pi x_1^2 M_{1,x}^2}{R_0 \lambda} - \frac{2\pi x_1^2}{2f_x \lambda_c} = 0. \quad (\text{II.77})$$

Для этой составляющей все лучи, прошедшие первичную фотопленку, суммируются в одной фазе и дают максимальный сигнал на вторичной фотопленке, равный (по амплитуде)

$$e_{Q_1} = \frac{\varepsilon_0 \Delta \tau_{\text{вн}}}{\gamma} \cdot \frac{d_{c1}}{\delta x_n} = \frac{\varepsilon_0 \Delta \tau_{\text{вн}}}{2} N_x, \quad (\text{II.78})$$

где d_{c1} — размер окна вдоль первичной фотопленки, определяющий размер синтезированной антенны,

$\delta x_n = V_{\text{пр1}} T_n$ — размер вдоль первичной фотопленки, соответствующий одному периоду зондирующего сигнала,

$N_x = \frac{d_c}{WT_n}$ — число когерентно суммируемых импульсов при формировании синтезированной антенны.

* В реальных оптических устройствах может быть не только амплитудная, но и фазовая модуляция сигнала из-за неидеальности характеристик фотопленки. Для исключения этого явления фотопленку помещают в иммерсионную среду.

Интенсивность света, экспонирующего вторичную фотопленку (РЛИ), записывается в виде

$$I_{ц} = \frac{1}{2} \varepsilon Q_1^2 = I_0 \frac{\Delta \tau_{\text{ли}}^2 N_x^2}{4}. \quad (\text{II.79})$$

Остальные составляющие, нулевая и зеркальная, суммируются не в фазе и дают малые уровни интенсивностей света на РЛИ.

Формула для фокуса голограммы f_x , определяемая решением уравнения (II.77), естественно совпадает с полученной ранее из геометрических соображений (II.69).

Ширина отметки от цели в плоскости вторичной фотопленки определяется шириной дифракционного пучка и, так же как для обычной антенны, выражается через апертуру пучка d_{c1} , длину волны света λ_c и расстояние до плоскости наблюдения f_x ; она может быть вычислена по формуле

$$\delta x_1 \approx \frac{f_x \cdot \lambda_c}{d_{c1}}. \quad (\text{II.80})$$

Если пересчитать это соотношение к размерам в пространстве обзора и учесть, что размеру светового пучка в системе соответствует длина участка траектории полета РЛС, на котором производится когерентное суммирование сигнала (длина синтезированной антенны $d_c = d_{c1} \cdot M_{1x}$), то разрешение, обеспечиваемое такой системой на местности, будет составлять:

$$\delta X = \delta x_1 \cdot M_{1x} \approx \frac{R_0 \lambda}{2d_c}. \quad (\text{II.81})$$

Это и есть формула разрешения РСА вдоль линии пути, отличающаяся от формулы для обычной РЛС БО коэффициентом 2 в знаменателе, который объясняется тем, что сигнал в процессе полета РЛС по траектории проходит дважды расстояние от РЛС до цели, получая двойной фазовый набег.

Рассмотрим теперь процесс обработки в динамике. При движении первичной пленки относительно окна отметка на вторичной плоскости будет перемещаться с той же скоростью. При этом в формировании синтезированной диаграммы будут участвовать новые участки записанного на первичной пленке сигнала (предполагается, что длина синтезированной антенны меньше длительности сигнала на первичной пленке). Движение вторичной пленки синхронно с движением первичной, поэтому отметка от цели будет регистрироваться в одной и той же точке. Однако получение информации от цели с другого участка траектории, под другими ракурсами приведет, как и в РЛС БО, к некогерентному накоплению сигнала и усреднению флюктуаций для целей, имеющих сложную конфигурацию, и для фона местности. Степень усреднения определится числом независимых накапливаемых образцов сигнала [76]

$$N = \frac{2L_n}{d_c} + 1, \quad (\text{II.82})$$

где L_n — длина участка накопления сигнала, она равна ширине вторичной цели, пересчитанной к местности $L_n = l_{н.1} \cdot M_{1,x}$,

d_c — длина синтезированной антенны, которая определяет интервал корреляции флюктуаций сигналов от фона местности.

В частности, если сигнал, принятый антенной РЛС, используется полностью $L_n = \frac{R\lambda}{d_A} d_c$, число независимых образцов сигнала составит:

$$N = \frac{2R\lambda}{d_A \cdot d_c} - 1. \quad (II.83)$$

Сравнение приведенного выражения с выражением (II.57) показывает, что РСА имеют худшие градационные характеристики, чем РЛС БО (обычно $d_c \geq d_A$), причем в случае, если весь принимаемый сигнал используется для формирования синтезированной антенны для получения максимального разрешения $d_c = \frac{R\lambda}{d_A}$, $L_n = 0$, некогерентное накопление отсутствует ($N = 1$) и выходное изображение имеет более ярко выраженный флюктуационный характер.

Выше был рассмотрен процесс формирования выходного изображения РСА в устройстве обработки без оптики. Однако реальные размеры такого устройства оказываются очень большими и не могут быть осуществлены на практике. Кроме того, фокусное расстояние голограммы оказывается зависящим от дальности целей и поэтому для фокусирования всех дальностей на вторичной пленке ее плоскость должна быть наклонена относительно оптической системы. Углы наклона в устройстве без оптики также оказываются нереализуемыми на практике (1° и менее к оси системы). Для сокращения геометрических размеров системы применяют телескопический объектив [55], который не меняет угловых соотношений в системе, но уменьшает масштаб выходного изображения пропорционально увеличению телескопа Γ_x и сокращает фокусное расстояние голограммы пропорционально квадрату увеличения, равного

$$\Gamma_x = \frac{f_{x_2}}{f_{x_1}}, \quad (II.84)$$

где f_{x_1} , f_{x_2} — фокусные расстояния первой и второй линз в сечении вдоль пленки.

Одновременно обеспечивается равномерность изображения по поперечной и наклонной дальностям. Ход лучей в телескопической оптической системе показан на рис. 32, а. Пунктиром изображены лучи, которые отклонены дифракционной решеткой, образованной сигналом, при отсутствии оптической системы. Для наглядности построение сделано от нулевых доплеров-

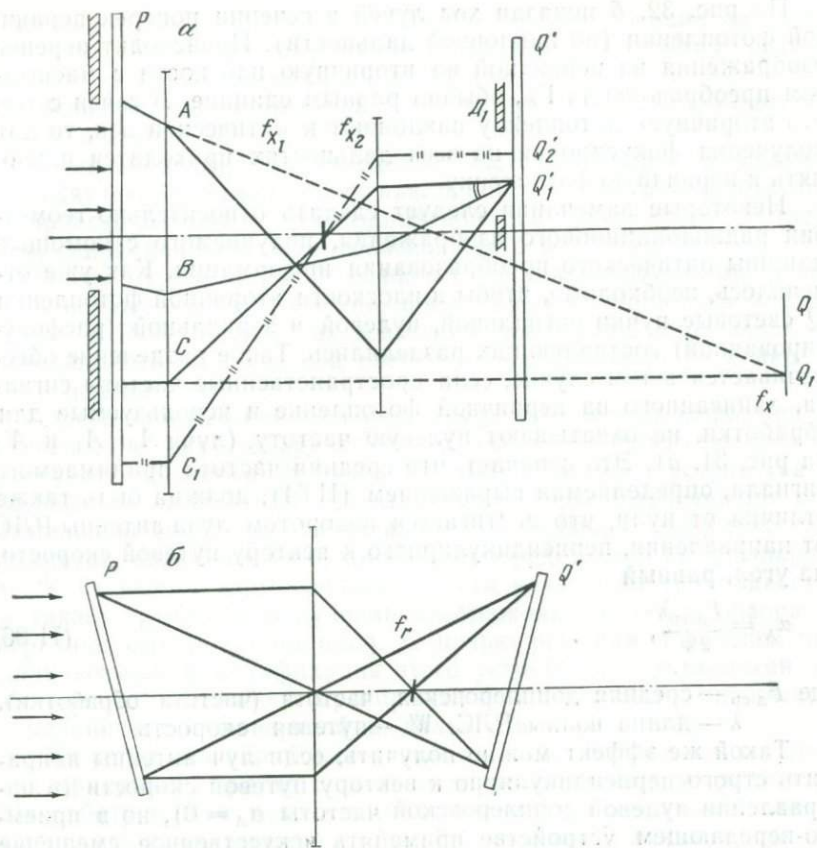


Рис. 32. Оптическая схема и ход лучей в телескопической МОПИ вдоль (а) и поперек (б) фотопленки

ских частот (когда цель на траверзе — точка C), хотя на практике обработка производится вдали от нулевых частот. Оптическая система переносит изображение целей из плоскости Q в плоскость Q_1 , соответственно меняя и масштаб изображения. При движении первичной пленки точка C переходит в C_1 , отметка от цели — из Q_1 в Q_2 .

Освещенность вторичной пленки от цели будет определяться приведенным ранее выражением (II.79) с учетом коэффициента передачи оптической системы $k_{\text{опт}}$ (в этот коэффициент можно включить постоянные параметры оптической системы):

$$I_{\text{ц}} = I_0 k_{\text{опт}} \Delta \tau_{\text{э.ц}}^2 = I_0 k_{\text{опт}} k_s^2 u^2, \quad (\text{II.85})$$

причем в случае отсутствия потерь в оптической системе $k_{\text{опт}} = \frac{1}{4} N_x^2$.

На рис. 32, б показан ход лучей в сечении поперек первичной фотопленки (по наклонной дальности). Происходит перенос изображения из первичной во вторичную плоскости с масштабом преобразования Γ_R , обычно равным единице. В связи с тем что вторичную фотопленку наклоняют к оптической оси, то для получения фокусировки на всех дальностях приходится наклонять и первичную фотопленку.

Некоторые замечания следует сделать относительно геометрии радиолокационного изображения, получаемого с помощью машины оптического преобразования информации. Как уже отмечалось, необходимо, чтобы в плоскости вторичной фотопленки Q световые пучки сигнальной, нулевой и зеркальной (расфокусированной) составляющих разделялись. Такое разделение обеспечивается в том случае, если пространственные частоты сигнала, записанного на первичной фотопленке и используемые для обработки, не охватывают нулевую частоту (лучи A_0 , A_1 и A'_1 на рис. 31, а). Это означает, что средняя частота принимаемого сигнала, определяемая выражением (11.64), должна быть также отлична от нуля, что достигается поворотом луча антенны РЛС от направления, перпендикулярного к вектору путевой скорости, на угол, равный

$$\alpha_A = \frac{F_{д.ср} \lambda}{2W}, \quad (11.86)$$

где $F_{д.ср}$ — средняя доплеровская частота (частота обработки), λ — длина волны РЛС, W — путевая скорость.

Такой же эффект можно получить, если луч антенны направить строго перпендикулярно к вектору путевой скорости (в направлении нулевой доплеровской частоты $\alpha_A = 0$), но в приемно-передающем устройстве применять искусственное смещение сигнала по частоте на требуемую величину.

Следует отметить, что при обоих способах система обзора становится косоугольной и появляются искажения изображения. При отвороте антенны изменяется масштаб изображения по горизонтальной дальности поперек линии пути, что вызывается смещением целей по наклонной дальности на величину

$$\Delta R_\alpha = R_0 \frac{1 - \cos \alpha_A}{\cos \alpha_A} \approx \frac{R_0 \alpha_A^2}{2}, \quad (11.87)$$

где R_0 — наклонная дальность на траверзе.

Смещение целей по путевой дальности определяется необходимым поворотом оптической системы для компенсации изменения наклонной дальности цели в пределах интервала обработки сигнала. Этот поворот составляет

$$\alpha_{опт} = \alpha_A \frac{M_{1.K}}{M_{1.x}}, \quad (11.88)$$

где $M_{1,x}$ и $M_{1,R}$ — знаменатели масштабов регистрации сигналов на первичной фотопленке по линии пути и наклонной дальности.

Величина $\alpha_{\text{опт}}$ и определяет угол между осями координат, который составит $90^\circ - \alpha_{\text{опт}}$.

Если используется смещение частоты сигнала в приемопередатчике, искажения по наклонной дальности отсутствуют, а происходит поворот координатной оси на угол α , соответствующий значению доплеровской частоты (II.64).

Здесь отмечены лишь основные составляющие геометрических искажений изображения при оптической обработке информации в РСА. Кроме них возможны искажения, определяемые aberrациями в оптической системе и зависящие от ее конкретного исполнения.

Испытанная машина оптического преобразования информации относится к типу дифрактометров или спектроанализаторов с когерентным светом. К этому же типу относятся устройства с конической линзой [20]. Спектроанализаторы обеспечивают оптимальную обработку сигнала, имеют большой динамический диапазон, получают изображение непосредственно по фотопленке. К их недостаткам следует отнести некоторую громоздкость, а также трудность получения изображения в темпе обзора и передачи его по радиолинии. С целью решения последней задачи возможна модификация этого устройства с установкой на выходе телевизионного преобразователя либо фотоумножителя с механической разверткой по дальности [47].

Из устройств обработки сигналов РСА, основанных на других принципах, кратко остановимся на цифровых устройствах. Их работу можно пояснить на примере функциональной схемы вычислителя, показанной на рис. 33 (вопросы реализации такого вычислителя не рассматриваются, а только указывается характер выполняемых преобразований сигнала). В отличие от оптических устройств обработки, в которых выделяется сигнал на частоте, отличной от нуля, в цифровых вычислителях целесообразно вести обработку на нулевой частоте. Для этого в приемнике предусматривается дополнительный выход, с которого снимается сигнал, сдвинутый по фазе на 90° относительно сигнала с первого выхода. Иначе говоря, для обработки используются две квадратурные составляющие сигнала — косинусная с первого выхода и синусная со второго выхода.

Таким образом, на вход цифрового устройства обработки в каждый период зондирования поступают две последовательности сигнала, синусная и косинусная, характеризующие распределение амплитуд и фаз сигналов, отраженных от наблюдаемого участка местности. В устройстве обработки эти сигналы квантуются по уровню и времени, а затем выполняются операции их линейной фильтрации и выделения огибающей.

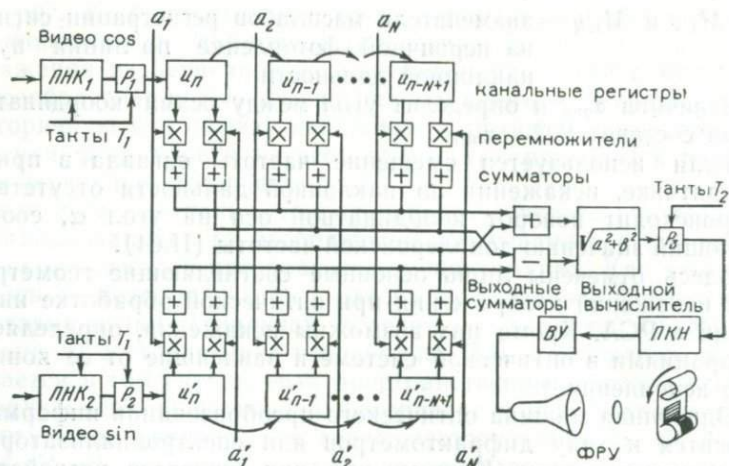


Рис. 33.

Оптимальная обработка сигнала с неизвестной начальной фазой, обеспечивающая максимальное отношение сигнал/шум на выходе, реализуется взвешенным суммированием составляющих сигналов и затем квадратурным сложением составляющих

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{\left\{ \sum_{k=1}^{N_x} (\bar{a}_k u_{c,n-k} + a'_k u_{s,n-k}) \right\}^2 + \dots + \left\{ \sum_{k=1}^{N_x} (a_k u_{s,n-k} - a'_k u_{c,n-k}) \right\}^2} \quad (\text{II.89})$$

где u_c и u_s — отсчеты мгновенного значения составляющих сигнала в каждом периоде зондирования,

a_k и a'_k — взвешивающие коэффициенты, определяющие алгоритм обработки,

N_x — число когерентно суммируемых импульсов*.

Для оптимальной фильтрации коэффициенты a_k и a'_k должны с точностью до постоянного амплитудного множителя совпадать с видом сигнала, принимаемого от одиночной точечной цели в последовательных периодах зондирования, отсчитываемых по шкале времени назад (во временной зависимости сигнала нужно заменить t на $t_0 - t$, где t_0 — произвольная начальная точка отсчета времени).

Цифровое устройство обработки представляет многоканальный вычислитель, в каждом канале которого производится линейная фильтрация сигнала, соответствующего определенной

* В дальнейшем для упрощения записи индекс при N будем опускать.

дальности цели. Каждый канал дальности состоит из двух массивов памяти для двух составляющих сигнала.

На входе вычислителя для каждой составляющей сигнала стоит преобразователь напряжение — код (ПНК₁ и ПНК₂), работающий с тактовой частотой, превышающей удвоенную максимальную частоту сигнала (условие передачи информации, согласно теореме Котельникова). На выходе ПНК образуются коды, соответствующие мгновенным значениям сигнала в момент прихода тактового импульса. Эти коды через распределители P_1 и P_2 , управляемые от того же тактового генератора, поступают на регистры каналов дальности. Число каналов дальности определяется полосой обзора $\Delta R_{\text{обз}}$ и периодом тактов T ,

$$k = \frac{2\Delta R_{\text{обз}}}{cT}, \quad (\text{II.90})$$

где c — скорость света.

Число разрядов в преобразователе напряжение — код и регистров в каналах дальности определяется числом уровней квантования входного сигнала (обычно выбирается в пределах 8—16 уровней и знак).

Каждый канал дальности включает в себя два массива по N канальных регистров, число которых определяется числом зондирующих импульсов, принимаемых за время формирования синтезированной антенны

$$N = \frac{d_c}{WT_n}, \quad (\text{II.91})$$

где W — путевая скорость,
 T_n — период зондирования.

Канальные регистры связаны между собой так, что записанные в них коды передаются последовательно из регистра в регистр. Поэтому при поступлении от приемника сигнала n -го периода зондирования в каждом канале дальности запоминаются коды: в первом регистре — n -го периода зондирования, во втором — $(n-1)$ -го, в третьем — $(n-2)$ -го и так далее. Коды регистра умножаются на известные коэффициенты a_k и $a_{k'}$, хранящиеся в постоянном запоминающем устройстве вычислителя и суммируются на выходных регистрах с соответствующим знаком, определяемым алгоритмом обработки (II.89). Последующая операция — выделение огибающей, как корня из суммы квадратов составляющих, выполняется в выходном вычислителе. В результате вычислений на выходе каждого канала дальности образуется число, характеризующее значение огибающей сигнала на данной дальности. Выход каждого канала дальности опрашивается распределителем P_3 с тактовой частотой, которая может быть значительно меньше тактовой частоты входного устройства, так как в процессе обработки устраняется избыточность информации, заключенная в принимаемом сигнале. Коды с

распределителя P_3 поступают в преобразователь код — напряжение (ПКН), где они превращаются в видеосигнал, несущий информацию изображения местности.

Выходной вычислитель кроме операции квадратурного суммирования может выполнять также операцию логарифмирования для согласования динамического диапазона выходных сигналов с динамическим диапазоном индикатора, подобно тому, как это выполнялось для некогерентных РЛС.

Для иллюстрации работы цифрового устройства обработки в РСА рассмотрим преобразование в нем сигналов для одиночной точечной цели. Сигналы на входе вычислителя имеют вид (см. II.63)

$$u_{c,n} = k u_{\text{ц}} G \left(\frac{Wt}{R_0} - \alpha_A \right) \cos \left(\frac{2\pi W^2 t^2}{R_0 \lambda} + \varphi \right) = u_{\text{ц}} G \left(\frac{WT_{\text{п}} n}{R_0} \right) \cos (pn^2 + \varphi), \quad (\text{II.92})$$

$$u_{s,n} = u_{\text{ц}} G \left(\frac{WT_{\text{п}} n}{R_0} \right) \sin (pn^2 + \varphi), \quad (\text{II.93})$$

где n — порядковый номер зондирования,

$T_{\text{п}}$ — период зондирования.

$$p = \frac{2\pi W^2 T_{\text{п}}^2}{R_0 \lambda}.$$

Здесь произведена замена $t = n \cdot T_{\text{п}}$, принято $k = 1$ и учтено, что обработка ведется на нулевой частоте $\alpha_A = 0$.

В дальнейшем для простоты амплитудный множитель, характеризующий диаграмму антенны РЛС, будем опускать, так как влияние его на формирование диаграммы синтезированной антенны невелико. Тогда взвешивающие коэффициенты при оптимальной обработке можно записать в виде (начальная фаза также может быть опущена)

$$\left. \begin{aligned} a_k &= B \cos p \left(\frac{N}{2} - k \right)^2 \\ a'_k &= B \sin p \left(\frac{N}{2} - k \right)^2 \end{aligned} \right\}, \quad (\text{II.94})$$

где B — постоянный амплитудный множитель (примем $B = 1$),

N — число суммируемых импульсов (принято $t_0 = \frac{NT_{\text{п}}}{2}$).

Вычислим составляющие, входящие в выражение (II. 89):

$$\begin{aligned} a &= \sum_{k=1}^N (a_k u_{c,n-k} + a'_k u_{s,n-k}) = \sum_{k=1}^N \left\{ \cos p \left(\frac{N}{2} - k \right)^2 \times \right. \\ &\times u_{\text{ц}} \cos [p(n-k)^2 + \varphi] + \sin p \left(\frac{N}{2} - k \right)^2 \cdot u_{\text{ц}} \sin [p(n - \\ &\left. - k)^2 + \varphi] \right\} = u_{\text{ц}} \sum_{k=1}^N \cos (2pn_1 k - \varphi'), \end{aligned} \quad (\text{II.95})$$

$$\begin{aligned}
 b &= \sum_{k=1}^N (a_k u_{s,n-k} - a' u_{c,n-k}) = \sum_{k=1}^N \left\{ \cos p \left(\frac{N}{2} - k \right)^2 \times \right. \\
 &\times u_{\text{н}} \sin [p(n-k)^2 + \varphi] + \sin p \left(\frac{N}{2} - k \right)^2 \cdot u_{\text{н}} \cos [p(n-k)^2 + \\
 &\left. + \varphi] \right\} = u_{\text{н}} \sum_{k=1}^N \sin (2pn_1 k - \varphi'), \quad (\text{II.96})
 \end{aligned}$$

где $n_1 = n - \frac{N}{2}$,

$$\varphi' = \varphi + p \left(n^2 - \frac{N^2}{4} \right).$$

Здесь произведено разложение произведения тригонометрических функций в их сумму и приведены подобные члены.

Для выполнения операции суммирования и последующего квадратурного сложения удобно перейти к комплексным числам, выразив их через тригонометрические функции

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha, \quad \cos \alpha = \frac{e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}}{2}, \quad \sin \alpha = \frac{e^{j\alpha} - e^{-j\alpha}}{2}. \quad (\text{II.97})$$

Тогда амплитуда выходного сигнала определится как модуль комплексного числа

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{a^2 + b^2} = |a + jb| = |z|, \quad (\text{II.98})$$

где

$$\begin{aligned}
 z &= a + jb = u_{\text{н}} \sum_{k=1}^N \left\{ \cos (2pn_1 k - \varphi') + j \sin (2pn_1 k - \varphi') \right\} = \\
 &= u_{\text{н}} \sum_{k=1}^N e^{j(2pn_1 k - \varphi')}.
 \end{aligned}$$

Значение суммы легко вычисляется по формуле геометрической прогрессии, откуда можно перейти к синусоидальным величинам

$$\begin{aligned}
 z &= u_{\text{н}} e^{-j\varphi'} \sum_{k=1}^N e^{j2pn_1 k} = u_{\text{н}} e^{j2pn_1 - j\varphi'} \frac{e^{j2pn_1 N} - 1}{e^{j2pn_1} - 1} = u_{\text{н}} e^{jpn_1(N+1) - j\varphi'} \times \\
 &\times \frac{\sin pn_1 N}{\sin pn_1}. \quad (\text{II.99})
 \end{aligned}$$

Модуль комплексного числа определится отбрасыванием фазового множителя

$$U_{\text{вых}} = |z| = u_{\text{н}} \frac{\sin pn_1 N}{\sin pn_1} \approx u_{\text{н}} N \frac{\sin \frac{2\pi d_c X}{R\lambda}}{\frac{2\pi d_c X}{R\lambda}}, \quad (\text{II.100})$$

где $X = WT_n n_1 = WT_n \left(n - \frac{N}{2} \right)$ — смещение цели по линии пути относительно направления максимума отраженного сигнала, $d_c = WT_n N$ — длина синтезированной антенны. Приближенное равенство соответствует замене в знаменателе синуса на значение его аргумента, что допустимо при больших N .

Следует отметить, что был рассмотрен так называемый алгоритм с равномерным амплитудным взвешиванием $B=1$ в коэффициентах a_k, a_k (см. выражение (II.94)). Его недостаток — большой уровень боковых лепестков, которые могут дать на изображении ложные отметки от целей. Возможны и другие алгоритмы, лишенные этого недостатка, ценой некоторого расширения и уменьшения уровня главного лепестка. Максимальное значение выходного сигнала соответствует $n_1=0$ или $X=0$. Квадрат отношения текущего значения сигнала от цели к максимальному определяет диаграмму синтезированной антенны

$$G(X) = \frac{U_{\text{вых}}(X)}{U_{\text{вых}}(0)} = \left(\frac{\sin \frac{2\pi d_c X}{R\lambda}}{\frac{2\pi d_c X}{R\lambda}} \right). \quad (\text{II.101})$$

Рассмотренное выражение (II.101) относится к оптимальной обработке сигнала, эквивалентной той, которая происходит в оптическом устройстве обработки. Ее также называют фокусированной обработкой, имея в виду, что алгоритм обработки зависит от дальности цели, что в оптическом устройстве обработки обеспечивает фокусирование луча на определенную дальность (плоскость Q' на рис. 32). Возможна также упрощенная обработка (ее называют нефокусированной), при которой в вычислителе выполняется простое невзвешенное суммирование каждой из составляющих и последующее их квадратурное сложение. Это позволяет исключить перемножители и два канала сумматоров в вычислителе, что значительно сокращает объем потребного оборудования. Составляющие выходного сигнала для нефокусированной обработки принимают вид

$$a = u_{\text{и}} \sum_{k=1}^N \cos [p(n-k)^2 + \varphi], \quad (\text{II.102})$$

$$b = u_{\text{и}} \sum_{k=1}^N \sin [p(n-k)^2 + \varphi], \quad (\text{II.103})$$

$$z = a + jb = u_{\text{и}} e^{i\varphi} \sum_{k=1}^N e^{ip(n-k)^2}. \quad (\text{II.104})$$

При достаточно малых $p \ll \frac{\pi}{4}$ сумма стремится к интегралу Френеля. Наличие квадратичных составляющих в фазовом множителе суммируемых членов приводит к тому, что возрастание амплитуды

выходного сигнала, отношения сигнал/шум и разрешающей способности происходит только до определенного значения N , при котором фазовый сдвиг на краях синтезированной антенны приблизительно равен $\frac{\pi}{4}$, т. е.

$$\rho \frac{N^2}{4} = \frac{\pi}{4}. \quad (\text{II.105})$$

Откуда с учетом (II.100 и II.101) получаем соотношение для длины синтезированной антенны и разрешения по линии пути $d_c = \sqrt{R\lambda}$, $\delta X = \frac{\sqrt{R\lambda}}{2}$. Указанный предел разрешающей способности является существенным недостатком нефокусированной обработки, в связи с чем она находит ограниченное применение в РСА.

Основное преимущество цифровых вычислителей для обработки информации в РЛС с синтезированной антенной заключается в том, что они могут обрабатывать информацию в темпе полета РЛС и преобразовывать ее в сигналы изображения, пригодные для передачи по радиолинии или для непосредственной индикации на борту летательного аппарата. Другие преимущества — отсутствие геометрических искажений, связанных с работой на ненулевой доплеровской частоте и возможность получения очень большого динамического диапазона выходного сигнала, что определяется только разрядностью выходных регистров в каналах дальности. Кроме того, они в отличие от оптических устройств с непосредственной индикацией изображения на фотопленке позволяют согласовать динамические диапазоны сигнала и индикатора.

Недостаток цифровых вычислителей для РСА — сложность реализации некогерентного накопления, а также необходимость обеспечения большого быстродействия и оперативной памяти, тем больших, чем больше разрешающая способность РСА по линии пути. Эти требования не всегда могут быть реализованы на практике.

§ 8. Прохождение радиолокационных сигналов через тракт РСА

В предыдущих разделах было отмечено сходство процессов получения разрешающей способности вдоль траектории полета в РЛС бокового обзора с реальной и синтезированной антеннами. В обоих случаях речь идет о линейном преобразовании (фильтрации) эхо-сигналов, отраженных от элементов подстилающей поверхности и характеризующихся амплитудным и фазовым распределениями электромагнитного поля (или его выражения в форме сигналов) по раскрытию реальной или синтези-

рованной антенн, которые определяются энергетическими характеристиками системы и геометрическими соотношениями в пространстве обзора.

Это сходство продолжается и в энергетических характеристиках сигнала от наблюдаемых целей на выходе линейного фильтра. Так, для некогерентной РЛС мы имеем линейную зависимость мощности сигнала на входе приемника (выходных зажимах антенны) от эффективной площади рассеяния наблюдаемых элементов подстилающей поверхности. В РСА мы имеем такую же линейную зависимость (для мощности сигнала на выходе устройства обработки) интенсивности света, экспонирующего вторичную фотопленку в МОПИ, или мощности сигнала на выходе преобразователя код — напряжение, как и в цифровом вычислителе.

Указанная линейная зависимость мощности сигнала от ЭПР целей была бы полной в обоих случаях, если рассматривать идеальные системы без шумов и нелинейности, учет которых и определяет специфику различия некогерентных РЛС и РСА. В некогерентных РЛС к принимаемым от местности сигналам добавляются тепловые шумы антенны и приемного устройства (будем называть их шумами приемника). Эти шумы распределены в очень широкой полосе частот, не зависят от вида и уровня процесса на входе приемника и носят аддитивный характер, т. е. независимо добавляются к мощности полезного сигнала.

Влияние аддитивного теплового шума на градационные характеристики выходного сигнала может быть учтено увеличением эффективной площади рассеяния целей на величину эквивалентной энергии шумов, определяемой соответствующим отношением мощностей шумов и сигнала от местности. Практически наличие шумов сказывается только в наблюдаемости элементов с малой ЭПР — ухудшаются контрасты на водной поверхности и контраст вода — суша.

В РСА кроме шумов приемника (антенны), влияние которых такое же, как и в некогерентных РЛС, необходимо учитывать шумы, вносимые устройством обработки, и нелинейности в тракте, предшествующем операции формирования синтезированной антенны. В общем случае при запоминании и обработке информации действуют не только аддитивные (независимые от сигнала), но и мультипликативные шумы, вызываемые воздействием сигнала на аппаратуру (фазовые и модуляционные шумы).

Источниками дополнительных аппаратурных шумов в РСА с оптической обработкой информации могут быть флуктуации яркости индикатора бортового фоторегистрирующего устройства, зернистость и неравномерность оптической толщины первичной фотопленки, рассеянный свет в оптической системе МОПИ, шумы телевизионного преобразователя или фотоумножителя и

выходного индикатора (при их наличии в системе), шумы вторичной фотопленки. В РСА с цифровой обработкой дополнительными шумами являются шумы квантования в преобразователе напряжения — код, шумы выходного регистрирующего устройства.

Для приближенных оценок можно полагать действие шумов обработки аддитивным, пренебрегая их зависимостью от принимаемого сигнала. Для случаев практического применения РЛС землеобзора такое допущение вполне оправдывается.

По аналогии с регистрирующим устройством РЛС БО можно говорить о динамическом диапазоне устройств записи и обработки информации в РСА, понимая под ним отношение максимальной и минимальной амплитуд (или мощностей) сигналов, которые могут однозначно и одновременно обрабатываться в системе [20]. Максимальный сигнал в системе обычно ограничен нелинейностью амплитудной характеристики или другими физическими факторами. Минимальный сигнал ограничивается собственными шумами устройства.

Если рассматривать запись сигналов на фотопленке и их оптическую обработку, причиной собственных шумов являются зернистость фотоэмульсии, абберация в оптике, объемное рассеяние света в стекле, рассеяние света на оправках, пыли, царапинах и т. п. При этом характеристики выходного сигнала будут совместно определяться параметрами как ФРУ, так и МОПИ. Поэтому их удобно рассматривать как единое целое — тракт обработки, входом которого является вход индикатора ФРУ, а выходом — световой поток, экспонирующий вторичную фотопленку.

Динамический диапазон сигналов на выходе тракта обработки определяется многими факторами:

— амплитудной характеристикой тракта, т. е. зависимостью амплитудного пропускания фотопленки от напряжения на входе индикатора;

— выбором рабочей точки на амплитудной характеристике;

— уровнем шумов индикатора и фотопленки в выбранной рабочей точке;

— значением пространственных частот, на которых выделяются сигналы от целей (они определяются отворотом антенны от траверза), при увеличении пространственных частот шумы пленки падают, но вместе с тем падает и коэффициент передачи системы;

— уровнем сигнала на входе индикатора;

— характером наблюдаемого сюжета.

Особенно важным является выбор уровня сигнала на входе индикатора ФРУ, так как это определяет не только динамический диапазон системы, но и связь отражающей способности местности с тоном изображения. При малых сигналах используется линейный участок амплитудной характеристики ФРУ

(см. рис. 22) и сохраняется пропорциональность между интенсивностью светового пучка от цели в устройстве обработки и мощностью отраженного сигнала. Однако слабые цели будут маскироваться шумами обработки. При увеличении уровня сигнала на входе индикатора интенсивность целей на выходе тракта обработки будет возрастать, хотя и не пропорционально из-за влияния нелинейностей. Одновременно улучшится наблюдаемость слабых целей на фоне шумов обработки. Однако наличие нелинейностей приведет к появлению гармоник целей и биений. Пока уровень сигнала на входе индикатора не очень велик, гармоники и биения будут ниже уровня шумов обработки и не приведут к ухудшению качества изображения. При дальнейшем росте сигнала на входе индикатора уровень гармоник и биений возрастет, что приведет к появлению ложных отметок от целей и ухудшению контрастов воспроизведения градаций сигнала. В этом случае слабые цели могут быть перепутаны с ложными отметками, что приведет к ухудшению их обнаруживаемости.

Таким образом, существует некоторое оптимальное значение уровня входного сигнала, обеспечивающее наилучшее одновременное воспроизведение сильных и слабых целей на фоне шумов обработки и биений, вызванных нелинейностями, т. е. обеспечивающее наибольший динамический диапазон передаваемых сигналов.

Рассмотрим преобразование интенсивностей сигналов от целей при прохождении их через тракт обработки. Учитывая, что влияние нелинейности зависит от характера наблюдаемого сюжета, будем рассматривать несколько типичных ситуаций: наблюдение одиночной цели на малоотражающей поверхности, наблюдение пары целей с различной отражающей способностью на неотражающем фоне и случай слабой цели или элемента поверхности с заданной ЭПР, окруженного фоном с интенсивным отражением.

Уровень собственного шума тракта обработки определим отношением интенсивности максимального полезного сигнала от одиночной точечной цели $I_{ц. max}$ к интенсивности (средней) шумов $I_{ш}$ на выходе устройства обработки. Назовем это отношение собственным динамическим диапазоном тракта обработки

$$D_0 = \frac{I_{ц. max}}{I_{ш}}. \quad (II.106)$$

Величина динамического диапазона тракта обработки может быть определена экспериментально записью на ФРУ сигнала, имитирующего одиночную точечную цель, при изменении амплитуд сигнала от минимального значения, когда цель на выходе по интенсивности равняется шуму (мощность суммарного сигнала удваивается), до максимального значения, когда дальнейшее увеличение входного сигнала не увеличивает уровень выходного сигнала. Минимальная амплитуда входного сигнала

определился из выражения (II.85), в котором нужно принять $I_{ц, \min} = I_{ш}$

$$u_{ц, \min} = \sqrt{\frac{I_{ш}}{I_0 k_{\text{опт}} k_S^2}}, \quad (\text{II.107})$$

где k_S — крутизна амплитудного пропускания,
 $I_{ш}$ — интенсивность шумов на выходе устройства обработки,
 I_0 — интенсивность падающего света,
 $k_{\text{опт}}$ — коэффициент передачи оптической системы.

Увеличение амплитуды сигнала на входе ФРУ приводит к увеличению интенсивности выходного сигнала, однако по мере захода в область нелинейности амплитудной кривой коэффициент передачи ФРУ k_S будет уменьшаться и рост выходного сигнала замедлится. Предел выходного сигнала наступит при полном использовании амплитудной характеристики ФРУ от уровня вуали $\tau_{\varepsilon, \text{в}}$ до минимума $\tau_{\varepsilon, \text{мин}}$ (см. рис. 22). Как было указано, входной сигнал представляет собой синусоидальный процесс с линейным изменением частоты. При очень большом уровне сигнала на входе будет происходить ограничение и изменение амплитудного пропускания пленки примет вид прямоугольных импульсов, соответствующих положительным и отрицательным полуциклам синусоиды. Освещенность вторичной фотопленки определится полным размахом модуляционной характеристики* (см. рис. 22)

$$I_{ц, \max} = I_0 k_{\text{опт}} \left(\frac{4}{\pi} \Delta \tau_{\varepsilon} \right)^2, \quad (\text{II.108})$$

где $\frac{4}{\pi}$ — коэффициент, учитывающий ограничение сигнала (уровень первой гармоники для прямоугольных колебаний при идеальном ограничении).

Примерный график зависимости интенсивности выходного сигнала от уровня входного сигнала показан на рис. 34. График имеет два характерных участка: линейный, нарастающий при малом уровне сигнала, и участок ограничения, на котором интенсивность выходного сигнала стремится к максимальному уровню. В частности, на первом участке

$$I_{ц} (u_{\text{вх}}) = I_0 k_{\text{опт}} k_S^2 (0) u_{\text{вх}}^2, \quad (\text{II.109})$$

где $k_S (0)$ — коэффициент передачи ФРУ при малых сигналах, его можно найти, аппроксимируя амплитудную характеристику ФРУ линейно-ломаной кривой,

$$k_S (0) = \frac{\Delta \tau_{\varepsilon}}{u_{\text{огр}}}, \quad (\text{II.110})$$

* Максимальную освещенность вторичной фотопленки можно также выразить через дифракционную эффективность η_{max} первичной фотопленки $I_{\text{max}} = I_0 k_{\text{опт}}^4 \eta_{\text{max}}$.

здесь $u_{огр}$ — размах амплитудной характеристики ФРУ (для рассмотренного примера)

$$\Delta\tau_\varepsilon = 0,33, u_{огр} = 0,2\text{В}, k_S(0) = \frac{\Delta\tau_\varepsilon}{u_{огр}} = 1,65\text{В}^{-1}.$$

Зависимость коэффициента передачи ФРУ от уровня входного сигнала показана на рис. 35. Она также имеет два характерных участка — постоянный при малых сигналах и падающий при больших сигналах:

$$\left. \begin{aligned} k_S(u_{вх}) &= k_S(0) \quad \text{при } u_{вх} < u_{огр} \\ k_S(u_{вх}) &\sim \frac{4}{\pi} \frac{\Delta\tau_\varepsilon}{u_{вх}} \quad \text{при } u_{вх} \gg u_{огр} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.111})$$

С учетом приведенных соотношений можно привести выражения для динамического диапазона тракта обработки и порогового значения входного сигнала (см. выражения II. 106, II. 107)

$$D_0 = \frac{I_0 k_{\text{опт}} \left(\frac{4}{\pi} \Delta\tau_\varepsilon \right)^2}{I_{ш}}, \quad (\text{II.112})$$

$$u_{ц,\text{min}} = \frac{4}{\pi} \frac{\Delta\tau_\varepsilon}{k_S(0) \sqrt{D_0}} = \frac{4}{\pi} \frac{u_{огр}}{\sqrt{D_0}}. \quad (\text{II.113})$$

Если рассматривать прохождение сигнала от одиночной точечной цели через тракт обработки, то окажется, что при очень малых сигналах вторичная фотопленка будет экспонироваться только шумами, затем, начиная с порогового уровня $u_A = 0,014\text{В}$ на рис. 34 (принято $D_0 = 316$ (25дБ), откуда $I_{ш} = 0,56 \cdot 10^{-3} I_0 k_{\text{опт}}$) на ней всегда будет регистрироваться цель, однако при амплитуде сигнала, существенно большей $u_{огр}$, исчезнут различия в градациях целей разной интенсивности. Динамический диапазон выходных сигналов определится величиной D_0 .

Теперь рассмотрим случай наблюдения двух точечных целей, находящихся в одном элементе дальности, но разнесенных по линии пути на расстояние, большее разрешающей способности, но меньшее ширины зоны облучения антенны. Фон будем считать неотражающим. Зафиксируем амплитуду первой цели, например $u_A = 0,02\text{В}$ на рис. 34. Интенсивность выходного сигнала от цели составит $I_A = k_S^2(0) k_{\text{опт}}^2 I_0 u_A^2 = 0,001 k_{\text{опт}}^2 I_0$, выше уровня шумов обработки и цель будет обнаруживаться на выходном изображении. Будем менять амплитуду второй цели. Когда она превысит уровень $u_{ц,\text{min}}$ (но будет не более $u_B = 0,2\text{В}$ в десять раз больше u_A) на изображении будут наблюдаться независимо две цели,

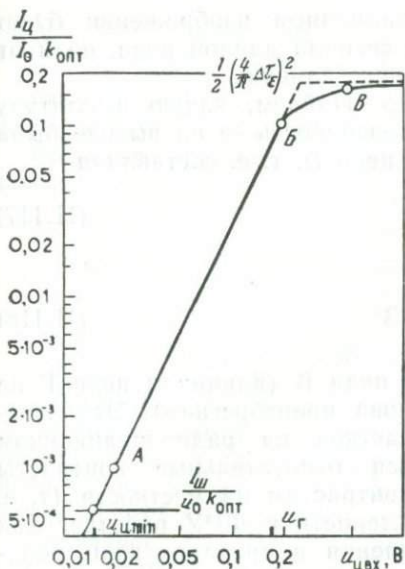
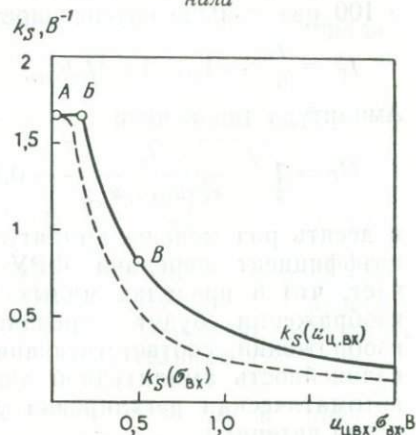


Рис. 34. Характеристики передачи тракта обработки

Рис. 35. Зависимость коэффициента передачи ФРУ от уровня входного сигнала



причем плотность их почернения будет соответствовать экспозициям

$$\left. \begin{aligned} H_A &= (I_A + I_{\text{ш}}) t_{\text{эк}} \\ H_B &= (I_B + I_{\text{ш}}) t_{\text{эк}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.114})$$

где $t_{\text{эк}}$ — время экспонирования, в рассматриваемом примере

$$\left. \begin{aligned} I_A &= k_S^2(0) u_A^2 I_0 k_{\text{опт}} = 0,001 I_0 k_{\text{опт}} \\ I_B &= k_S^2(0) u_B^2 I_0 k_{\text{опт}} = 0,01 I_0 k_{\text{опт}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.115})$$

Таким образом, на выходном изображении цели 1 и 2 зафиксируются пропорционально своим мощностям с добавлением мощности шумов обработки (если предыдущий приемный тракт линеен). Теперь увеличим амплитуду второй цели выше уровня ограничения. Коэффициент передачи ФРУ упадет и уровень первой цели, регистрируемый на выходном изображении, также уменьшится. Например, если амплитуда второй цели составит $u_B = 0,5 \text{ В}$, коэффициент передачи ФРУ упадет до величины $k_S(0,5) = 0,8 \text{ В}^{-1}$ (влиянием первой цели можно пренебречь) и интенсивности целей на выходе составят

$$\left. \begin{aligned} I_A &= k_S^2(u_B) u_A^2 I_0 k_{\text{опт}} = 0,26 \cdot 10^{-3} I_0 k_{\text{опт}} < I_{\text{ш}} \\ I_B &= k_S^2(u_B) u_B^2 I_0 k_{\text{опт}} \approx 0,16 I_{\text{опт}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.116})$$

Интенсивность первой цели будет ниже уровня шумов и она не зафиксируется на выходном изображении. Это означает, что

плотность отметки на радиолокационном изображении будет зависеть не только от мощности сигнала данной цели, но и от мощности других целей, окружающих данную.

Рассмотрим еще один пример. Найдем, какую амплитуду должна иметь цель Γ , чтобы интенсивность ее на выходе была в 100 раз меньше интенсивности цели B , т. е. составляла

$$I_{\Gamma}^{\pm} = \frac{I_B}{100} = 1,6 \cdot 10^{-3} I_0 k_{\text{опт}}. \quad (\text{II.117})$$

Амплитуда такой цели

$$U_{\Gamma} = \sqrt{\frac{I_{\Gamma}}{k_S^2 (u_B) I_0 k_{\text{опт}}}} = 0,05 \text{ В} \quad (\text{II.118})$$

в десять раз меньше амплитуды цели B (влиянием цели Γ на коэффициент передачи ФРУ снова пренебрегаем). Это означает, что в пределах малых участков на радиолокационном изображении будут передаваться относительные контрасты изображений, соответствующие контрастам на местности (т. е. нелинейность амплитудной характеристики ФРУ работает как автоматическая регулировка усиления в пределах зоны облучения антенны).

Здесь имеет смысл остановиться на различиях влияния нелинейности и, в частности, ограничениях в трактах РЛС БО и РСА. В РЛС БО сильные цели могут попасть в область ограничения в приемнике и не будут регистрироваться на выходе (цель V на рис. 26, z , d , z , u). В РСА при ограничении и приемном тракте или тракте обработки амплитудная информация пропадает, а фазовая остается, что позволяет выделить цели на выходе устройства обработки. При этом относительные уровни больших и малых целей сохраняются на выходе. Такое явление может быть проиллюстрировано на примере преобразования спектра частот двух сигналов при прохождении их через устройство, имеющее амплитудную характеристику с ограничением.

Допустим на входе устройства имеем сигналы двух частот ω_1 и ω_2

$$u_{\text{вх}} = a \sin \omega_1 t + b \sin \omega_2 t, \quad (\text{II.119})$$

для простоты примем $a \gg b$.

Путем известных тригонометрических преобразований суммарный входной процесс можно представить в виде колебания с меняющейся по времени амплитудой и фазой

$$u_{\text{вх}} = a \sin \omega_1 t + b \sin \omega_2 t = A(t) \sin \varphi(t), \quad (\text{II.120})$$

где

$$A(t) = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos(\omega_2 - \omega_1)t}, \quad (\text{II.121})$$

$$\varphi(t) = \arctg \frac{a \sin \omega_1 t + b \sin \omega_2 t}{a \cos \omega_1 t + b \cos \omega_2 t}. \quad (\text{II.122})$$

При прохождении такого колебания через амплитудный ограничитель процесс на выходе будет меняться только по фазе

$$u_{\text{вых}} = A_0 \sin \varphi(t), \quad (\text{II. 123})$$

где A_0 — уровень ограничения.

Выражая $\sin \varphi$ через $\text{tg } \varphi$ и пренебрегая членами второго порядка малости, имеем

$$u_{\text{вых}} = A_0 \frac{\sin \omega_1 t + \frac{b}{a} \sin \omega_2 t}{\sqrt{\left(\cos \omega_1 t + \frac{b}{a} \cos \omega_2 t\right)^2 + \left(\sin \omega_1 t + \frac{b}{a} \cos \omega_2 t\right)^2}} \approx$$

$$\approx A_0 \sin \omega_1 t + A_0 \frac{b}{a} \sin \omega_2 t - A_0 \frac{b}{a} \cos(\omega_2 - \omega_1)t. \quad (\text{II. 124})$$

Таким образом, на выходе сохраняется сигнал первой частоты (но амплитуда его уменьшается до A_0), сигнал второй частоты с амплитудой, пропорциональной отношению амплитуд сигналов на входе, и появляется дополнительная составляющая разностей частоты (рис. 36).

Указанное различие преобразования сигналов в трактах РЛС БО и РСА не относится к процессам регистрации изображения на выходной пленке после устройства обработки РСА. Там сигналы имеют только амплитудные различия и регистрируются одинаково в обоих типах аппаратуры.

Рассмотрим важный для практики случай наблюдения одиночной цели или элемента с заданной ЭПР, окруженных отражающим фоном, полная (принимаемая антенной РЛС) энергия которого значительно больше энергии цели.

Этот случай охватывает большинство встречающихся ситуаций при образе земной поверхности, за исключением, может быть, наблюдения очень контрастных объектов, типа мостов, крупных промышленных сооружений.

Процесс прохождения сигнала через тракт обработки для такого сюжета напоминает рассмотренный случай двух целей, из которых меньшую следует считать за заданный элемент, а большую — за составляющие окружающего фона. Количественно зависимость коэффициента передачи тракта обработки от уровня входного сигнала будет отличаться от приведенной ранее, так как сигнал от фона не имеет постоянной амплитуды, а носит флюктуационный характер и необходимо учитывать его статистические свойства. Такие зависимости для линейно-ломаной аппроксимации амплитудной характеристики тракта обработки, показанной пунктиром на рис. 34, рассчитаны в работе [79]. С учетом этих зависимостей можно записать выражение для коэффициента передачи ФРУ и освещенности второй фотопленки, вызванной сигналом от цели

$$k_s(\sigma_{\text{вх}}) = \frac{4}{\pi} \Delta \tau_i \frac{\sqrt{a_r}}{\sigma_{\text{вх}}} = k_s(0) \sqrt{\frac{a_r}{\tau_i}}, \quad (\text{II. 125})$$

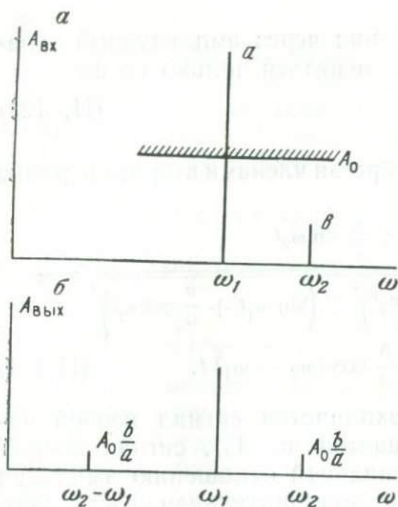
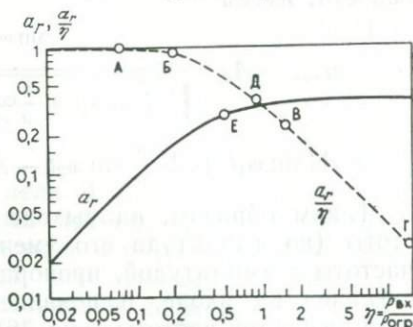


Рис. 36. Преобразование спектра двух частот при прохождении сигнала через ограничитель

Рис. 37. Зависимость коэффициента первой гармоники на выходе ограничителя от уровня ограничения



$$I_{\text{ц}} = I_0 k_{\text{опт}} k_S^2 (\sigma_{\text{вх}}) u_{\text{ц}}^2 = I_0 k_{\text{опт}} \left(\frac{4}{\pi} \Delta \tau_{\varepsilon} \right)^2 2a_r \frac{P_{\text{вхц}}}{P_{\text{вх}}} =$$

$$= I_0 k_{\text{опт}} \left(\frac{4}{\pi} \Delta \tau_{\varepsilon} \right)^2 \frac{2a_r P_{\text{вхц}}}{\eta P_{\text{огр}}}, \quad (\text{II.126})$$

где $P_{\text{вх}}$ — мощность полного процесса на входе ФРУ, $P_{\text{огр}} = \left(\frac{4}{\pi} u_{\text{огр}} \right)^2 / R_{\text{вх}}$ — мощность на входе ФРУ, определяемая порогом ограничения амплитудной характеристики ($R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление ФРУ),

$\eta = \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{огр}}}$ — приведенное значение мощности процесса на входе ФРУ,

$a_r, \frac{a_r}{\eta}$ — коэффициенты, характеризующие мощность первой гармоники сигнала на выходе нелинейного звена; их значение вычислено по данным работы [79] подстановкой: $a_r = \left(\frac{a_1}{S} \right)^2$, $\eta = \frac{1}{r_0^2}$, где a_1, s и r_0 — введенные там параметры входного и выходного процессов.

Зависимость коэффициентов a_r и $\frac{a_r}{\eta}$ от приведенной мощности процесса на входе ФРУ показана на рис. 37.

В рассматриваемом случае полная мощность процесса на входе ФРУ $P_{\text{вх}}$ в основном складывается из мощности сигнала, отра-

женного от подстилающей поверхности (фона местности) $P_{\text{вх.ф}}$ и шумов приемника $P_{\text{вх.ш}}$. Эти составляющие равны

$$P_{\text{вх.ф}} = Ak_{\text{п}}^2 \sigma_{\text{ср}}^{\circ} \delta Y \frac{R\lambda}{d_A}, \quad (\text{II.127})$$

$$P_{\text{вх.ш}} = n_{\text{ш}}^{\circ} k_{\text{п}}^2 \Delta F_{\text{ш}} = 4 \cdot 10^{-21} \text{Ш} \Delta F_{\text{ш}} k_{\text{п}}^2 = \frac{P_{\text{вх.ф}}}{\xi_1}, \quad (\text{II.128})$$

где $A = \frac{P_{\text{изл}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}$ — коэффициент, определяемый формулой дальности (II.27),

$k_{\text{п}}$ — коэффициент усиления приемника,

$\sigma_{\text{ср}}^{\circ}$ — удельная ЭПР фона местности, усредненная по зоне облучения антенны,

δY — разрешение поперек линии пути РЛС,

$\frac{R\lambda}{d_A}$ — ширина зоны облучения вдоль линии

пути (соответствует разрешению по линии пути в некогерентной РЛС БО),

$$\xi_1 = \frac{P_{\text{вх.ф}}}{P_{\text{вх.ш}}} = \frac{A \sigma_{\text{ср}}^{\circ} \delta Y \frac{R\lambda}{d_A}}{4 \cdot 10^{-21} \text{Ш} \Delta F_{\text{ш}}} \quad \text{— отношение мощности принятого сигнала от фона к мощности шума до когерентной обработки (на входе ФРУ).}$$

Найдем связь между составляющими экспозиции РЛИ и ЭПР наблюдаемых целей, удельной ЭПР фона, а также уровнями шумов приемника и шумов обработки.

Составляющая экспозиции цели

$$\Delta H_{\text{ц}} = I_{\text{ц}} t_{\text{эк}} = H_{\text{max}} 2a_r \frac{S_{\text{эф}}}{\sigma_{\text{ср}}^{\circ} \delta Y \frac{R\lambda}{d_A} (1 + 1/\xi_1)} = H_{\text{max}} \frac{2\gamma_r}{\gamma} \eta_{\text{ц}}, \quad (\text{II.129})$$

где $H_{\text{max}} = I_{\text{max}} t_{\text{эк}} = I_0 k_{\text{опт}} \left(\frac{4}{\pi} \Delta \tau_{\text{с}} \right)^2 t_{\text{эк}}$ — экспозиция, соответствующая максимальной освещенности вторичной фотопленки (II.108),

$\eta_{\text{ц}} = \frac{A k_{\text{п}}^2 S_{\text{эф}}}{P_{\text{орг}}}$ — приведенная мощность цели на входе ФРУ.

Прохождение фона местности через тракт обработки можно рассматривать отдельно для каждого элемента разрешения РЛС. Мощность фона в элементе разрешения определяется удельной ЭПР фона и площадью элемента разрешения. Составляющая экспозиции РЛИ, вызванная фоном местности, равна

$$\Delta H_{\text{ф}} = H_{\text{max}} 2a_r \frac{1}{N_c (1 + 1/\xi_1)} = H_{\text{max}} \frac{2a_r}{\gamma} \frac{\gamma_{\text{ф}}}{N_c}, \quad (\text{II.130})$$

где $N_c = \frac{R\lambda}{d_A \delta X}$ — степень сжатия сигнала, характеризующая улучшение разрешения вдоль линии пути при использовании синтезированной антенны,

$\eta_{\Phi} = \frac{A k_n^2 \sigma_{\Phi}^{\circ} \delta Y \frac{R\lambda}{d_A}}{P_{\text{орг}}}$ — приведенная мощность фона на входе ФРУ (предполагается, что фон однородный).

Составляющая шумов приемника в отличие от составляющей цели будет при формировании синтезированной антенны суммироваться некогерентно, так что амплитуда выходного светового колебания, определяемая выражением (II.78) будет пропорциональна не N_x , а $\sqrt{N_x}$, интенсивность света на выходе — пропорциональна N_x . Мощность шумов на входе тракта обработки определяется выражением (II.128). Составляющая экспозиции РЛИ

$$\Delta H_{\text{ш}} = H_{\text{max}} 2a_r \frac{1}{N_x (1 + \xi_1)} = H_{\text{max}} \frac{2a_r \tau_{\text{ш}}}{\tau N_x} = \frac{\Delta H_0}{\xi_0}, \quad (\text{II.131})$$

где $\xi_0 = \xi_1 \frac{N_x}{N_c} = \xi_1 \frac{d_A}{2WT_n}$ — отношение мощности фона к мощности шумов приемника после когерентной обработки (без учета шумов обработки).

$\eta_{\text{ш}} = \frac{4 \cdot 10^{-21} \text{Ш} \Delta F_{\text{ш}} k_n^2}{P_{\text{орг}}}$ — приведенная мощность шумов на входе ФРУ.

Составляющая экспозиции РЛИ, вызванная шумами обработки, определяется динамическим диапазоном тракта обработки и практически не зависит от уровня входного сигнала и наблюдаемого сюжета

$$\Delta H_0 = I_{\text{max}} t_{\text{эк}} / D_0 = H_{\text{max}} / D_0. \quad (\text{II.132})$$

Анализируя выражения (II.130) и (II.131), можно убедиться, что из-за нелинейности в тракте обработки шумы приемника двояким образом сказываются на экспозиции радиолокационного снимка: во-первых, мощность шума, добавляемая к мощности фона на входе ФРУ, уменьшает коэффициент передачи ФРУ, снижая тем самым экспозицию РЛИ от фона местности и целей (при $\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{орг}}} > 0,2$ согласно рис. 37); во-вторых, шумы приемника, проходя когерентную обработку, дают дополнительную экспозицию $\Delta H_{\text{ш}}$, эквивалентную увеличению удельной ЭПР фона местности на величину

$$\sigma_{\text{ш}^{\circ}} = \frac{\sigma_{\Phi}^{\circ}}{\xi_0} = \frac{4 \cdot 10^{-21} \text{Ш} \Delta F_{\text{ш}} \sigma_{\Phi}^{\circ}}{P_{\text{изл}} G^2} (4\pi)^3 \frac{R^3}{\lambda^3} \cdot \frac{W}{c} \cdot \frac{T_n}{\tau_u} 4 \cos \beta, \quad (\text{II.133})$$

где сделана подстановка параметров РЛС, входящих в формулы расчета потенциала (II.27), (II.30) и разрешения РЛС (II.4), (II.5)

Рассмотрим теперь, как будут воспроизводиться в РСА градации при наблюдении фона местности и целей. Для этого снова обратимся к сюжету, рассмотренному ранее для РЛС БО, изображение будем строить вдоль линии пути. При анализе обратим внимание на следующие вопросы: воспроизведение фонов различного уровня, наблюдение точечной цели на фоне местности, воспроизведение участков местности с малым отражением, окруженных фоном с более интенсивным отражением, воспроизведение перепада интенсивностей соседних участков фона.

Будем исходить из двух возможных вариантов построения приемного тракта РСА — с постоянным коэффициентом усиления k_n приемника (или его программным регулированием по дальности с помощью ВАРУ) либо с АРУ, поддерживающей постоянную мощность процесса на входе тракта обработки (идеальная АРУ). Зададимся следующими параметрами РСА, определяющими прохождение сигналов через тракт обработки (см., например, АН/АРҚ-102, табл. 3):

$$\frac{d_A}{2WT_n} = 4^*; N_c = \frac{R\lambda}{d_A \delta X} = 50; N_x = \frac{d_A}{2WT_n} N_c = 200; D_0 = 25 \text{ дБ.}$$

Приемник с постоянным усилением. Выберем коэффициент усиления приемника таким образом, чтобы при наблюдении фона слабой интенсивности (луг на рис. 38 $\xi_{011} = \sigma_{\phi 11}^0 / \sigma_{шз} = 10$, $\xi_1 = 2,5$) нелинейности тракта обработки не сказывались ($\eta = \frac{P_{вх}}{P_{орг}} = 0,2$; $\frac{a_r}{\eta} = 0,95$ — отмечено точкой Б на рис. 37) и вычислим экспозицию различных участков на РЛИ.

II участок — луг. Приведенные мощности фона и шумов на входе ФРУ соответственно равны

$$\eta_{\phi 11} = \frac{\eta}{1 + 1/\xi_1} = 0,143, \quad (\text{II.134})$$

$$\eta_{ш} = \frac{\eta_{\phi 11}}{\xi_1} = 0,057. \quad (\text{II.135})$$

* Исходя из теоремы Котельникова, для однозначной передачи доплеровских частот отраженного сигнала при импульсном зондировании должно удовлетворяться условие $\Delta F_d = \frac{2W}{d_A} F_n < \frac{1}{2} = \frac{1}{2T_n}$. Практически, в случае смещения частоты сигнала при обработке в МОПИ и наличии погрешностей стабилизации луча антенны требуются более жесткие ограничения $\frac{d_A}{2WT_n} > 3 \div 4$.

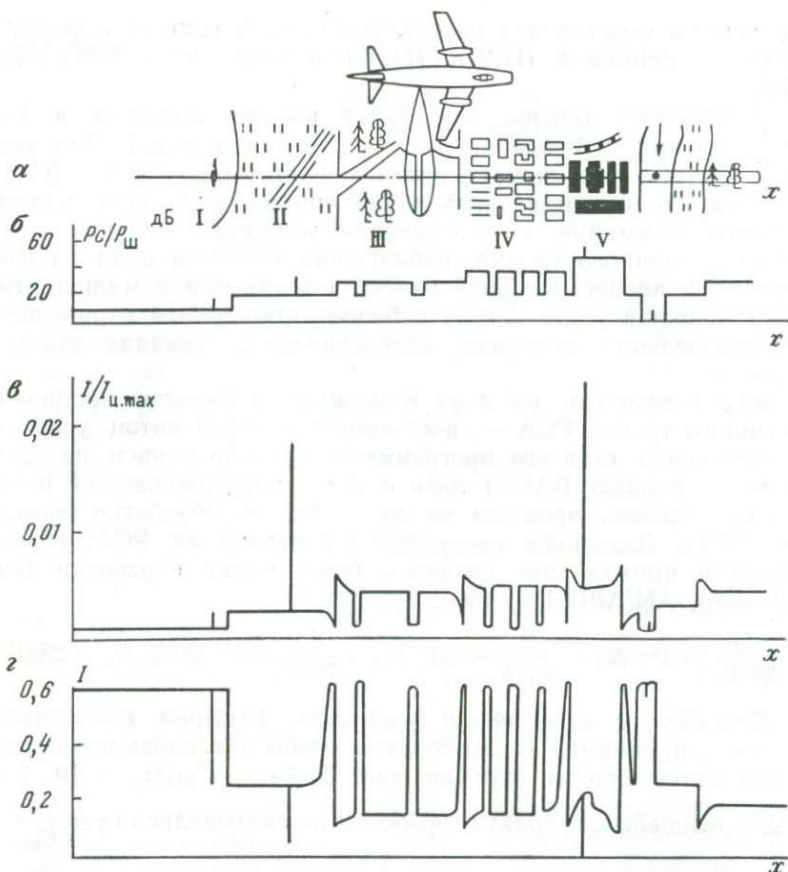


Рис. 38. Воспроизведение градиентов фона местности и целей в РСА:
 а — наблюдаемая местность (I — море, II — луг, III — лес, IV — жилая застройка, V — промышленные сооружения); б — отношение сигнал/шум на входе приемника РСА, в — интенсивность сигнала на выходе тракта обработки; г — прозрачность негатива второй фотопленки

Приведенная мощность цели, превышающей фон на 10дБ ($\xi_{ц/ф} = 10$)

$$\eta_{ц} = \xi_{ц/ф} \frac{\tau_{фII}}{N_c} = 0,029. \quad (\text{II.136})$$

Составляющие экспозиции РЛИ вычисляются по формулам (II.129) — (II.131). Полная экспозиция на участке фона

$$H_{ф} = \Delta H_{ф} + \Delta H_{ш} + \Delta H_0 = 0,0091 H_{\max}, \quad (\text{II.137})$$

и в элементе разрешения, где имеется точечная цель,

$$H_{ц} = \Delta H_{ц} + H_{ф} = 0,063 H_{\max}. \quad (\text{II.138})$$

На участке фона, имеющего слабое отражение и окруженного фоном с интенсивным отражением, экспозиция РЛИ создается только шумами приемника и обработки

$$H_{ш} = \Delta H_{ш} + \Delta H_0. \quad (\text{II.139})$$

Участки I, III, IV. Для участков фона, удельная ЭПР которого отличается от рассмотренного при расчете, приведенная мощность фона изменяется пропорционально изменению удельной ЭПР:

$$\eta_{\Phi} = \frac{\sigma_{\Phi}^{\circ}}{\sigma_{\Phi I}^{\circ}} \eta_{\Phi I} \quad (\text{II.140})$$

приведенная мощность шумов, естественно, не изменяется. Приведенная мощность цели определяется превышением ее ЭПР над ЭПР элемента фона согласно выражению (II.138). Приведенная мощность процесса на входе тракта обработки

$$\eta = \eta_{\Phi} + \eta_{ш}. \quad (\text{II.141})$$

Она определяет коэффициент передачи ФРУ (точки А, В, Г, см. рис. 37, для участков I, III, IV, см. рис. 38, соответственно), по которому рассчитывают составляющие экспозиции РЛИ и ее полное значение на различных участках РЛИ. Данные расчетов приведены в табл. 4.

Рассмотрим теперь, как будут передаваться перепады удельной ЭПР фона. На участках I—II перепады будут передаваться в соответствии с вычисленными значениями экспозиции. На участках интенсивного фона приведенная мощность и коэффициент передачи ФРУ зависят от соотношения площадей участков, облучаемых антенной РЛС вдоль линии пути. В частности, если граница участков находится в центре зоны облучения, то $\eta_{\Phi, \text{ср}} = \frac{\eta_{\Phi II} + \eta_{\Phi III}}{2}$; $\eta_{\text{ср}} = \eta_{ш} + \eta_{\Phi, \text{ср}} = 0,057$.

В этом случае коэффициент передачи ФРУ оказывается большим, чем на III участке, но меньшим, чем на II участке. Соответственно, экспозиция РЛИ слева от границы оказывается меньшей, чем на II участке, а справа — большей, чем на III участке, т. е. при большом уровне сигналов на входе тракта обработки происходит подчеркивание контуров изображения. Аналогичные явления наблюдаются и в прозрачности РЛИ.

Приемник с АРУ. Рассмотрим случай идеальной АРУ, поддерживающей постоянную мощность процесса на входе ФРУ, такую, чтобы $\eta = \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{орг}}} = 0,5$; при этом коэффициент передачи ФРУ $a_r = 0,28$ (отмечено точкой Е на рис. 37). Составляющие экспозиции РЛИ определяются формулами (II.129) — (II.131) с подстановкой в них $a_r = 0,28$; $\xi_{ш/\Phi} = 10$ и ξ_1 . Для фона на II участке $\xi_1 = 2,5$. При изменении удельной ЭПР фона пропорционально изменяется значение ξ_1 , подставляемое в расчетные формулы.

Таблица 4

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ГРАДАЦИЙ СИГНАЛА НА РЛИ

Участки	I	II	Граница II-III		III	IV
			II	III		
$\sigma_{\Phi}^{\circ} / \sigma_{\text{шз}}^{\circ}$	1	10	10	100	100	1000

Приемник с постоянным усилением $k_{\Pi} = \text{const}$

$\frac{\eta}{a_r/\eta}$	0,071 1	0,2 0,95	0,85 0,38	1,49 0,25	14,3 0,0276	
$\Delta H_{\text{ш}}/H_{\text{max}}$	$\frac{2a_r}{\eta} \cdot \frac{\eta_{\text{ш}}}{N_x}$	0,0005	0,0005	0,0002	0,00014	0,00001
$\Delta H_{\Phi}/H_{\text{max}}$	$\frac{2a_r}{\eta} \cdot \frac{\eta_{\Phi}}{N_c}$	0,0006	0,005	0,002	0,022	0,014
$\Delta H_{\text{ц}}/H_{\text{max}}$	$\xi_{\text{ц}/\Phi} \Delta H_{\Phi}$	0,006	0,054	0,022	0,220	0,140
$H_{\text{ш}}/H_{\text{max}}$	$\Delta H_{\text{ш}} + \Delta H_0$	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003
H_{Φ}/H_{max}	$\Delta H_{\Phi} + H_{\text{ш}}$	0,009	0,009	0,005	0,025	0,017
$H_{\text{ц}}/H_{\text{max}}$	$\Delta H_{\text{ц}} + H_{\Phi}$	0,066	0,06	0,027	0,240	0,180

Приемник с АРУ $P_{\text{вх}} = \text{const}$

ξ_1	0,25	2,5	13,75	25	250	
$\Delta H_{\text{ш}}/H_{\text{max}}$	$\frac{2a_r}{N_x (1 + \xi_1)}$	0,002	0,0008	0,0002	0,0001	0,00001
$\Delta H_{\Phi}/H_{\text{max}}$	$\xi_0 \Delta H_{\text{ш}}$	0,002	0,008	0,002	0,019	0,011
$\Delta H_{\text{ц}}/H_{\text{max}}$	$\xi_{\text{ц}/\Phi} \Delta H_{\Phi}$	0,022	0,080	0,019	0,190	0,107
$H_{\text{ш}}/H_{\text{max}}$	$\Delta H_{\text{ш}} + \Delta H_0$	0,005	0,004	0,003	0,003	0,003
H_{Φ}/H_{max}	$\Delta H_{\Phi} + H_{\text{ш}}$	0,008	0,0012	0,005	0,022	0,014
$H_{\text{ц}}/H_{\text{max}}$	$\Delta H_{\text{ц}} + H_{\Phi}$	0,030	0,092	0,022	0,190	0,111

Некоторые особенности имеет расчет случая наблюдения границы двух участков (или произвольного распределения отражающей способности фона в пределах зоны облучения). Вычисляют усредненное значение отношения мощности фона к мощности шумов приемника. Если граница точно посередине, как в рассматриваемом случае,

$$\xi_{1 \text{ уср}} = \frac{\xi_{1 \text{ II}} + \xi_{1 \text{ III}}}{2} = 13,75.$$

Далее вычисляют составляющую экспозиции шумов приемника

$$\Delta H_{\text{ш}} = \frac{2a_r}{N_x(1 + \xi_{1\text{уср}})} H_{\text{max}}, \quad (\text{II.142})$$

а по ней составляющие экспозиции фона

$$\Delta H_{\text{ф}} = \Delta H_{\text{ш}} \frac{\xi_1 N_x}{N_c} H_{\text{max}} \quad (\text{II.143})$$

и целей

$$\Delta H_{\text{ц}} = \xi_{\text{ш/ф}} \Delta H_{\text{ф}}. \quad (\text{II.144})$$

Данные по экспозиции РЛИ на различных участках для приемника с постоянным коэффициентом усиления и с АРУ приведены в табл. 4. Анализ этих данных позволяет сделать вывод, что ограниченность динамического диапазона и нелинейности в тракте обработки существенно ухудшают контрасты в воспроизведении фона местности. Для того, чтобы фон местности уверенно наблюдался на РЛИ (чтобы обеспечивался достаточный его контраст относительно шумов приемника и обработки)

$$K = \frac{H_{\text{ф}}}{H_{\text{ш}}} = \frac{N_c(1 + \xi_1)}{\frac{2a_r}{N_x}(1 + \xi_1) + \frac{1}{D_0}} + 1, \quad (\text{II.145})$$

требуется большой динамический диапазон тракта обработки

$$D_0 \gg \frac{N_c(1 + 1/\xi_1)}{2a_r}. \quad (\text{II.146})$$

Для уменьшения влияния шумов обработки на воспроизведение контрастов РЛИ следует выбирать уровень сигнала на входе тракта обработки достаточно большим $\eta \approx 0,5$ (дальнейшее увеличение η приводит также к ухудшению контраста из-за ложных целей, влияние которых здесь не рассматривается). В этом смысле предпочтительным является приемник с АРУ, а не с постоянным усилением, для которого возможно резкое снижение контрастов РЛИ на участках с малым отражением (участок I).

На рис. 38 показаны градационные характеристики выходного сигнала РСА и прозрачности РЛИ для различных ситуаций. Они близки к характеристикам РЛС БО при наличии АРУ в приемном тракте. Изображение в РСА характеризуется следующими особенностями:

— в каждом участке изображения в пределах зоны облучения антенны РЛС экспозиция на фотопленке пропорциональна ЭПР целей (с добавлением мощности шумов приемника и обработки);

— цели с одной и той же ЭПР могут регистрироваться с разной интенсивностью на выходе в зависимости от того, каким фоном они окружены;

— сильные цели могут подавлять фон, который их окружает.

Указанные особенности затрудняют опознание элементов подстилающей поверхности по тону их изображения, и в качестве дешифровочных признаков приходится использовать геометрию изображения и относительные контрасты.

Следует отметить, что рассмотренные искажения градиционных характеристик в РСА присущи любым устройствам обработки сигналов, имеющим недостаточный для воспроизведения всех сигналов динамический диапазон. В этом смысле цифровые вычислители имеют некоторые преимущества, так как их динамический диапазон, определяется числом уровней квантования принимаемого сигнала и разрядностью вычислительных операций, которые в принципе могут быть сделаны очень большими. После получения выходного сигнала перед его регистрацией можно применить логарифмирование для согласования вычислителя и регистрирующего устройства. Однако реализация такой обработки с большим динамическим диапазоном далеко не всегда возможна из-за ограниченного объема памяти вычислителя, а также из-за технической сложности изготовления приемника с динамическим диапазоном выходного сигнала более 30 дБ, здесь уже могут сказываться дрейф и шумы каскадов видеоусилителя, наводки, нестабильности и пр. Поэтому явления искажений градиций в РСА с цифровой обработкой будут также проявляться, хотя и в меньшей степени.

§ 9. Разрешающая способность РЛС землеобзора

Под разрешающей способностью понимают свойство аппаратуры различать между собой объекты, разнесенные в пространстве. Количественно разрешающая способность оценивается той минимальной разницей в координатах двух целей, при которой возможно уверенное их раздельное обнаружение. На разрешение целей оказывают влияние такие характеристики аппаратуры, как длительность зондирующего импульса, полоса приемного тракта и частотные характеристики устройства регистрации изображения, отношение сигнал/шум в системе, форма диаграммы направленности антенны, а также соотношение амплитуд и фаз сигналов от целей. Кроме того, на форму выходного сигнала влияют нелинейности амплитудной характеристики системы, которые могут привести к улучшению или ухудшению условий разделения целей.

Совместный учет этих факторов представляет собой сложную задачу, которая не может быть решена в общем виде для произвольного объекта наблюдения. Поэтому при проектировании и анализе аппаратуры за меру разрешения принимают

ширину реакции системы на одиночную точечную цель, причем весь тракт рассматривается как линейный, а влияние нелинейностей относится только к искажениям формы выходного сигнала. Хотя такой подход и не вполне строг, но он дает возможность сделать инженерные оценки для каждой конкретной аппаратуры, сравнивать различную аппаратуру между собой [90].

Рассмотрим методику оценки разрешающей способности системы по техническим параметрам аппаратуры и проиллюстрируем воздействие различных факторов на примере типичных случаев наблюдения объектов. При анализе будем использовать, как это обычно делается в радиолокации и оптике, основанное на преобразовании Фурье спектральное представление сигнала и выражение для частотной зависимости коэффициента передачи системы. Не вдаваясь в детали спектрального анализа, ограничимся случаем зондирующих сигналов с колоколообразной огибающей или колоколообразных частотных характеристик. В этом случае и временной процесс и его спектр имеют одну и ту же форму, но с различными параметрами. Следует иметь в виду, что так же как и в оптике, где оперируют с частотноконтрастными характеристиками, в радиолокации спектральное представление может относиться как к временному процессу, так и к пространственной функции координат (тогда говорят о спектре пространственных частот).

Преобразование Фурье устанавливает однозначную связь между временными или пространственными функциями $U(Z)$ и их спектральным представлением $\tilde{U}(F)$

$$U(Z) \leftrightarrow \tilde{U}(F)$$

и, в частности, для колоколообразных функций имеет вид

$$U(Z) = U_0 e^{-\beta^2 z^2} = \frac{\tilde{U}_0 \sqrt{\pi}}{a} e^{-\frac{\pi^2 z^2}{a^2}}, \quad (\text{II.147})$$

$$\tilde{U}(F) = \tilde{U}_0 e^{-\alpha^2 F^2} = \frac{U_0 \sqrt{\pi}}{\beta} e^{-\frac{\pi^2 F^2}{\beta^2}}, \quad (\text{II.148})$$

откуда переход от параметров временных функций к параметрам спектральных и наоборот выполняется по следующим формулам:

$$\tilde{U}_0 = \frac{U_0 \sqrt{\pi}}{\beta}, \quad (\text{II.149})$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\beta}, \quad (\text{II.150})$$

$$U_0 = \frac{\tilde{U}_0 \sqrt{\pi}}{a}, \quad (\text{II.151})$$

$$\beta = \frac{\pi}{a}. \quad (\text{II.152})$$

Приведем основные определения. Импульсной реакцией системы $h_z(z)$ называется зависимость амплитуды выходного сигнала от времени или от пространственных координат при наблюдении одиночной точечной цели. Импульсные реакции по времени, наклонной, горизонтальной и путевой дальностям будем соответственно обозначать

$$h_t(t - t_u); h_R(R - R_u); h_y(Y - Y_u); h_x(X - X_u),$$

где t_u — время пространственного запаздывания сигнала от цели,

R_u, Y_u, X_u — координаты цели.

Ширина импульсной реакции системы, характеризующая ее разрешающую способность по соответствующей координате, может быть определена по форме реакции. Если задаваться шириной функции на уровне 0,7 (точнее $\frac{1}{\sqrt{2}}$) относительно максимума, для колоколообразных импульсных реакций будем иметь выражение

$$h_z(Z) = h_{z0} e^{-b^2 \frac{\Delta Z^2}{\delta Z^2}} \approx h_{z0} e^{-1,4 \frac{\Delta Z^2}{\delta Z^2}}, \quad (\text{II.153})$$

где Z — соответствующая временная или пространственная координата,

ΔZ — приращение по координате относительно положения цели,

δZ — ширина импульсной реакции на уровне 0,7 от максимальной амплитуды (разрешение по координате),

h_{z0} — максимальное значение импульсной реакции,

$b = \sqrt{2 \ln 2} = 1,17741$ — нормирующий коэффициент:

$$\left(e^{-\frac{b^2}{4}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \right).$$

Кроме импульсной реакции, характеризующей амплитуду выходного сигнала, систему удобно определять аппаратурной функцией, которая представляет собой зависимость мощности выходного сигнала от координаты и равняется нормированному квадрату импульсной реакции

$$H_z(Z) = \frac{h_z^2(Z)}{h_{z0}^2} = e^{-2b^2 \frac{\Delta Z^2}{\delta Z^2}}. \quad (\text{II.154})$$

Аппаратурная функция имеет также вид колоколообразной кривой, ширина ее на уровне 0,5 от максимального значения равна ширине импульсной реакции на уровне 0,7. Примером аппаратурной функции системы является распределение экспозиции в пятне на вторичной фотопленке в РСА с оптической обработкой информации при наблюдении одиночной точечной цели.

Систему можно также определять временной или пространственной частотной характеристикой (как в телевидении и оптике частотно-контрастные характеристики). Она связана с импульсной реакцией преобразованием Фурье и в случае колоколообразных функций имеет вид

$$k(F) = k_0 e^{-\frac{b^2 F^2}{4 \Delta F_z^2}} \approx k_0 e^{-0,35 \frac{F^2}{\Delta F_z^2}}, \quad (\text{II.155})$$

где k_0 — модуль частотной характеристики,

ΔF_z — полоса частотной характеристики по уровню 0,7 относительно максимума.

Связь между полосой частотной характеристики и шириной импульсной реакции выражается формулами (II.150), (II.151), (II.153), откуда

$$\Delta F_z = \frac{b^2}{2\pi \cdot \delta Z} \approx \frac{0,22}{\delta Z}. \quad (\text{II.156})$$

Аналогично характеристикам системы в целом можно говорить об импульсных реакциях, спектре излучаемого сигнала и частотных характеристиках отдельных звеньев системы (передатчика, приемного тракта, регистрирующего устройства), которые в совокупности влияют на разрешающую способность системы.

При инженерном расчете разрешающей способности системы (длительности ее импульсной реакции или аппаратурной функции) тракт РЛС можно приблизительно рассматривать как линейный и характеризовать каждое его звено полосой частотной характеристики или длительностью реакции.

Частотная характеристика системы определяется произведением частотных характеристик звеньев. Так, например, частотная характеристика, определяющая разрешающую способность по времени запаздывания сигналов, может быть записана в виде

$$k(F_t) = S(F) k_{\text{пр}}(F) k_{\text{рег}}(F), \quad (\text{II.157})$$

где $S(F)$ — спектр огибающей зондирующего импульса,

$k_{\text{пр}}(F)$ — частотная характеристика приемного тракта,

$k_{\text{рег}}(F)$ — частотная характеристика регистрирующего устройства.

Для случая колоколообразных функций

$$k(F_t) = S_0 e^{-\frac{b^2}{4} \cdot \frac{F^2}{\Delta F_{\text{изл}}^2}} k_{\text{пр}} e^{-\frac{b^2}{4} \cdot \frac{F^2}{\Delta F_{\text{пр}}^2}} k_{\text{рег}} e^{-\frac{b^2}{4} \cdot \frac{F^2}{\Delta F_{\text{рег}}^2}} = k_0 e^{-\frac{b^2}{4} \cdot \frac{F^2}{\Delta F_t^2}}, \quad (\text{II.158})$$

где

$$\Delta F_t = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta F_{\text{изл}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta F_{\text{пр}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta F_{\text{рег}}}\right)^2}}$$

— полоса сквозной частотной характеристики системы,

$2\Delta F_{\text{изл}}$ — ширина спектра излучаемого импульса,
 $2\Delta F_{\text{пр}}$ — полоса приемного тракта,
 $\Delta F_{\text{рег}}$ — полоса регистрирующего устройства,
 S_0 — модуль спектра зондирующего импульса,
 $k_{\text{пр}}$ и $k_{\text{рег}}$ — коэффициенты передачи приемника и регистрирующего устройства.

От частотной характеристики можно перейти к импульсной характеристике системы через преобразование Фурье. Соответственно разрешающая способность системы может быть выражена через полосу сквозной частотной характеристики или длительности реакций отдельных звеньев

$$\delta t_0 = \frac{b^2}{2\pi\Delta F_t} = \sqrt{\tau_n^2 + \delta t_{\text{пр}}^2 + \delta t_{\text{рег}}^2}, \quad (\text{II.159})$$

где τ_n — длительность зондирующего импульса,
 $\delta t_{\text{пр}}$ и $\delta t_{\text{рег}}$ — длительность реакции приемника и регистрирующего устройства.

Следует отметить, что в различных частях тракта РЛС (на видеочастоте и на радио- и высокой частоте) спектры сигналов и частотные характеристики имеют разный характер. В видеотракте они начинаются от нуля и имеют спад по мере возрастания частоты F , значение $F_{\text{видео}}$ характеризует занимаемую сигналом полосу видеочастот. В радиотракте спектр сигнала располагается в обе стороны несущей или промежуточной частоты, и тогда F характеризует расстройку относительно несущей частоты $F = f - f_0$, а ширина спектра и полоса частот, пропускаемых приемников, соответствуют удвоенной полосе видеочастот $2\Delta F_{\text{видео}}$.

В свою очередь регистрирующее устройство состоит из ряда элементов: видеоусилителя, индикатора, объектива съемочной камеры и фотопленки (в некогерентных РЛС, а в РСА к ним добавляется еще МОПИ и вторичная фотопленка). Полоса частотной характеристики регистрирующего устройства определится полосой видеоусилителя и полосами частотно-контрастных характеристик индикатора, объектива и пленки, пересчитанных ко времени через скорость развертки индикатора

$$\Delta F_{\text{рег}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Delta F_{\text{видео}}^2} + v_p^2 \left(\frac{1}{F_{\text{инд}}^2} + \frac{1}{F_{\text{об}}^2} + \frac{1}{F_{\text{ф}}^2} \right)}}, \quad (\text{II.160})$$

где $F_{\text{видео}}$ — полоса видеоусилителя в Гц,
 v_p — скорость развертки индикатора в мм/с,
 $F_{\text{инд}}$, $F_{\text{об}}$, $F_{\text{ф}}$ — полосы индикатора, объектива и фотопленки в лин/мм (иногда их называют просто разрешающей способностью соответствующих устройств).

Влияние регистрирующего устройства по-разному сказывается на разрешении РЛС БО и РСА по наклонной дальности и вдоль линии пути. В обоих случаях можно принять, что мас-

штабы пятна индикатора по обоим координатам одинаковы. Полоса пространственной частотно-контрастной характеристики индикатора будет также одинакова по обоим координатам. Ширина импульсной реакции регистрирующего устройства для рассмотренного случая составляет

$$\delta R_{\text{в}} = \delta X_{\text{в}} = \frac{c\tau_{\text{н}}}{2(1,4 \dots 2)} \approx \frac{\delta R}{2}. \quad (\text{II.161})$$

Откуда для РЛС БО легко найти разрешение по линии пути

$$\delta X \approx \sqrt{\delta X_A^2 + \left(\frac{\delta R}{2}\right)^2} \approx \sqrt{\left(0,64 \frac{R\lambda}{d_A}\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{2}\right)^2}, \quad (\text{II.162})$$

где $\delta X_A = 0,64 \frac{R\lambda}{d_A}$ — вклад в аппаратурную функцию диаграммы антенны РЛС согласно (II.10).

Отличие некогерентных РЛС от РСА проявляется в том, что аппаратурная функция по линии пути формируется диаграммой синтезированной антенны только один раз при приеме (а не дважды на передачу и прием), но зато имеется двойной фазовый набег в пространстве. Влияние разрешающей способности индикатора нужно учитывать только в том случае, если используется электронная или цифровая обработка информации с последующей регистрацией изображения на фотопленке с помощью однострочного индикатора. Если используется оптическая обработка сигналов, записанных на первичной пленке, так, как это описывалось выше, то форма частотно-контрастной характеристики будет сказываться на изменении распределения амплитуды сигнала по раскрытию синтезированной антенны и при правильно-выбранных параметрах фоторегистрирующего устройства влиянием индикатора на форму аппаратурной функции системы по линии пути можно пренебречь. Некоторое ухудшение разрешения по линии пути может вызываться ограниченным разрешением оптической системы и вторичной фотопленки, но этими факторами можно также пренебречь. Форма аппаратурной функции системы будет практически определяться формой диаграммы синтезированной антенны, которая при равномерном распределении сигнала по раскрытию антенны имеет вид (см. II.103)

$$H(X) \approx G(X) = \left[\frac{\sin \frac{2\pi d_c \Delta X}{R\lambda}}{\frac{2\pi d_c \Delta X}{R\lambda}} \right]^2. \quad (\text{II.163})$$

Ширина аппаратурной функции по уровню 0,5

$$\delta X = 0,44 \frac{R\lambda}{d_c} \approx \frac{R\lambda}{2d_c}. \quad (\text{II.164})$$

На рис. 39 иллюстрируются случаи наблюдения одиночной и парных целей, отстоящих на разных расстояниях с одинаковой и разной амплитудами и с разными фазами. Основным фактором, определяющим возможность раздельного наблюде-

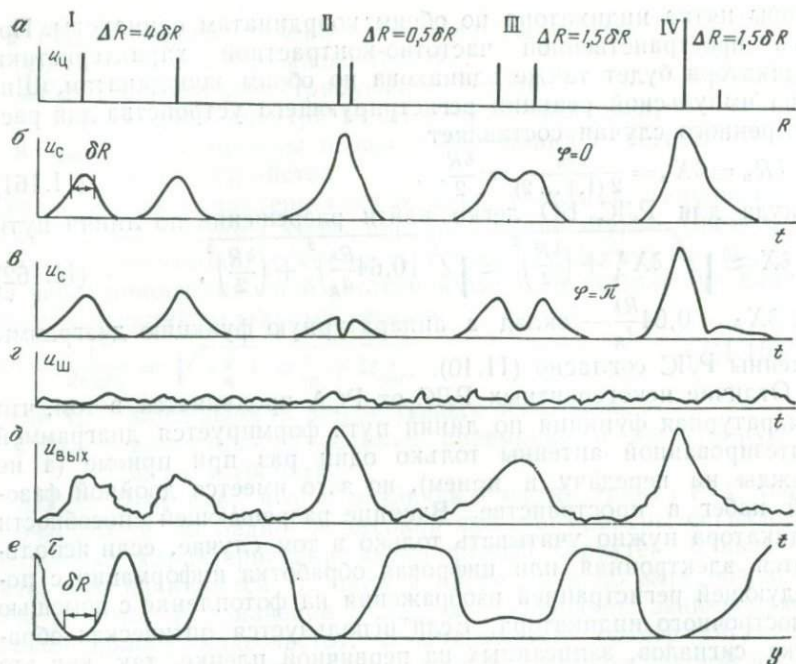


Рис. 39. Воспроизведение близкорасположенных целей с помощью радиолокационной станции:

a — расположение целей на местности (по наклонной дальности); *б* — сигнал на выходе приемника при синфазных целях; *в* — сигнал на выходе приемника при противофазных целях; *г* — шумы на входе приемника; *д* — выходной сигнал приемника при наличии шума (цели синфазные); *е* — изменение прозрачности негатива (шумы не учитываются, цели синфазные)

ния целей, является форма импульсной реакции системы и ее ширина. Если реакции от целей не накладываются, цели наблюдаются независимо. Если реакции накладываются, большую роль играет разность фаз между отраженными сигналами. Лучший случай для разрешения, когда разность фаз равна π . Тогда выходной сигнал от пары целей будет всегда иметь провал (см. рис. 39, *в*) и они будут регистрироваться на выходе раздельно. Правда, для очень близких целей амплитуда выходного сигнала будет малой. Худший случай для разрешения — это синфазные цели $\Delta \varphi = 0$ (см. рис. 39, *б*), при малом расстоянии между целями выходной сигнал имеет вид, близкий к сигналу от одиночной цели.

Следует отметить, что критерием различения целей может быть не только наличие провала в реакции системы, но также изменение формы отметки на радиолокационном изображении — эллиптическая отметка при наличии двух целей и круглая отметка от одиночной цели. Это является дополнительным дешифрирующим признаком.

На разрешение целей влияет и соотношение между их ампли-

тудами: слабая цель может не обнаруживаться в присутствии сильной. Наличие в приемном тракте шумов, а также флюктуации сигнала от подстилающей поверхности могут привести к тому, что выходной сигнал исказится, при этом в его огибающей могут появиться провалы, так что одиночная цель будет принята за парную и, наоборот, провал в огибающей парных целей может замазываться шумами (см. рис. 39) и они будут регистрироваться как одна цель. Это явление приводит к ухудшению разрешающей способности системы, так как при наличии шумов цели будут надежно разрешаться при большем расстоянии между ними.

Обычно ухудшение разрешения, вызванное шумами и флюктуациями фона, не превышает 20—30% от ширины аппаратурной функции системы, так как речь идет о разрешении целей, обнаруженных на фоне шумов или флюктуаций, а для надежного обнаружения необходимо, чтобы отношение мощности сигнала и флюктуаций было велико.

Нелинейности в тракте РЛС (например, при регистрации изображения) также приводят к искажениям сигнала, но уже имеющим систематический характер в зависимости от амплитуды целей. Выходной сигнал будет преобразовываться в соответствии с формой амплитудной характеристики системы, и контрасты провалов, характерных для огибающей сигнала от пары целей, будут изменяться, чаще всего уменьшаться, обращаясь в нуль, если в тракте имеется ограничение. При этом форма сигнала даже от одиночной цели будет изменяться в зависимости от амплитуды.

Естественно, что в общем случае наблюдения произвольного объекта трудно прогнозировать характер изменения прозрачности выходного изображения, даже если знать аппаратурную функцию и амплитудную характеристику системы. Однако несомненно, что система, имеющая более узкую аппаратурную функцию, будет при прочих равных условиях лучше воспроизводить элементы сложной цели. Поэтому за меру разрешения системы принимают ширину аппаратурной функции на уровне 0,5 определяемой в условиях, когда система работает на линейном участке сквозной амплитудной характеристики.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДИНОЧНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СНИМКА

§ 10. Математическая модель снимка, получаемого РЛС БО

Рассмотрим математическую модель одиночного РЛ снимка, получаемого РЛС БО (под снимком будем понимать условный кадр изображения, имеющий определенные размеры). При этом воспользуемся системами координат, показанными на рис. 40 и 41:

— фотограмметрической системой координат $(SX_\phi Y_\phi Z_\phi)$, начало которой расположено в геометрическом центре вдольфюзеляжной антенны; ось SZ_ϕ направлена по нормали; ось SX_ϕ совпадает с вектором путевой скорости носителя; ось SY_ϕ занимает положение правой системы координат;

— системой координат антенны $(SX'Y'Z')$, начало которой находится в геометрическом центре вдольфюзеляжной антенны; ось SX' совпадает с продольной осью антенны; ось SY' совпадает с поперечной осью антенны и образует правую систему координат; ось SZ' перпендикулярна к плоскости, образуемой осями SX' и SY' ;

— системой координат изображения (oxy) , начало которой находится в центре РЛ снимка; ось oy направлена в сторону больших дальностей; ось ox противоположна вектору протяжки пленки и образует правую систему координат при левостороннем обзоре и левую систему координат при правостороннем обзоре местности.

В реальном случае съемки геометрические свойства получаемых изображений зависят от величины элементов ориентирования РЛ снимка и антенны. Элементы ориентирования снимка (см. рис. 41) определяют положение геометрического центра антенны относительно снимка. В качестве последних примем x_0y_0 — координаты точки (будем называть ее главной точкой РЛ снимка), для которой известно значение наклонной дальности;

R_0 — величина наклонной дальности, соответствующей главной точке РЛ снимка;

θ — угол, образованный строкой индикатора и перпендикуляром к вектору скорости протяжки пленки;

α — угол, составленный осью ox и вектором скорости протяжки пленки.

Элементы ориентирования антенны (рис. 42) определяют положение радиолокационного луча в момент излучения импульса. Их будем характеризовать:

$X_S Y_S Z_S$ — координатами точки S , из которой произведено излучение импульса;

ϑ — продольным углом наклона антенны, заключенным между осью SX' и плоскостью $X_\phi Y_\phi$;

ψ — углом поворота антенны, находящимся между проекцией оси SX' на плоскости $X_\phi Y_\phi$ и осью SX_ϕ .

Положение точки S (рис. 43) относительно некоторого начала O определяет вектор \vec{a} или координаты $X_S Y_S Z_S$. Положение точки M местности относительно того же начала определяет вектор \vec{b} или координаты XYZ . Положение той же точки M

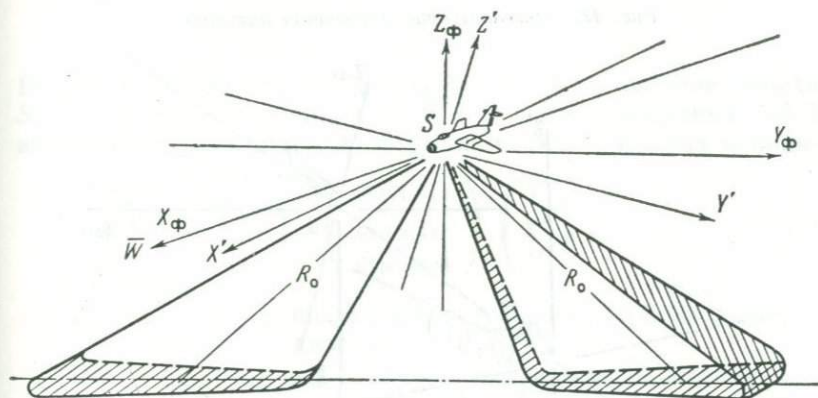


Рис. 40. Системы координат

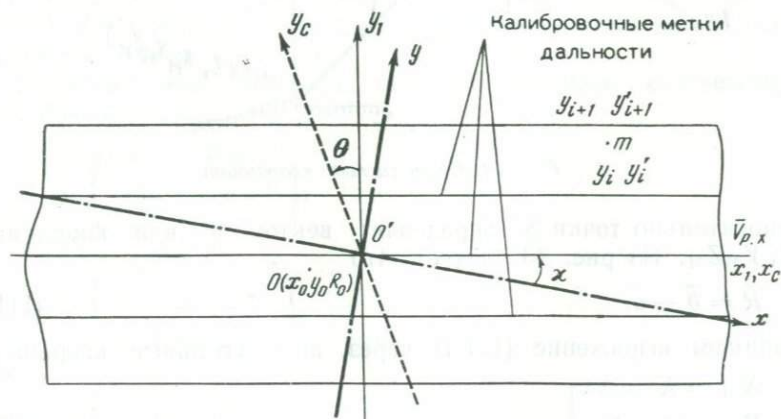


Рис. 41. Элементы ориентирования радиолокационного снимка

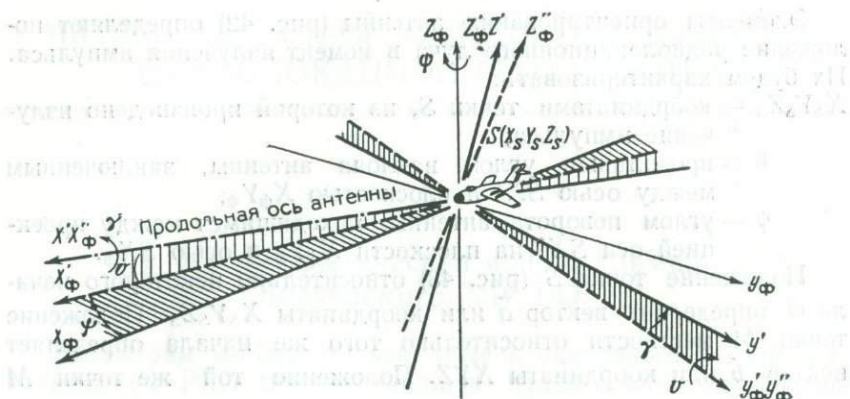


Рис. 42. Элементы ориентирования антенны

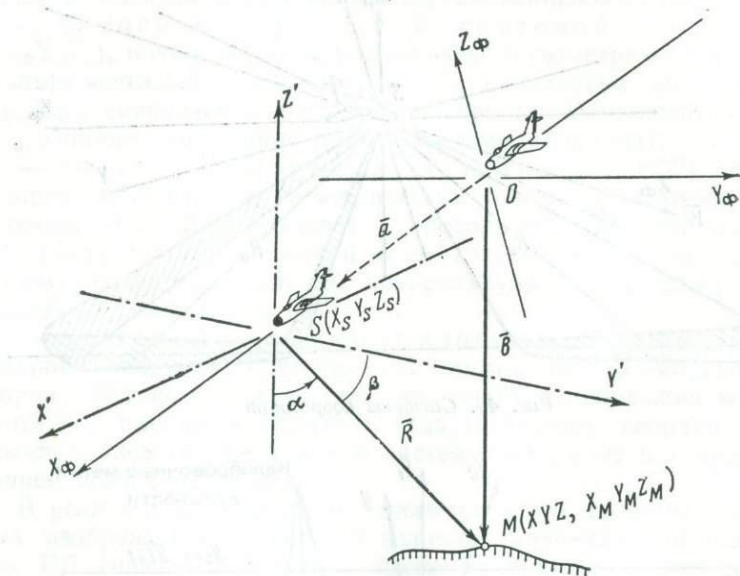


Рис. 43. Связь систем координат

относительно точки S определяет вектор \bar{R} или координаты $X_M Y_M Z_M$. Из рис. 43 следует, что

$$\bar{R} = \bar{b} - \bar{a}. \quad (\text{III.1})$$

Запишем выражение (III.1) через прямоугольные координаты

$$\left. \begin{aligned} X_M &= X - X_S \\ Y_M &= Y - Y_S \\ Z_M &= Z - Z_S \end{aligned} \right\}. \quad (\text{III.2})$$

Таблица 5

Оси	X'_ϕ	Y'_ϕ	Z'_ϕ	Оси	X''_ϕ	Y''_ϕ	Z''_ϕ	Оси	X'	Y'	Z'
X_ϕ	ψ	$\frac{\pi}{2} - \psi$	$\frac{\pi}{2}$	X_ϕ	ϑ	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} + \vartheta$	X_ϕ	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
Y_ϕ	$\frac{\pi}{2} + \psi$	ψ	$\frac{\pi}{2}$	Y_ϕ	$\frac{\pi}{2}$	0	$\frac{\pi}{2}$	Y_ϕ	$\frac{\pi}{2}$	γ	$\frac{\pi}{2} + \gamma$
Z_ϕ	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0	Z_ϕ	$\frac{\pi}{2} - \vartheta$	$\frac{\pi}{2}$	ϑ	Z_ϕ	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} - \gamma$	γ

Выразим координаты $X_M Y_M Z_M$ точки M в системе координат $SX_\phi Y_\phi Z_\phi$ через координаты $X' Y' Z'$ в системе координат $SX' Y' Z'$ антенны по известным [68] формулам преобразования координат:

$$\begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11}c_{12}c_{13} \\ c_{21}c_{22}c_{23} \\ c_{31}c_{32}c_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}, \quad (\text{III.3})$$

где A — квадратичная матрица преобразования координат,

$c_{11}, c_{12}, \dots, c_{33}$ — направляющие косинусы.

Для определения направляющих косинусов последовательно повернем систему координат $SX_\phi Y_\phi Z_\phi$ на углы: ψ — вокруг оси Z_ϕ ($SX'_\phi Y'_\phi Z'_\phi$), ϑ — вокруг оси Y'_ϕ ($SX''_\phi Y''_\phi Z''_\phi$) и γ — вокруг оси X''_ϕ ($SX' Y' Z'$) (см. рис. 42). Составим таблицу углов между координатными осями (табл. 5).

Пользуясь этой таблицей, напомним матрицы, соответствующие поворотам ψ , ϑ и γ :

$$A_\psi = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$A_\vartheta = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & 0 & -\sin \vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \vartheta & 0 & \cos \vartheta \end{pmatrix};$$

$$A_\gamma = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}.$$

Матрицу A , определяющую переход от координат $X'Y'Z'$ к координатам $X_M Y_M Z_M$, получим как произведение матриц

$$A = A_\psi A_\theta A_\gamma.$$

В результате перемножения будем иметь:

$$A = \begin{vmatrix} \cos \psi \cos \theta \sin \psi \cos \gamma - \cos \psi \sin \theta \sin \gamma - \sin \psi \sin \gamma - \\ - \cos \psi \sin \theta \cos \gamma \\ - \sin \psi \cos \theta \cos \psi \cos \gamma + \sin \psi \sin \theta \sin \gamma - \cos \psi \sin \gamma + \\ + \sin \psi \sin \theta \cos \gamma \\ \sin \theta \quad \cos \theta \sin \gamma \quad \cos \theta \cos \gamma \end{vmatrix}.$$

Сопоставив полученное выражение матрицы A с формулой (III. 3), запишем:

$$\left. \begin{aligned} c_{11} &= \cos \psi \cos \theta \\ c_{12} &= \sin \psi \cos \gamma - \cos \psi \sin \theta \sin \gamma \\ c_{13} &= -\sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \theta \cos \gamma \\ c_{21} &= -\sin \psi \cos \theta \\ c_{22} &= \cos \psi \cos \gamma + \sin \psi \sin \theta \sin \gamma \\ c_{23} &= -\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \theta \cos \gamma \\ c_{31} &= \sin \theta \\ c_{32} &= \cos \theta \sin \gamma \\ c_{33} &= \cos \theta \cos \gamma \end{aligned} \right\}. \quad (\text{III. 4})$$

В РЛС БО сигналы излучаются перпендикулярно к оси SX' вдольфюзеляжной антенны [43]. Поэтому вектор \bar{R} , направленный из центра антенны на произвольную точку M местности, всегда находится в плоскости, образуемой осями SZ' и SY' . Указанное свойство приводит к тому, что углы, образуемые положительными направлениями SX' , SY' и SZ' с вектором \bar{R} (см. рис. 44), становятся равными:

$$\cos \alpha = \frac{Z'}{R}, \quad (\text{III.5})$$

$$\cos \beta = \cos \left(\frac{\pi}{2} \mp \alpha \right) = \pm \sin \alpha = \frac{Y'}{R}, \quad (\text{III.6})$$

$$\cos \omega = \frac{X'}{R} = 0, \quad (\text{III.7})$$

где α — угол, образованный вектором \bar{R} с осью SZ' ;

β — угол, образованный вектором \bar{R} с осью SY' ;

ω — угол, образованный вектором \bar{R} с осью SX' ;

R — модуль вектора \bar{R} .

Необходимо заметить, что знак (+) при $\sin \alpha$ соответствует левостороннему обзору, знак (—) соответствует правостороннему обзору местности.

Из формул (III.6) и (III.7) следует, что

$$\left. \begin{aligned} X' &= 0 \\ Y' &= \pm R \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (III.8)$$

В полученное выражение для Y' подставим значение угла α из уравнения (III.5):

$$Y' = \pm R \sin \left(\arccos \frac{Z'}{R} \right).$$

Выразим арккосинус через арксинус. В результате получим

$$Y' = \pm \sqrt{R^2 - Z'^2}.$$

Значение Z' найдем из (III.3):

$$Z' = \frac{Z_M - c_{32}Y'}{c_{33}}.$$

Тогда

$$Y'^2 = R^2 - \frac{(Z_M - c_{32}Y')^2}{c_{33}^2}. \quad (III.9)$$

Решая уравнение (III.9), получим

$$Y' = \frac{c_{32}Z_M + c_{33} \sqrt{R^2 (c_{33}^2 + c_{32}^2) - Z_M^2}}{c_{33}^2 + c_{32}^2}.$$

Найденные значения Z' и Y' подставим в выражения для X_M и Y_M формулы (III.3):

$$X_M = (c_{12}c_{33} - c_{13}c_{32}) \frac{\frac{c_{32}}{c_{33}} Z_M \pm \sqrt{R^2 (c_{33}^2 + c_{32}^2) - Z_M^2}}{c_{33}^2 + c_{32}^2} + \frac{c_{13}}{c_{33}} Z_M,$$

$$Y_M = (c_{22}c_{33} - c_{23}c_{32}) \frac{\frac{c_{32}}{c_{33}} Z_M \pm \sqrt{R^2 (c_{33}^2 + c_{32}^2) - Z_M^2}}{c_{33}^2 + c_{32}^2} + \frac{c_{32}}{c_{33}} Z_M.$$

Преобразуем полученные уравнения, подставив в них значения направляющих косинусов из формул (III.4)

$$X_M = \pm \sin \psi \sqrt{R^2 - Z_M^2 \sec^2 \vartheta} - Z_M \cos \psi \operatorname{tg} \vartheta, \quad (III.10)$$

$$Y_M = \pm \cos \psi \sqrt{R^2 - Z_M^2 \sec^2 \vartheta} + Z_M \sin \psi \operatorname{tg} \vartheta. \quad (III.11)$$

Заменим в формуле (III.2) X_M и Y_M их значениями из выражений (III.10) и (III.11) и получим

$$X = X_s \pm \sin \psi \sqrt{R^2 - (Z - Z_s)^2 \sec^2 \vartheta} - (Z - Z_s) \cos \psi \operatorname{tg} \vartheta, \quad (III.12)$$

$$Y = \pm \cos \psi \sqrt{R^2 - (Z - Z_s)^2 \sec^2 \vartheta} + (Z - Z_s) \sin \psi \operatorname{tg} \vartheta + Y_s. \quad (III.13)$$

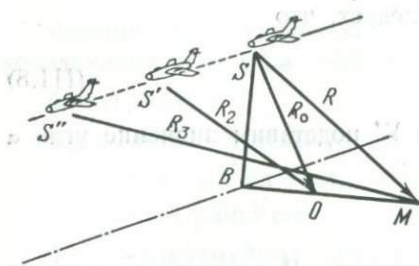


Рис. 44. Смещение сигналов при поступательном движении носителя

Выразим модуль вектора \bar{R} и абсциссу X_s через измеренные координаты точек РЛ снимка.

Радиоимпульс, излученный передатчиком РЛС БО, достигнет поверхности земли в точках, лежащих на прямой BM (рис. 44). Отраженные сигналы в связи с перемещением носителя достигнут приемной антенны в разных точках траектории полета. Поэтому для

произвольной точки M местности время с момента излучения импульса и до момента приема отраженного сигнала будет равно

$$t_2 = \frac{R + R_3}{c}, \quad (III.14)$$

а для главной точки РЛ снимка

$$t_1 = \frac{R_0 + R_2}{c}. \quad (III.15)$$

Разность между временами t_2 и t_1 на экране ЭЛТ выразится отрезком, определяющим ординату точки M , длина которого зависит от скорости строчной развертки, так что

$$y_{\text{элт}} = V_{p.u.}(t_2 - t_1), \quad (III.16)$$

где $V_{p.u.}$ — скорость строчной развертки.

Выразим наклонные дальности R_2 и R_3 через путевую скорость (W) носителя и наклонные дальности R_0 и R . Из прямоугольных треугольников SOS' и SMS'' (см. рис. 44) имеем:

$$\left. \begin{aligned} R_2^2 &= R_0^2 + (Wt_1)^2 \\ R_3^2 &= R^2 + (Wt_2)^2 \end{aligned} \right\} \quad (III.17)$$

Решая совместно уравнения (III.14), (III.15) и (III.17), найдем значения t_1 и t_2 :

$$t_1 = \frac{2cR_0}{c^2 - W^2}, \quad t_2 = \frac{2cR}{c^2 - W^2},$$

тогда

$$y_{\text{элт}} = \frac{2V_{p.u.}c}{c^2 - W^2} (R - R_0). \quad (III.18)$$

Разделим числитель и знаменатель выражения (III.18) на скорость распространения радиоволн:

$$y_{\text{элт}} = \frac{2V_{p.u.}}{c - \frac{W}{c}} (R - R_0). \quad (III.19)$$

В формуле (III.19) величина $\frac{W}{c} W$ при существующих скоростях полета очень мала и не превышает $3 \cdot 10^{-3}$ м/с, поэтому запишем эту формулу в следующем виде:

$$y_{\text{ЭЛТ}} = \frac{2V_{p,y}}{c} (R - R_0).$$

При фотографировании изображения с экрана ЭЛТ в масштабе $\frac{1}{K}$ ординаты точек РЛ снимка вдоль оси oy_c становятся равными:

$$y_c = \frac{1}{K} y_{\text{ЭЛТ}} = \frac{2V_{p,y}}{c \cdot K} (R - R_0). \quad (\text{III.20})$$

Выполняя поворот РЛ снимка на угол α , перейдем от системы координат oxy к системе координат ox_1y_1 . Кроме того, повернем ось oy на угол θ , совместив ее с осью oy_c . Согласно формулам преобразования координат на плоскости и построениям рис. 41, запишем:

$$x_c = (x - x_0) (\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \theta) - (y - y_0) (\sin \alpha - \cos \alpha \operatorname{tg} \theta), \quad (\text{III.21})$$

$$y_c = \pm \frac{(y - y_0) \cos \alpha + (x - x_0) \sin \alpha}{\cos \theta}. \quad (\text{III.22})$$

Выражение модуля вектора \bar{R} через измеренные координаты точек РЛ снимка найдем из решения уравнений (III.20) и (III.22):

$$R = \pm \frac{cK}{2V_{p,y}} \frac{(y - y_0) \cos \alpha + (x - x_0) \sin \alpha}{\cos \theta} + R_0. \quad (\text{III.23})$$

При определении абсциссы X_s заметим, что ось SX_ϕ параллельна вектору путевой скорости носителя. Следовательно, носитель, имеющий путевую скорость W , пролетит расстояние X_s за время t_x :

$$t_x = \frac{X_s}{W}. \quad (\text{III.24})$$

В течение этого времени непрерывно движущаяся пленка сместится вдоль оси ox_c на величину

$$x_c = V_{p,x} \cdot t_x, \quad (\text{III.25})$$

где $V_{p,x}$ — скорость протяжки пленки в устройстве регистрации изображения.

Заменим t_x в формуле (III.25) его значением из формулы (III.24). Тогда

$$x_c = \frac{V_{p,x}}{W} X_s. \quad (\text{III.26})$$

Решая совместно уравнения (III.21) и (III.26), получим выражение X_s через измеренные координаты точек РЛ снимка

$$X_s = \frac{W}{V_{p,x}} [(x - x_0) (\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \theta) - (y - y_0) (\sin \alpha - \cos \alpha \operatorname{tg} \theta)]. \quad (\text{III.27})$$

Подставим значения R и X_s в формулы (III.12) и (III.13):

$$X = \frac{W}{V_{p,x}} [(x - x_0) (\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \theta) - (y - y_0) (\sin \alpha - \cos \alpha \operatorname{tg} \theta)] \pm \sin \psi \times \\ \times \sqrt{\left[\pm \frac{cK}{2V_{p,y}} \cdot \frac{(y - y_0) \cos \alpha + (x - x_0) \sin \alpha}{\cos \theta} + R_0 \right]^2 - (Z - Z_s)^2 \sec^2 \theta - (Z - Z_s) \cos \psi \operatorname{tg} \theta}, \quad (\text{III.28})$$

$$Y = \pm \cos \psi \times \\ \times \sqrt{\left[\pm \frac{cK}{2V_{p,y}} \cdot \frac{(y - y_0) \cos \alpha + (x - x_0) \sin \alpha}{\cos \theta} + R_0 \right]^2 - (Z - Z_s)^2 \sec^2 \theta + (Z - Z_s) \sin \psi \operatorname{tg} \theta + Y_s}. \quad (\text{III.29})$$

Найденные уравнения являются математической моделью одиночного РЛ снимка, получаемого РЛС БО.

§ 11. Математическая модель снимка, получаемого РСА

В реальных условиях процесс получения изображения в РСА характеризуется наличием большого числа источников, оказывающих влияние на геометрические свойства РЛ изображения. Характер воздействия этих источников на изображение может быть как регулярным, так и случайным (например, случайные искажения фазы на длине искусственного раскрыва). Известно, что случайные воздействия не подчиняются строгому математическому описанию, поэтому при рассмотрении математической модели одиночного РЛ снимка, полученного РСА, будем учитывать влияние только регулярных источников. К числу регулярных источников, оказывающих влияние на геометрические свойства РЛ изображения, относятся [86]: отклонение носителя от прямолинейной траектории в боковом направлении (ΔY) и по высоте (ΔH), изменение скорости полета носителя (ΔW) и длины волны ($\Delta \lambda$) передатчика. В результате воздействия этих источников положение синтезированного луча, отнесенного к пространству объектов съемки, оказывается непостоянным.

Определим отклонение синтезированного луча от расчетного направления ψ_r (рис. 45).

Воздействие параметров ΔY , ΔH , ΔW и $\Delta \lambda$ приводит к появлению на длине искусственного раскрыва паразитного набега

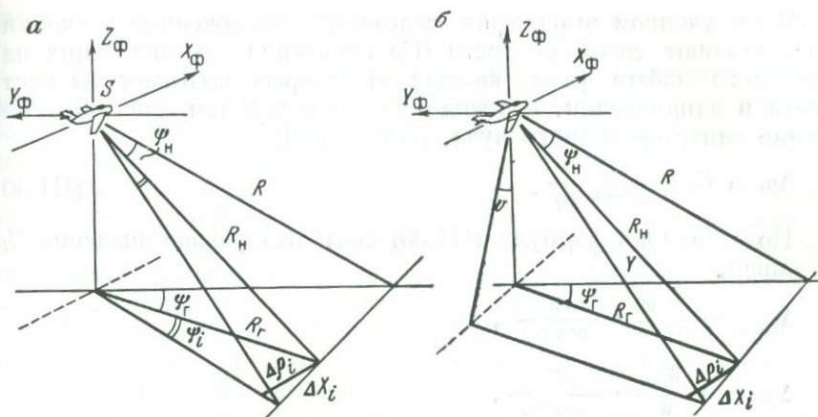


Рис. 45. Смещение синтезированного луча на местности

фазы, который с точностью до величины первого порядка малости можно записать [86] в следующем виде:

$$\Delta\varphi(t) = \frac{4\pi R}{\lambda} \left[\frac{\Delta Y(t)}{R^2} Y + \frac{\Delta H(t)}{R^2} H + \frac{\Delta\lambda(t)}{\lambda} \right] + \frac{4\pi W \sin \psi_H}{\lambda} \times \\ \times \left[\frac{\Delta W(t)}{W} - \frac{\Delta\lambda(t)}{\lambda} \right] t,$$

где $\Delta Y(t)$, $\Delta H(t)$, $\Delta\lambda(t)$ и $\Delta W(t)$ — соответственно, временные функции бокового уклонения, изменения высоты полета, изменения длины волны передатчика и изменения путевой скорости носителя на длине искусственного раскрыва,

t — текущее время,

ψ_H — угол, заключенный между направлением на объект и плоскостью $Z_\phi Y_\phi$.

Выразим параметры $\Delta Y(t)$, $\Delta H(t)$, $\Delta\lambda(t)$ и $\Delta W(t)$ через средние скорости изменения этих параметров на длине искусственного раскрыва.

Тогда

$$\Delta\varphi(t) = t \cdot \left[\frac{4\pi Y W_Y}{\lambda R} + \frac{4\pi H W_H}{\lambda R} + \frac{4\pi R W_\lambda}{\lambda^2} + \frac{4\pi \sin \psi_H \Delta W}{\lambda} - \right. \\ \left. - \frac{4\pi W \sin \psi_H \Delta\lambda}{\lambda^2} \right],$$

где W_Y , W_H , W_λ — соответственно, средние скорости изменения бокового уклонения, высоты и длины волны передатчика на длине искусственного раскрыва,

ΔW — среднее изменение путевой скорости носителя на длине искусственного раскрыва,

$\Delta\lambda$ — среднее изменение длины волны передатчика на длине искусственного раскрыва.

В полученном выражении слагаемые, заключенные в скобки, представляют собой скорости (C_i) изменения составляющих паразитного набега фазы, каждая из которых вызывает на местности в направлении, перпендикулярном к R (см. рис. 45), смещение синтезированного луча, равное [86]:

$$\Delta \rho_{C_i} = C_i \frac{\lambda R}{4\pi W \cos \psi_H}. \quad (\text{III.30})$$

Подставляя в формулу (III.30) соответствующие значения C_i , запишем,

$$\Delta \rho_{W_Y} = \frac{W_Y}{W} \cdot \frac{Y}{\cos \psi_H},$$

$$\Delta \rho_{W_H} = \frac{W_H}{W} \cdot \frac{H}{\cos \psi_H},$$

$$\Delta \rho_{W_\lambda} = \frac{W_\lambda}{\lambda W} \cdot \frac{H^2}{\cos \psi_H},$$

$$\Delta \rho_{W_\lambda} = \frac{W_\lambda}{\lambda W} \cdot \frac{R_r^2}{\cos \psi_H},$$

$$\Delta \rho_{\Delta W} = \frac{\Delta W}{W} \cdot \frac{Y}{\cos \psi_H} \operatorname{tg} \psi_r,$$

$$\Delta \rho_{\Delta \lambda} = -\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot \frac{Y}{\cos \psi_H} \operatorname{tg} \psi_r.$$

Здесь, как следует из рис. 45,

$$Y \operatorname{tg} \psi_r = R \sin \psi_H, \quad H^2 + R_r^2 = R^2.$$

В существующих РСА угол ψ_r обычно не превышает 1,5–2°. Поэтому, полагая $\psi_r \approx \psi_H$, представим полученные выражения в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta \rho_{W_Y}}{Y} \cos \psi_r &= \frac{\Delta \rho_{W_Y}}{R_r} = \frac{W_r}{W} = \operatorname{tg} \psi_1 \\ \frac{\Delta \rho_{W_H}}{H} \cos \psi_r &= \frac{\Delta X_{W_H}}{H} = \frac{W_H}{W} = \operatorname{tg} \psi_2 \\ \frac{\Delta \rho_{W_\lambda}}{H} \cos \psi_r &= \frac{\Delta X_{W_\lambda}}{H} = \frac{W_\lambda}{\lambda W} \cdot H = \operatorname{tg} \psi_3 \\ \frac{\Delta \rho_{W_\lambda}}{R_r} \cos \psi_r &= \frac{\Delta \rho_{W_\lambda}}{R_r} = \frac{W_\lambda}{\lambda W} R_r = \operatorname{tg} \psi_4 \\ \frac{\Delta \rho_{\Delta W}}{Y} \cos \psi_r &= \frac{\Delta \rho_{\Delta W}}{R_r} = \frac{\Delta W}{W} \operatorname{tg} \psi_r = \operatorname{tg} \psi_5 \\ \frac{\Delta \rho_{\Delta \lambda}}{Y} \cos \psi_r &= \frac{\Delta \rho_{\Delta \lambda}}{R_r} = -\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \operatorname{tg} \psi_r = \operatorname{tg} \psi_6 \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.31})$$

где ΔX_i — смещение на местности синтезированного луча вдоль полета носителя.

Из формулы (III.31) следует, что боковое отклонение носителя от прямолинейной траектории приводит к развороту синтезированного луча на угол ψ_1 , аналогичный углу рыскания в станциях с вдольфюзеляжной антенной (см. рис. 45, а).

Изменение высоты полета носителя вызывает отклонение луча на угол ϑ_1 , который полностью соответствует углу тангажа в станциях с вдольфюзеляжной антенной (см. рис. 45, б). Изменение длины волны передатчика приводит к появлению трех углов ψ_2 , ψ_4 и ϑ_2 (при $\psi_r = 0$ — двух углов), аналогичных углам рыскания и тангажа. Непостоянство путевой скорости носителя при $\psi_r \neq 0$ вызывает так же, как рыскание в станциях с вдольфюзеляжной антенной, разворот синтезированного луча на угол ψ_3 .

В общем случае, при совместном влиянии регулярных изменений параметров Y , H , W и λ и постоянном угле ψ_r отворота антенны положение синтезированного луча в пространстве объектов будет определяться суммой этих углов:

$$\psi = \psi_r + \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4, \quad (\text{III.32})$$

$$\vartheta = \vartheta_1 + \vartheta_2. \quad (\text{III.33})$$

В реальных условиях формирования искусственного раскрыва величинами углов ψ_2 , ψ_4 и ϑ_2 можно пренебречь ввиду их малости, так как нестабильность длины волны передатчика обычно не превышает 10^{-6} . Тогда при малых изменениях параметров Y , H и W формулы (III.32) и (III.33) можно записать в следующем виде:

$$\psi = \psi_r + \frac{W_r}{W} + \frac{\Delta W}{W} \text{tg } \psi_r, \quad (\text{III.34})$$

$$\vartheta = \frac{W_H}{W}. \quad (\text{III.35})$$

Таким образом, положение искусственного раскрыва антенны характеризуется угловыми элементами ориентирования, аналогичными угловым элементам ориентирования вдольфюзеляжной антенны. Это значит, что искусственный раскрыв антенны можно рассматривать как вдольфюзеляжную антенну очень большой длины. Тогда формулы (III.28) и (III.29) с учетом масштабных преобразований в спектроанализаторе можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} X &= M_x [(x - x_0) (\cos \alpha + \sin \alpha \text{tg } \theta) - (y - y_0) (\sin \alpha - \\ &\quad - \cos \alpha \text{tg } \theta)] \pm \sin \psi \times \\ &\times \sqrt{\left[\pm \frac{cK}{2V_{p,y}} \cdot M_y \frac{(y - y_0) \cos \alpha + (x - x_0) \sin \alpha}{\cos \theta} + R_0 \right]^2 - (Z - Z_s)^2 \sec^2 \theta -} \\ &\quad - (Z - Z_s) \cos \psi \text{tg } \vartheta, \end{aligned} \quad (\text{III.36})$$

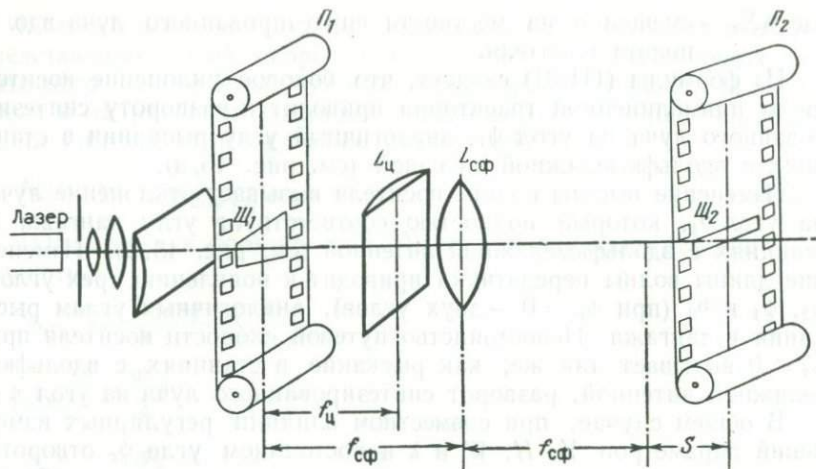


Рис. 46. Спектроанализатор

$$Y = \pm \cos \psi \times \sqrt{\left[\pm \frac{cK}{2V_{p,y}} \cdot M_y \frac{(y-y_0) \cos \alpha + (x-x_0) \sin \alpha}{\cos \theta} + R_0 \right]^2 - (Z - Z_s)^2 \sec^2 \theta + (Z - Z_s) \sin \psi \operatorname{tg} \theta + Y_s}, \quad (\text{III.37})$$

где M_x , M_y — знаменатели масштабов преобразования изображения в спектроанализаторе,

ψ , θ — угловые элементы ориентирования искусственного раскрыва антенны, вычисляемые по формулам (III.34) и (III.35).

Определим масштабы $\frac{1}{M_y}$ и $\frac{1}{M_x}$ преобразования РЛ изображения в спектроанализаторе. Для этого обратимся к рис 46. Так как цилиндрическая линза $L_{ц}$ расположена на фокусном расстоянии от плоскости записи Π_1 , то фокальная плоскость дальности в этом случае отображается на бесконечность. Сферическая линза $L_{сф}$ переносит изображение из бесконечности в заданную плоскость. Отсюда следует, что масштаб преобразования изображения по оси ординат будет равен:

$$\frac{1}{M_y} = \frac{f_{сф}}{f_{ц}}, \quad (\text{III.38})$$

где $f_{сф}$ — фокусное расстояние сферической линзы;

$f_{ц}$ — фокусное расстояние цилиндрической линзы.

Масштаб преобразования изображения по оси абсцисс найдем из следующих соображений [63].

Запись сигналов по оси абсцисс можно рассматривать как зонную пластинку (голограмму), имеющую фокусное расстояние

$$f = \frac{\lambda R}{2\lambda_c n_x^2},$$

где f — фокусное расстояние зонной пластинки,
 λ_c — длина волны оптического источника когерентного излучения, используемого при восстановлении голограммы,

$n_x = \frac{W}{V_{p.1.x}}$ — масштабный коэффициент записи сигналов на первичной пленке,
 $V_{p.1.x}$ — скорость записи на первичную пленку.

Сферическая линза L_{cf} находится от нее на расстоянии f_{cf} , поэтому масштаб преобразованного изображения оказывается равным

$$\frac{1}{M_x} = \frac{f_{cf}}{f} = \frac{2n_x^2 \lambda_c f_{cf}}{\lambda R}, \quad (III.39)$$

т. е. масштаб изображения изменяется обратно пропорционально наклонным дальностям. При движении первичной пленки изображение в выходной плоскости также перемещается со скоростью $V_{p.3.x}$, равной

$$V_{p.3.x} = n_x V_{p.2.x} \frac{s}{f}, \quad (III.40)$$

где $V_{p.2.x}$ — скорость протяжки первичной пленки в спектроанализаторе,

$s = \frac{2n_x^2 \cdot f_{cf}^2 \lambda_c}{\lambda R}$ — расстояние от заднего фокуса сферической линзы до вторичной пленки.

Подставив значения f и s в формулу (III.40), получим

$$V_{p.3.x} = V_{p.2.x} \frac{2n_x^3 \lambda_c f_{cf}}{\lambda R}.$$

Тогда

$$R = \frac{2n_x^3 \lambda_c f_{cf}}{\lambda} \cdot \frac{V_{p.2.x}}{V_{p.3.x}}.$$

Найденное значение R подставим в формулу (III.39), получим

$$\frac{1}{M_x} = \frac{1}{n_x} \frac{V_{p.3.x}}{V_{p.2.x}} = \frac{V_{p.1.x}}{W} \cdot \frac{V_{p.3.x}}{V_{p.2.x}}. \quad (III.41)$$

Согласно выражению (III.41) масштаб преобразования РЛ изображения по оси абсцисс не зависит от оптических параметров спектроанализатора и определяется только соотношением скоростей протяжки первичной и вторичной пленки.

Рассмотренные модели одиночных РЛ снимков учитывают большинство систематических источников, оказывающих влияние на геометрию РЛ изображений, и являются основой для разработки аналитических методов определения координат объектов местности.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ§ 12. Критерии оценки измерительных свойств
радиолокационного изображения

Под измерительными свойствами любого изображения понимают такие свойства, которые влияют на точность геометрического описания объекта съемки. Обычно предполагается, что всякому изображению, полученному объективными датчиками, в том числе и радиолокационному (РЛ) изображению, соответствует априорная математическая модель. В качестве априорной математической модели РЛ изображения можно принять модель, описываемую формулами (III.28) и (III.29) или (III.36) и (III.37).

В силу принципиально неустранимых различий между абстрактными условиями построения априорной математической модели и условиями формирования реального изображения, последнее всегда оказывается деформированным.

При геометрическом описании объекта реальное изображение может либо приниматься за свою априорную модель, либо предварительно исправляться путем введения компенсирующих поправок. В первом случае точность геометрического описания зависит от степени геометрического несоответствия реального изображения своей априорной модели. Поэтому степень геометрического несоответствия, характеризуемая уровнем деформаций, может рассматриваться как первый показатель измерительных свойств РЛ изображения.

Во втором случае точность геометрического описания зависит от полноты учета источников деформаций, а также от погрешностей, с которыми введены компенсирующие поправки. Разности между деформациями и вводимыми для их компенсации поправками представляют собой остаточные деформации изображения. Остаточные деформации определяют точность результата решения измерительной задачи на основе данного изображения и могут служить вторым показателем измерительных свойств РЛ изображения.

Величины деформаций и остаточных деформаций оценивают их средними квадратическими (ср. кв.) значениями. При этом пользуются как местной ср. кв. величиной деформаций m , соответствующей произвольной точке изображения, так и интег-

ральной ср. кв. величиной деформаций M_d , характеризующей точность определения положения совокупности точек участка изображения.

§ 13. Деформации изображения, получаемого РЛС БО

Основными источниками деформаций априорной математической модели изображения, получаемого РЛС БО, являются [44], [86]:

- нестабильность высоты полета носителя;
- боковые уклонения носителя от заданной линии пути;
- погрешности стабилизации антенны по тангажу и курсу;
- нестабильность масштаба записи изображения по азимуту;
- нелинейность строчной развертки.

В общем случае местная ср. кв. величина деформаций, соответствующая произвольной точке РЛ изображения, будет равна

$$m = \sqrt{m_x^2 + m_y^2},$$

$$m_x = \frac{1}{M_x} \cdot m_X,$$

$$m_y = \frac{1}{M_y} \cdot m_Y,$$
(IV.1)

где m_x, m_y — местные ср. кв. величины деформаций произвольной точки изображения, соответственно, вдоль оси абсцисс и ординат;

m_X, m_Y — ср. кв. погрешности в определении координат той же точки на местности;

M_x, M_y — знаменатели масштабов изображения в определяемой точке.

Последние найдем путем дифференцирования формул (III.28) и (III.29) по переменным x_c и y_c

$$M_x = \frac{\partial X}{\partial x_c} = \frac{W}{V_{p.x}}$$

$$M_y = \frac{\partial Y}{\partial y_c} = \frac{ck}{2V_{p.y}} \left(\frac{ck}{2V_{p.y}} y_c + R_0 \right) \left[\left(\frac{ck}{2V_{p.y}} y_c + R_0 \right)^2 - H^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$
(IV.2)

здесь $H = (Z_s - Z)$.

Для определения значений m_X и m_Y примем во внимание перечисленные выше основные источники геометрических искажений РЛ изображения и найдем частные производные уравнений (III.28) и (III.29) по переменным $H, Y_s, \vartheta, \psi, \frac{W}{V_{p.x}}$ и $V_{p.y}$.

Тогда с точностью до величин первого порядка малости получим ср. кв. погрешности в определении координат точек местности, вызванные каждым источником:

— изменением высоты полета носителя

$$\left. \begin{aligned} m_{XH} &= 0 \\ m_{YH} &= \frac{H}{Y} m_H \end{aligned} \right\}, \quad (IV.3)$$

— боковыми уклонениями носителя

$$\left. \begin{aligned} m_{XYS} &= 0 \\ m_{YYS} &= m_{YS} \end{aligned} \right\}, \quad (IV.4)$$

— погрешностями стабилизации антенны по тангажу

$$\left. \begin{aligned} m_{X\vartheta} &= H m_{\vartheta} \\ m_{Y\vartheta} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (IV.5)$$

— погрешностями стабилизации антенны по курсу

$$\left. \begin{aligned} m_{X\psi} &= Y m_{\psi} \\ m_{Y\psi} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (IV.6)$$

— нестабильностью масштаба записи изображения по азимуту

$$\left. \begin{aligned} m_{XM_x} &= X \frac{m_{M_x}}{M_x} \\ m_{YM_x} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (IV.7)$$

— нелинейностью строчной развертки

$$\left. \begin{aligned} m_{XV_{p.y}} &= 0 \\ m_{YV_{p.y}} &= (R - R_0) \frac{R}{Y} \cdot \frac{m_{v_{p.y}}}{V_{p.y}} \end{aligned} \right\}. \quad (IV.8)$$

В соответствии с полученными формулами запишем значения m_X и m_Y в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} m_X &= (m_{X\vartheta}^2 + m_{X\psi}^2 + m_{XM_x}^2)^{\frac{1}{2}} \\ m_Y &= (m_{YH}^2 + m_{YYS}^2 + m_{YV_{p.y}}^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\}. \quad (IV.9)$$

Для выявления в пределах используемой для измерений площади изображения интегральной ср. кв. величины деформаций выберем точки, равномерно расположенные по полю снимка, имеющего размеры 70×70 мм (рис. 47). Затем для каждой точки рассчитаем местные ср. кв. деформации m_X и m_Y , используя данные, приведенные в табл. 6. От местных

деформаций перейдем к интегральным деформациям по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} M_{д. x} &= \sqrt{\frac{\sum_1^i m_{x_i}^2}{n}} \\ M_{д. y} &= \sqrt{\frac{\sum_1^i m_{y_i}^2}{n}} \\ M_{д.} &= \sqrt{M_{д. x}^2 + M_{д. y}^2} \end{aligned} \right\} \quad (IV.10)$$

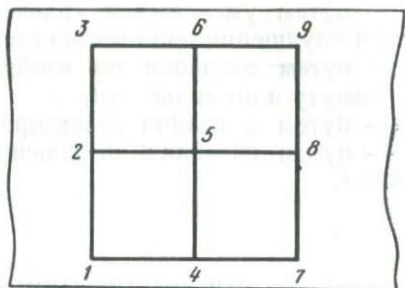


Рис. 47. Расположение точек по полю снимка

где n — количество точек на условном кадре.

Полученные величины деформаций приведены в табл. 7. Результаты этой таблицы показывают, что изображения, получаемые РЛС БО, характеризуются очень высоким уровнем деформаций. Вследствие этого погрешности при определении координат объектов местности по известным координатам носителя или по ограниченному количеству опорных точек (1—2 точки) будут весьма значительными.

Принимая во внимание, что разрешающая способность снимков, получаемых РЛС БО, в лучшем случае составляет 20 м ($H=1$ км) и 100 м ($H=20$ км) [1], определим требования к точности выдерживания параметров полета и станции при наличии погрешностей в определении координат точек местности, не превышающих в пределах условного кадра 70×70 мм указанных величин. При этом влияние источников геометрических искажений на измерительные свойства РЛ изображения будем считать равновероятным

$$\left. \begin{aligned} m_{x\phi} &= m_{x\psi} = m_{xM_x} \\ m_{yH} &= m_{yV_p. y} = m_{yY_S} \end{aligned} \right\} \quad (IV.11)$$

Тогда допустимые ср. кв. погрешности в определении координат точек местности будут равны

$$\left. \begin{aligned} m_x &= 0,58 \cdot m_{x. доп} \\ m_y &= 0,58 \cdot m_{y. доп} \end{aligned} \right\} \quad (IV.12)$$

Используя формулы (IV.3) — (IV.8), вычислим допустимые ср. кв. нестабильности параметров для условий съемки, приведенных в табл. 6. Полученные результаты представлены в табл. 8.

Задача уменьшения деформаций РЛ изображения может быть решена следующими способами как при отдельном, так и при совместном использовании каждого из них:

- путем уменьшения траекторных нестабильностей носителя и улучшения параметров станции;
- путем введения на изображении калибровочных меток по азимуту и по дальности;
- путем фиксации траекторных параметров носителя;
- путем введения компенсирующих поправок по опорным точкам.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

Таблица 6

№ п/п	Параметры	Величина параметра		
		H 1 км	H 20 км	
1	$R_0, \text{ м}$	6000	50 000	
2	M_x	100 000	350 000	
3	$\frac{c \cdot k}{2V_{p.y}}$	100 000	350 000	
4	$\Delta H, \text{ м}$	$0,08H$	$0,1H$	
5	$Y_s, \text{ м}$	100	250	
6	$m_H = \frac{1}{3} \Delta H, \text{ м}$	27	67	
7	$m_{YS} = \frac{1}{3} Y_s, \text{ м}$	33	83	
8	$\vartheta = \psi = \alpha = \theta$	0	0	
9	$m_\vartheta = m_\psi$	20'	20'	
10	$x_0, \text{ мм}$	Номера точек	1, 2, 3	-35
			4, 5, 6	0
			7, 8, 9	+35
11	$y_0, \text{ мм}$		1, 4, 7	-35
			2, 5, 8	0
			3, 6, 9	+35
12	$\frac{m_{M_x}}{M_x}$	1%	1%	
13	$\frac{mV_{p.y}}{V_{p.y}}$	2,5%	2,5%	
14	$x_0 = y_0$	0	0	

Примечание. Значения $\Delta H, Y_s, m_\psi, m_\vartheta, \frac{m_{M_x}}{M_x}, \frac{mV_{p.y}}{V_{p.y}}$, принятые для примера, близки к достигнутой в настоящее время точности выдерживания этих параметров в реальных РЛС БО.

Таблица 7

СРЕДНИЕ КВАДРАТИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИЙ

№	Источники деформаций	H = 1 км									
		Номера точек									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	m_{XH}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	m_{YH}	12	5	3	12	5	3	12	5	3	
2	m_{YS}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	m_{YS}	33	33	33	33	33	33	33	33	33	
3	m_{ϑ}	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	$m_{Y\vartheta}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	m_{ψ}	13	34	55	13	34	55	13	34	55	
	$m_{Y\psi}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	$\frac{m_{MX}}{M_x}$	35	35	35	0	0	0	35	35	35	
	$\frac{m_{YMX}}{M_y}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	$\frac{mV_{p.y}}{V_{p.y}}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$\frac{m_{X\vartheta_{p.y}}}{m_{Y\vartheta_{p.y}}}$	87	87	87	87	87	87	87	87	87	
Местные деформации	m_x (мм)	0,38	0,49	0,56	0,14	0,35	0,55	0,38	0,49	0,65	
	m_y (мм)	0,94	0,33	0,93	0,94	0,33	0,93	0,94	0,33	0,93	
	m (мм)	1,01	0,59	1,15	0,95	0,48	1,09	1,01	0,59	1,15	
Интегральные деформации	$M_{д.х}$ (мм)								0,49		
	$M_{д.у}$ (мм)								0,79		
	M_d (мм)								0,93		

№ п/п	Источники деформаций	$H = 20 \text{ км}$									
		Номера точек									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	m_{XH}	$m_{XH} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	m_{YH}	$m_{YH} \text{ (м)}$	42	29	23	42	29	23	42	29	23
2	m_{YS}	$m_{XYS} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	m_{YYS}	$m_{YYS} \text{ (м)}$	83	83	83	83	83	83	83	83	83
3	m_{Φ}	$m_{X\Phi} \text{ (м)}$	116	116	116	116	116	116	116	116	116
		$m_{Y\Phi} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	m_{Ψ}	$m_{X\Psi} \text{ (м)}$	186	267	342	186	267	342	186	267	342
		$m_{Y\Psi} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	$\frac{m_M}{M_x}$	$m_{XM_x} \text{ (м)}$	122	122	122	0	0	0	122	122	122
		$m_{YM_x} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	$\frac{mV_{p.y}}{V_{p.y}}$	$m_{X\Phi_{p.y}} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		$m_{Y\Phi_{p.y}} \text{ (м)}$	362	0	362	362	0	362	362	0	362
Местные деформации	$m_x \text{ (мм)}$		0,72	0,90	1,09	0,63	0,83	0,99	0,72	0,90	1,09
	$m_y \text{ (мм)}$		1,07	0,25	1,07	1,07	0,23	1,07	1,07	0,25	1,07
	$m \text{ (мм)}$		1,29	0,93	1,53	1,24	0,86	1,47	1,29	0,93	1,53
Интегральные деформации	$M_{д.x} \text{ (мм)}$							0,89			
	$M_{д.y} \text{ (мм)}$							0,88			
	$M_{д} \text{ (мм)}$							1,25			

Таблица 8

ДОПУСТИМЫЕ СРЕДНИЕ КВАДРАТИЧЕСКИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ
ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕТА И СТАНЦИИ

Высота съемки	m_{Φ}	m_{Ψ}	$\frac{mM_x}{M_x}$	m_H	m_{YS}	$\frac{mV_{p.y}}{V_{p.y}}$
$H = 1 \text{ км}$	38,0'	4,2'	0,33%	26 м	12 м	0,33%
$H = 20 \text{ км}$	10,0'	3,4'	0,48%	92 м	58 м	0,40%

Требования, указанные в табл. 8 к нелинейности строчной развертки и нестабильности масштаба записи вдоль оси абсцисс, могут быть выполнены при использовании первого и второго способов. Значительно сложнее выполнить требования, предъявляемые к боковым уклонениям носителя и особенно к точности стабилизации антенны. Даже в условиях экспериментальных полетов эти параметры оказывают решающее влияние на измерительные свойства РЛ изображений. Очевидно, что в производственных условиях, они не будут лучше. Отсюда вытекает необходимость фиксации боковых уклонений носителя в полете с целью дальнейшего учета при вычислении координат. Что же касается угловых колебаний антенны, то осуществлять их фиксацию нецелесообразно, так как они влияют не только на геометрию, но и на изобразительные свойства РЛ изображения. Поэтому для существенного уменьшения деформаций РЛ снимка необходимо с очень высокой точностью ($m_{\psi} \leq 10'$, $m_{\phi} \leq 4'$) стабилизировать вдольфюзеляжную антенну. Проблема стабилизации антенны с такой точностью чрезвычайно затруднительна. Поэтому, даже если будут выполнены требования к нелинейности строчной развертки, боковым уклонениям носителя и нестабильности масштаба записи изображения вдоль оси абсцисс, уровень остаточных деформаций останется высоким (табл. 9), особенно при съемке с больших высот.

В настоящее время наиболее простым и эффективным способом уменьшения уровня деформаций является формирование на изображении калибровочных меток по дальности и использование избыточного количества опорных точек.

Калибровочные метки дальности создаются серией кратковременных импульсов, вырабатываемых генератором РЛС БО [86]. Эти импульсы запаздывают один относительно другого на равные и точно известные промежутки времени. Первый импульс совпадает с началом строчной развертки, а длительность всей серии импульсов равна длительности прямого хода

Таблица 9

СРЕДНИЕ КВАДРАТИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Деформация изображения	Обозначения	$H = 1 \text{ км}$								
		Номера точек								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Местные (мм)	m_x	0,19	0,37	0,57	0,14	0,35	0,55	0,19	0,37	0,57
	m_y	0,21	0,13	0,17	0,21	0,13	0,17	0,21	0,13	0,17
	m	0,28	0,39	0,60	0,25	0,37	0,59	0,28	0,39	0,60
Интегральные (мм)	$M_{д.х}$					0,40				
	$M_{д.у}$					0,17				
	$M_{д}$					0,44				

Деформация изображения	Обозначения	$H = 20$ км								
		Номера точек								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Местные (мм)	m_x	0,65	0,85	1,03	0,63	0,83	1,03	0,65	0,85	1,03
	m_y	0,22	0,17	0,23	0,22	0,17	0,23	0,22	0,17	0,23
	m	0,69	0,86	1,05	0,67	0,85	1,05	0,69	0,86	1,05
Интегральные (мм)	$M_{д.х}$					0,85				
	$M_{д.у}$					0,21				
	$M_{д}$					0,88				

развертки. Импульсы подаются на управляющий электрод ЭЛТ, в результате чего на строке образуется ряд точек. Так как запись строк на фотопленку осуществляется вплотную или с некоторым наложением строки на строку, то на изображении получаются калибровочные линии, расположенные вдоль пленки.

Данный способ позволяет уменьшить деформации, вызываемые нелинейностью строчной развертки, и существенно ослабить влияние угловых колебаний антенны. Например, если время между моментами формирования двух опорных точек, расположенных вдоль линии полета носителя, не превышает половины периода угловых колебаний антенны по курсу, то очевидно, что

$$m_{\chi\psi} = (Y - Y_{\text{ср}}) m_{\psi},$$

где $Y_{\text{ср}}$ — ордината, соответствующая середине полосы обзора местности.

При этом остаточный уровень деформаций не превысит величин, приведенных в табл. 10.

Таблица 10
СРЕДНИЕ КВАДРАТИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Деформация изображения	Обозначения	$H = 1$ км								
		Номера точек								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Местные (мм)	m_x	0,41	0,36	0,41	0,22	0,06	0,21	0,41	0,36	0,41
	m_y	0,35	0,33	0,33	0,35	0,33	0,33	0,35	0,33	0,33
	m	0,54	0,49	0,53	0,41	0,33	0,40	0,54	0,49	0,53
Интегральные (мм)	$M_{д.х}$					0,34				
	$M_{д.у}$					0,34				
	$M_{д}$					0,48				

Деформация изображения	Обозначения	$H = 20$ км								
		Номера точек								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Местные (мм)	m_x	0,53	0,48	0,53	0,41	0,33	0,40	0,53	0,48	0,53
	m_y	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23	0,23
	t	0,58	0,53	0,58	0,47	0,40	0,47	0,58	0,53	0,58
Интегральные (мм)	$M_{д.х}$					0,47				
	$M_{д.у}$					0,23				
	M_d					0,52				

В наиболее благоприятных случаях, при наличии большого количества опорных точек (более трех), очень медленном изменении боковых уклонений, высоты полета, углов наклона антенны и масштаба записи изображения по оси абсцисс, когда период изменений этих параметров значительно превышает время формирования условного кадра, остаточные деформации РЛ изображения будут еще меньше.

§ 14. Деформации изображения, получаемого РСА

Деформации изображения, получаемого РСА, вызваны в основном теми же источниками, что в РЛС БО, за исключением дополнительных искажений, возникающих в спектроанализаторе. Однако воздействие некоторых из этих источников на изображение происходит иначе.

Траекторные нестабильности носителя, помимо искажений, рассмотренных в § 13, приводят к появлению на длине искусственного раскрыва фазовых погрешностей, которые нарушают расчетное положение синтезированного луча в пространстве объектов местности. Рассчитаем возможное отклонение синтезированного луча от расчетного положения.

При разработке РСА, предназначенных для съемки с малых высот, можно потребовать, чтобы при средней эксплуатационной скорости носителя, например $W = 150$ м/с, средние скорости изменения бокового уклонения, высоты и путевой скорости на длине искусственного раскрыва не превышали следующих величин:

$$W_Y \leq 1 \text{ м/с}, \quad W_H \leq 8 \text{ м/с}, \quad \frac{\Delta W}{W} \leq 2,5\%.$$

Для РСА, предназначенных для съемки с больших высот, при $W = 300$ м/с можно потребовать, чтобы $W_Y \leq 1,5$ м/с, $W_H \leq 4,5$ м/с, $\frac{\Delta W}{W} \leq 8\%$.

Подставим предельные значения этих параметров в формулы (III.34) и (III.35). При постоянном угле отворота антенны, например $\psi_r = 1^\circ 30'$, получим:

для маловысотных РСА

$$\psi_{\text{пред}} = 1^\circ 30' \pm 25',$$

$$\vartheta_{\text{пред}} = \pm 2^\circ 52';$$

для высотных РСА

$$\psi_{\text{пред}} = 1^\circ 30' \pm 31',$$

$$\vartheta_{\text{пред}} = \pm 52'.$$

Постоянный угол отворота антенны приводит к систематическим искажениям изображения, которые при фотограмметрической обработке учитываются формулами (III.36) и (III.37). Поэтому ср. кв. случайные значения углов ψ и ϑ можно принять равными

$$m_\psi = \frac{1}{3} (\psi_{\text{пред}} - \psi_r),$$

$$m_\vartheta = \frac{1}{3} \vartheta_{\text{пред}}.$$

Тогда для маловысотных РСА ср. кв. отклонение синтезированного луча от расчетного положения будет равно

$$m_\psi = \pm 8',$$

$$m_\vartheta = \pm 57';$$

а для высотных РСА —

$$m_\psi = \pm 10',$$

$$m_\vartheta = \pm 17'.$$

В отличие от РЛС БО изменение элементов ориентирования самолетной антенны за время создания искусственного раскрыва, вызванное угловыми колебаниями носителя, приводит только к ослаблению сигналов доплеровских частот, вследствие чего уменьшается разрешающая способность системы. Геометрические свойства получаемых изображений остаются неизменными, так как оптическое устройство обработки как бы выполняет роль фильтра, пропускающего только те доплеровские частоты, которые соответствуют расчетному направлению луча самолетной антенны. В тех случаях, когда отклонения луча самолетной антенны от расчетного направления значительны и превышают ширину диаграммы направленности, при восстановлении голограммы происходит декорреляция (гашение) сигналов и на выходе спектроанализатора изображение местности отсутствует.

В РСА к погрешностям станции, выражающимся в нестабильности масштаба записи изображения по азимуту и в не-

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

№ п/п	Параметры	Величина параметра	
		$H = 1 \text{ км}$	$H = 20 \text{ км}$
1	m_ψ	8'	10'
2	m_g	57'	17'
3	$m_{V_{p.2.x}}$ $\frac{V_{p.2.x}}{V_{p.3.x}}$	1%	1%

линейности строчной развертки, следует отнести еще один фактор: несовершенство спектроанализатора. Несовершенство спектроанализатора проявляется в несинхронности протяжки первичной и вторичной пленок.

Несинхронность протяжки первичной и вторичной пленок ухудшает разрешающую способность, вызывая смаз изображения, уменьшает контраст и приводит к искажению масштаба изображения по азимуту. В результате возникают погрешности в определении координат объектов местности, ср. кв. величину которых можно найти, дифференцируя выражение (III.36) по $\frac{V_{p.2.x}}{V_{p.3.x}}$

$$m_x \frac{V_{p.2.x}}{V_{p.3.x}} = \frac{W}{V_{p.1.x}} \cdot \frac{V_{p.2.x}}{V_{p.3.x}} X_c \frac{m_{V_{p.2.x}}}{\frac{V_{p.2.x}}{V_{p.3.x}}} \quad (\text{IV.13})$$

Для расчета деформаций изображения, получаемого РСА, воспользуемся данными табл. 6 и 11.

Расчет деформаций выполним по методике, рассмотренной в § 13.

Полученные в результате вычислений ср. кв. значения деформаций приведены в табл. 12.

Выполненные расчеты показывают, что уровень деформаций изображений, получаемых РСА, очень высокий и близок к уровню деформаций изображений, получаемых РЛС БО.

Так же как и для РЛС БО, определим в пределах условного кадра размером $70 \times 70 \text{ мм}$ требуемые точности выдерживания параметров полета и станции при наличии погрешностей в определении координат объектов, не превышающих $\pm 20 \text{ м}$ для высоты съемки $H = 1 \text{ км}$ и $\pm 100 \text{ м}$ для высоты съемки $H = 20 \text{ км}$.

Таблица 12

СРЕДНИЕ КВАДРАТИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИЙ

№ п/п	Источники деформаций		$H = 1 \text{ км}$								
			Номера точек								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	m_H	$m_{XH} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		$m_{YH} \text{ (м)}$	12	5	3	12	5	3	12	5	3
2	m_{Y_S}	$m_{XY_S} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		$m_{YY_S} \text{ (м)}$	33	33	33	33	33	33	33	33	33
3	m_Φ	$m_{X\Phi} \text{ (м)}$	17	17	17	17	17	17	17	17	17
		$m_{Y\Phi} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	m_Ψ	$m_{X\Psi} \text{ (м)}$	5	14	22	5	14	22	5	14	22
		$m_{Y\Psi} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	m_{M_x}	$m_{XM_x} \text{ (м)}$	35	35	35	0	0	0	35	35	35
	\overline{M}_x	$m_{YM_x} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	$\frac{m_{V_{p,u}}}{V_{p,u}}$	$m_{XV_{p,u}} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		$m_{YV_{p,u}} \text{ (м)}$	87	0	87	87	0	87	87	0	87
7	$\frac{m_{V_{p,2,x}}}{V_{p,3,x}}$	$m_{XV_{p,2,x}} \text{ (м)}$	35	35	35	0	0	0	35	35	35
	$\frac{V_{p,2,x}}{V_{p,3,x}}$	$m_{YV_{p,2,x}} \text{ (м)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Местные деформации	$m_x \text{ (мм)}$		0,53	0,54	0,56	0,18	0,22	0,28	0,53	0,54	0,56
	$m_y \text{ (мм)}$		0,94	0,33	0,93	0,94	0,33	0,93	0,94	0,33	0,93
	$m \text{ (мм)}$		1,08	0,63	1,08	0,95	0,40	0,97	1,08	0,63	1,08
Интегральные деформации	$M_{д.х} \text{ (мм)}$							0,46			
	$M_{д.у} \text{ (мм)}$							0,79			
	$M_{д} \text{ (мм)}$							0,91			

Продолжение табл. 12

№ п/п	Источники деформаций		H = 20 км								
			Номера точек								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	m_H	m_{XH} (М)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		m_{YH} (М)	42	29	23	42	29	23	42	29	23
2	m_{YS}	m_{XYS} (М)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		m_{YYS} (М)	83	83	83	83	83	83	83	83	83
3	m_Φ	$m_{X\Phi}$ (М)	99	99	99	99	99	99	99	99	99
		$m_{Y\Phi}$ (М)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	m_Ψ	$m_{X\Psi}$ (М)	93	134	171	93	134	171	93	134	171
		$m_{Y\Psi}$ (М)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	m_{M_x}	m_{XM_x} (М)	122	122	122	0	0	0	122	122	122
	$\frac{M_x}{M_x}$	m_{YM_x} (М)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	$m_{V_{p-y}}$	$m_{XV_{p-y}}$ (М)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\frac{V_{p-y}}{V_{p-y}}$	$m_{YV_{p-y}}$ (М)	362	0	323	362	0	323	362	0	323
7	$m_{\frac{V_{p-2,x}}{V_{p-3,x}}}$	$m_{XV_{p-2,x}}$ (М)	122	122	122	0	0	0	122	122	122
	$\frac{V_{p-2,x}}{V_{p-3,x}}$	$m_{YV_{p-2,x}}$ (М)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Местные деформации	m_x (мм)		0,63	0,69	0,75	0,39	0,48	0,56	0,63	0,69	0,75
	m_y (мм)		1,07	0,25	1,07	1,07	0,23	1,07	1,07	0,25	1,07
	m (мм)		1,24	0,73	1,31	1,14	0,53	1,20	1,24	0,73	1,31
Интегральные деформации	$M_{d,x}$ (мм)							0,63			
	$M_{d,y}$ (мм)							0,88			
	M_d (мм)							1,08			

Учитывая только основные источники деформаций РЛ изображения, запишем

$$m_{X, \text{ доп}} = \left(m_X^2 \frac{W}{V_{p. 1. x}} + m_{X\psi}^2 + m_{X\vartheta}^2 + m_X^2 \frac{V_{p. 2. x}}{V_{p. 3. x}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{IV.14})$$

$$m_{Y, \text{ доп}} = \left(m_{Y Y_S}^2 + m_{Y H}^2 + m_{Y V_{p. y}}^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{IV.15})$$

Так как деформации $m_{X\psi}$ и $m_{Y Y_S}$, $m_{X\vartheta}$ и $m_{Y H}$ вызваны одними и теми же источниками искажений, а именно скоростью бокового уклонения W_Y и скоростью изменения высоты полета W_H , причем влияние W_Y и W_H приводит главным образом к искажению абсцисс, то требуемые точности выдерживания параметров полета будем определять применительно к воздействию этих источников на абсциссы точек РЛ изображения. Тогда формулы (IV.14) и (IV.15) можно записать в следующем виде:

$$m_{X, \text{ доп}} = \left(m_X^2 \frac{W}{V_{p. 1. x}} + m_{X\psi}^2 + m_{X\vartheta}^2 + m_X^2 \frac{V_{p. 2. x}}{V_{p. 3. x}} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$m_{Y, \text{ доп}} = m_{Y V_{p. y}}.$$

Допустимые деформации РЛ изображения, вызванные каждым источником искажений при условии, что

$$m_X \frac{W_1}{V_{p. 1. x}} = m_{X\psi} = m_{X\vartheta} = m_X \frac{V_{p. 2. x}}{V_{p. 3. x}},$$

будут равны

$$m_X = 0,5 \cdot m_{X, \text{ доп}},$$

$$m_Y = m_{Y, \text{ доп}}.$$

Пользуясь формулами (IV.5)—(IV.8) и (IV.13), вычислим допустимые ср. кв. отклонения параметров $\frac{W}{V_{p. 1. x}}$, ψ , ϑ , $\frac{V_{p. 2. x}}{V_{p. 3. x}}$ и $V_{p. y}$ для рассмотренных ранее условий полета (см. табл. 6 и 11).

Для определения требований к скоростям W_Y , W_H и $\frac{\Delta W}{W}$ продифференцируем выражения (III.34) и (III.35) по этим переменным и перейдем к ср. кв. погрешностям

$$m_{\psi W_Y} = \frac{m_{W_Y}}{W}, \quad (\text{IV.16})$$

$$m_{\vartheta \frac{\Delta W}{W}} = \sin \vartheta \cdot m_{\frac{\Delta W}{W}}, \quad (\text{IV.17})$$

$$m_{\vartheta W_H} = \frac{m_{W_H}}{W}. \quad (\text{IV.18})$$

Таблица 13

ДОПУСТИМЫЕ СРЕДНИЕ КВАДРАТИЧЕСКИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ
ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕТА И СТАНЦИИ

Параметры полета и станции	H = 1 км		H = 20 км	
	принятые	полученные	принятые	полученные
W_Y	1 м/с	0,1 м/с	1,5 м/с	0,2 м/с
W_H	8 м/с	1 м/с	4,5 м/с	0,5 м/с
$\frac{\Delta W}{W}$	2,5%	2%	8%	2,2%
$m_{V_{p.y}}$	2,5%	0,4%	2,5%	0,6%
$\frac{m}{V_{p.y}}$				
$m_{W_{p.1.x}}$	1%	0,2%	1%	0,3%
$\frac{m}{V_{p.1.x}}$				
$m_{V_{p.2.x}}$	1%	0,2%	1%	0,3%
$\frac{m}{V_{p.2.x}}$				
$m_{V_{p.3.x}}$				
$\frac{m}{V_{p.3.x}}$				

Тогда

$$m_{\psi \text{ доп}} = \left(m_{\psi W_Y}^2 + m_{\psi \frac{\Delta W}{W}}^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$m_{\vartheta \text{ доп}} = m_{\vartheta W_H},$$

где $m_{\psi \text{ доп}}$, $m_{\vartheta \text{ доп}}$ — допустимые ср. кв. изменения углов ψ и ϑ .

При условии, что $m_{\psi W_Y} = m_{\psi \frac{\Delta W}{W}}$ допустимые ср. кв. изменения углов ψ и ϑ , вызванные каждым из этих источников, будут равны

$$m_{\psi} = 0,71 \cdot m_{\psi \text{ доп}},$$

$$m_{\vartheta} = m_{\vartheta \text{ доп}}.$$

Подставляя значения m_{ψ} и m_{ϑ} в формулы (IV.16)—(IV.18), получим допустимые ср. кв. значения скоростей W_Y , W_H и $\frac{\Delta W}{W}$. Результаты вычислений приведены в табл. 13, в которой для сравнения помещены принятые нами требования.

Выполнение требований, предъявляемых к параметрам станции, не представляет особых трудностей. Что же касается требований к скорости бокового уклонения носителя и скорости изменения высоты полета, то выполнить их в ближайшем будущем вряд ли представится возможным, особенно для высотных РСА. Поэтому дальнейшее повышение точности РЛ изображения сопряжено с необходимостью фиксации траекторных параметров носителя и учета их или путем коррекции изображения в процессе записи, или путем введения поправок в вычисленные координаты точек местности.

§ 15. Влияние рельефа местности

Рельеф местности оказывает влияние на величины наклонных дальностей до определяемых точек местности (рис. 48). Следовательно, если использовать формулы соотношения координат точек местности и координат точек РЛ изображения, полученные исходя из предположения о плоской горизонтальной местности, это может привести к погрешностям в определении координат точек.

Величины этих погрешностей будут равны

$$\Delta X_h = X - X', \quad \Delta Y_h = Y - Y',$$

где $\Delta X_h, \Delta Y_h$ — погрешности определения координат, вызванные рельефом местности,

X, Y — координаты точки местности, вычисленные по строгим формулам (III.28), (III.29) или (III.36), (III.37),

X', Y' — координаты той же точки, вычисленные в предположении о плоской, горизонтальной местности.

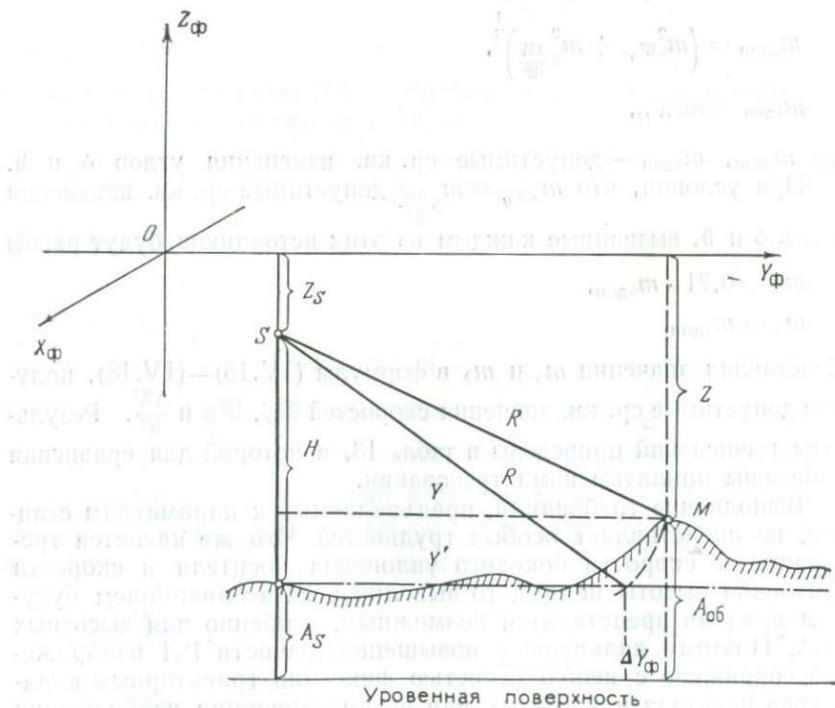


Рис. 48. Влияние рельефа местности

Выразим аппликаты Z и Z_s в формулах (III.12) и (III.13) через известные величины. Из построений рис. 48 следует

$$Z - Z_s = A_{об} - A_s - H = h - H,$$

где $A_s, A_{об}$ — соответственно, абсолютная высота проекции точки излучения импульса (или проекции геометрического центра искусственного раскрыва антенны) на местности и абсолютная высота определяемой точки местности,

h — превышение определяемой точки над точкой проекции излучения импульса на местности.

Подставив полученное выражение $(Z - Z_s)$ в формулы (III.12) и (III.13), будем иметь

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s \pm \sin \psi \sqrt{R^2 - (h - H)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} - (h - H) \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta \\ Y &= \pm \cos \psi \sqrt{R^2 - (h - H)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} + (h - H) \cdot \sin \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta + Y_s \end{aligned} \right\} \quad (IV.19)$$

В том случае, если местность принимается плоской и горизонтальной, превышение h в формулах (IV.19) равно нулю

$$\left. \begin{aligned} X' &= X_s \pm \sqrt{R^2 - H^2 \cdot \sec^2 \vartheta} \cdot \sin \psi + H \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta \\ Y' &= \pm \cos \psi \sqrt{R^2 - H^2 \cdot \sec^2 \vartheta} - H \cdot \sin \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta + Y_s \end{aligned} \right\}, \quad (IV.20)$$

тогда

$$\begin{aligned} \Delta X_h &= \pm \sin \psi \left[\sqrt{R^2 - (h - H)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} - \sqrt{R^2 - H^2 \cdot \sec^2 \vartheta} \right] - \\ &- h \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta, \\ \Delta Y_h &= \pm \cos \psi \left[\sqrt{R^2 - (h - H)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} - \sqrt{R^2 - H^2 \cdot \sec^2 \vartheta} \right] + \\ &+ h \cdot \sin \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta. \end{aligned}$$

Раскладывая в ряд Тейлора выражения, стоящие под знаками корня, и ограничиваясь при этом двумя членами ряда, получим приближенные формулы для расчета погрешностей за рельеф

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_h &= \pm \sin \psi \cdot \frac{h(2H - h) \cdot \sec^2 \vartheta}{2 \cdot \sqrt{R^2 - H^2 \sec^2 \vartheta}} - h \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta \\ \Delta Y_h &= \pm \cos \psi \cdot \frac{h(2H - h) \cdot \sec^2 \vartheta}{2 \cdot \sqrt{R^2 - H^2 \sec^2 \vartheta}} + h \cdot \sin \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta \end{aligned} \right\} \quad (IV.21)$$

Пользуясь данными табл. 14 и задаваясь предельным значением угла $\psi = 2^\circ$, вычислим погрешности за рельеф для различных значений h по строгим (IV.20) и приближенным (IV.21) формулам (см. табл. 14).

Результаты расчетов свидетельствуют о равнозначности строгих и приближенных формул.

Таблица 14

ПОГРЕШНОСТИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ,
ВЫЗВАННЫЕ РЕЛЬЕФОМ МЕСТНОСТИ

h (м)	ΔX _h , м						ΔY _h , м					
	По формуле (IV. 20)			По формуле (IV. 21)			По формуле (IV. 20)			По формуле (IV. 21)		
	номера точек			номера точек			номера точек			номера точек		
	1, 4, 7	2, 5, 8	3, 6, 9	1, 4, 7	2, 5, 8	3, 6, 9	1, 4, 7	2, 5, 8	3, 6, 9	1, 4, 7	2, 5, 8	3, 6, 9
<i>H</i> = 1 км												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	1	1	0	1	1	0	41	16	10	41	16	
500	6	2	1	6	2	1	158	64	40	164	64	
1000	7	3	2	8	3	2	209	84	53	218	84	
<i>H</i> = 20 км												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	2	1	1	2	1	1	63	43	35	63	43	
500	11	8	6	11	8	6	311	217	171	309	216	
1000	21	15	12	21	15	12	604	424	330	610	426	

Сравнивая полученные погрешности с величинами остаточных деформаций РЛ изображения (см. табл. 10), можно сделать вывод, что в холмистых и горных районах при наличии превышений более 50 м при съемке с малых высот и более 100 м при съемке с больших высот, необходимо с целью исключения погрешностей, вызванных рельефом местности, вводить поправки в вычисленные ординаты объектов.

§ 16. Влияние кривизны Земли

До сих пор связь координат точек местности и координат точек РЛ снимка рассматривалась в плоской фотограмметрической системе координат местности. Между тем из-за влияния кривизны Земли установленная нами связь нарушается. Нарушение этой связи обусловлено тремя причинами.

Во-первых, траектория полета носителя не совпадает с осью абсцисс фотограмметрической системы координат и представляет собой кривую второго порядка (в первом приближении дугу окружности), параллельную средней уровенной поверхности Земли. В этом случае, как следует из построений рис. 49, измеренной абсциссе X_S текущей точки S траектории полета носителя будет соответствовать абсцисса X_{SO} равная

$$X_{SO} = (R_3 + H_{абс}) \cdot \sin \xi_X,$$

$$\xi_X = \frac{X_S}{R_3 + H_{абс}},$$

где X_{MO}, Y_{MO}, Z_{MO} — координаты точки M местности в системе координат $OX_{\phi}, Y_{\phi}, Z_{\phi}$,

X_{MS}, Y_{MS}, Z_{MS} — координаты той же точки M местности в системе координат $SX'_{\phi}, Y'_{\phi}, Z'_{\phi}$.

В-третьих, из-за непараллельности оси SY_{ϕ} уровенной поверхности Земли изменяется абсолютная высота Z_{MS} произвольной точки M местности. Согласно построениям рис. 50 величину этого изменения $t_z = NI$ можно определить из решения прямоугольных треугольников CIM и SIM

$$\begin{aligned} t_z &= R_3 - (R_3 + A_{об}) \cdot \cos \xi_Y, \\ R^2 - (H_{абс} + t_z)^2 &= (R_3 + A_{об})^2 \cdot \sin^2 \xi_Y, \\ t_z &= \frac{R^2 - H_{абс}^2 - A_{об}^2 - 2 \cdot R_3 + A_{об}}{2(R_3 + H_{абс})}. \end{aligned}$$

При этом координаты точки M местности в системе координат $SX'_{\phi}, Y'_{\phi}, Z'_{\phi}$, исправленные за кривизну Земли, будут равны

$$X_{MS} = \pm \sin \psi \sqrt{R^2 - (H_{абс} + t_z)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} + (H_{абс} + t_z) \times \\ \times \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta,$$

$$Y_{MS} = \pm \cos \psi \sqrt{R^2 - (H_{абс} + t_z)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} - (H_{абс} + t_z) \times \\ \times \sin \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta,$$

$$Z_{MS} = - (H_{абс} + t_z).$$

В результате связь координат точек местности и координат точек РЛ снимка с учетом влияния кривизны Земли может быть выражена следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} X_R &= (R_3 - t_z) \cdot \sin \xi_X + [\pm \sin \psi \sqrt{R^2 - (H_{абс} + t_z)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} + \\ &+ (H_{абс} + t_z) \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta] \cdot \cos \xi_X, \\ Y_R &= \pm \cos \psi \sqrt{R^2 - (H_{абс} + t_z)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} - \\ &- (H_{абс} + t_z) \cdot \sin \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta + Y_s, \\ Z_R &= (R_3 - t_z) \cos \xi_X - (R_3 + H_{абс}) - [\pm \sin \psi \times \\ &\times \sqrt{R^2 - (H_{абс} + t_z)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} + (H_{абс} + t_z) \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta] \cdot \sin \xi_X. \end{aligned} \right\} \quad (IV.22)$$

Разности

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_R &= X - X_R \\ \Delta Y_R &= Y - Y_R \end{aligned} \right\} \quad (IV.23)$$

представляют собой погрешности в определении координат точек местности, вызванные кривизной Земли.

Используя полученные выражения, рассчитаем величины погрешностей ΔX_R и ΔY_R на примере двух случаев съемки, пара-

метры которых приведены в табл. 6.

Результаты расчетов (табл. 15) показывают, что при выполнении съемки с больших высот погрешности определения координат, вызванные кривизной Земли, могут быть значительными. Поэтому в процессе фотограмметрической обработки снимков, получаемых высотными РЛС, должны быть приняты меры к исключению влияния кривизны Земли.

При выводе формул (IV.22) предполагалось, что Земля имеет форму шара, а не эллипсоида, как это есть в действительности. Отсюда возникает необходимость в определении границ применения данных формул. Для этого продифференцируем выражения (IV.23) по переменной R_3 , при этом абсолютную высоту объекта, а также углы ψ и ϑ будем считать равными нулю

$$\frac{\partial \Delta X_R}{\partial R_3} = \pm \sin \xi_X \cdot \frac{R_3 + H_{abc} + t_z}{R_3 + H_{abc}} - \xi_X \cdot \cos \xi_X \cdot \frac{R_3 - t_z}{R_3 + H_{abc}},$$

$$\frac{\partial \Delta Y_R}{\partial R_3} = \frac{(H_{abc} + t_z) t_z}{(R_3 + H_{abc}) Y_R}.$$

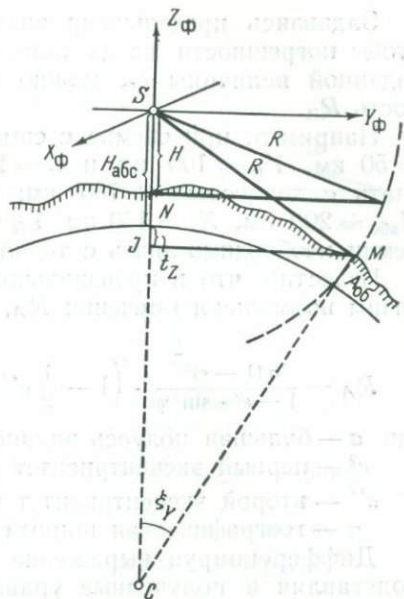


Рис. 50. Влияние кривизны Земли на аппликаты точек местности

Таблица 15
ПОГРЕШНОСТИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ,
ВЫЗВАННЫЕ КРИВИЗНОЙ ЗЕМЛИ

Номера точек	H = 1 км		H = 20 км	
	ΔX_R (м)	ΔY_R (м)	ΔX_R (м)	ΔY_R (м)
1	0,6	0,4	38	47
2	0,6	1,1	36	72
3	0,6	1,6	38	94
4	0	0,4	0	47
5	0	1,1	0	72
6	0	1,6	0	94
7	0,6	0,4	38	47
8	0,6	1,1	38	72
9	0,6	1,6	38	94

Задаваясь предельными значениями $H_{\text{абс}}$, X_s , Y_R и требуя, чтобы погрешности ввода поправок ΔX_R и ΔY_R не превышали заданной величины δ_r , можно вычислить допустимую погрешность R_3 .

Например, при съемке с самолета, когда $H_{\text{абс}} = 20$ км, $X_s = 50$ км, $Y_R = 100$ км и $\delta_r = 20$ м, радиус Земли необходимо знать с точностью ± 760 км; при съемке из космоса, когда $H_{\text{абс}} = 200$ км, $X_s = 150$ км, $Y_R = 300$ км, для того же δ_r радиус Земли необходимо знать с точностью ± 27 км.

Известно, что в произвольной точке эллипсоида радиус кривизны нормального сечения R_A , имеющего азимут A , равен

$$R_A = \frac{a(1-e)^2}{1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} e'^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \cos 2A \right), \quad (\text{IV.24})$$

где a — большая полуось эллипсоида,
 e^2 — первый эксцентриситет меридианного эллипса,
 e'^2 — второй эксцентриситет меридианного эллипса,
 φ — географическая широта точки.

Дифференцируя выражение (4.24) по переменным φ и A и подставляя в полученные уравнения допустимые погрешности R_3 определяем границы применения формул (4.22) по широте и азимуту

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial R_A} &= \frac{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}{a(1-e^2)^2 \cdot \sin 2\varphi \cdot \left(\frac{e^2}{1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi} + \frac{1}{2} e'^2 \cdot \cos 2A - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \frac{e'^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \cos 2A \cdot e^2}{1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right)} \\ \frac{\partial A}{\partial R_A} &= \frac{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}{a(1-e^2)^2 \cdot e'^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin 2A} \end{aligned} \right\} (\text{IV.25})$$

Анализ формул (IV.25) показывает, что при ведении РЛ съемки с самолета и даже из космоса фигуру Земли можно отождествить с шаром и, следовательно, для определения поправок за кривизну пользоваться средним радиусом Земли.

§ 17. Влияние атмосферной рефракции радиоволн

Атмосферная рефракция радиоволн обусловлена плавным изменением показателя преломления тропосферы с высотой. Это изменение показателя преломления сказывается на геометрии радиолокационного изображения двояким образом.

Во-первых, путь радиоволн искривляется и удлиняется по сравнению с прямолинейным. Во-вторых, отличие показателя

преломления тропосферы от единицы приводит к увеличению времени распространения радиоволн. Оба эти фактора приводят к тому, что изображение объектов на радиолокационном изображении смещается в сторону увеличения дальности.

Степень искривления радиолуча оценивается радиусом кривизны:

$$\delta = - \frac{n}{\frac{\partial n}{\partial H} \cdot \cos \theta_0},$$

где n — коэффициент преломления тропосферы на уровне моря ($n = 1,00035$),

θ_0 — угол падения радиолуча на земную поверхность,

$\frac{\partial n}{\partial H}$ — градиент коэффициента преломления по высоте.

В нормальной тропосфере, когда абсолютная температура и давление водяного пара убывают с высотой по линейному закону, градиент равен

$$\frac{\partial n}{\partial H} = -4 \cdot 10^{-8}.$$

Согласно построениям рис. 51, а также в связи с большой величиной радиуса кривизны, $\cos \theta_0$ можно выразить следующей приближенной формулой:

$$\cos \theta_0 \approx \sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{\text{изм}} - \Delta R_n}\right)^2} \approx \sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_\delta}\right)^2},$$

где $R_{\text{изм}}$ — измеренная наклонная дальность,

ΔR_n — изменение дальности из-за увеличения времени распространения радиоволн,

R_δ — действительный путь радиоволн.

В этом случае радиус кривизны будет равен

$$\delta = \frac{n}{4 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{\text{изм}} - \Delta R_n}\right)^2}}.$$

Изменение дальности из-за искривления траектории радиоволн по радиусу δ определяется разностью длин дуги и хорды (см. рис. 51).

$$\Delta R_\delta = \delta \left(\frac{R_\delta}{\delta} - 2 \cdot \sin \frac{R_\delta}{2\delta} \right) \approx \frac{1}{24} \cdot \frac{R_\delta^3}{\delta^2}, \quad (\text{IV.26})$$

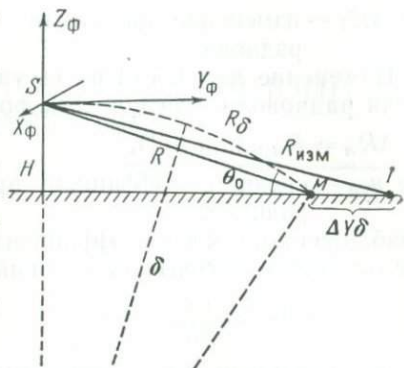


Рис. 51. Влияние рефракции на измеренные ординаты точек местности

где ΔR_{δ} — изменение дальности из-за искривления траектории радиоволн.

Изменение дальности из-за увеличения времени распространения радиоволн определяется формулой

$$\Delta R_n = R_{\text{изм}} (n_{\text{ср}} - 1), \quad (\text{IV.27})$$

где $n_{\text{ср}}$ — средний коэффициент преломления тропосферы на пути радиоволн.

Приближенно, так как коэффициенты рефракции существенно зависят от метеорологических условий, $n_{\text{ср}}$ равно

$$n_{\text{ср}} \approx n + \frac{H}{2} \cdot \frac{\partial n}{\partial H}.$$

В результате того, что измеренная по снимку наклонная дальность $R_{\text{изм}}$ больше истинной наклонной дальности R на величину

$$\Delta R_{\text{реф}} = R_{\text{изм}} - R = \Delta R_{\delta} + \Delta R_n,$$

при вычислении координат объектов будет допущена погрешность, равная разности измеренной и истинной ординаты точки M местности:

$$\Delta Y_{\text{реф}} = \cos \psi \left[\sqrt{R_{\text{изм}}^2 - H^2 \sec^2 \psi} - \sqrt{(R_{\text{изм}} - \Delta R_{\delta} - \Delta R_n)^2 - H^2 \sec^2 \psi} \right]. \quad (\text{IV.28})$$

Расчеты, выполненные по формулам (IV.26) — (IV.28), показывают, что влиянием искривления траектории радиоволн на точность определения координат точек местности можно пренебречь, так как даже при съемке из космоса погрешности выражаются единицами метров. В то же время погрешности, вызванные увеличением времени распространения радиоволн, достигают значительной величины. Например, при ведении съемки с высоты 20 км на дальности 100 км погрешность $\Delta Y_{\text{реф}}$ составит 40 м. Поэтому при фотограмметрической обработке РЛ снимков, полученных с больших высот, необходимо в измеренные дальности вводить поправки за изменение коэффициента преломления тропосферы по высоте.

ДЕШИФРИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрим некоторые аспекты дешифрирования радиолокационных изображений*.

Дешифрирование радиолокационных изображений, как и дешифрирование аэрофотоизображений, является процессом обнаружения, опознавания и интерпретации объектов местности и целей по их радиолокационным изображениям.

Обнаружение объекта представляет собой фиксацию незеркального, неоднозначного, малообобщенного, кодированного радиолокационного изображения.

Опознавание объекта представляет собой установление количественных и качественных характеристик путем выявления связи между свойствами радиолокационного изображения и свойствами дешифрируемых категорий.

Под интерпретацией понимается взвешивание и обобщение результатов опознавания. Интерпретация подразумевает познание взаимосвязей и взаимообусловленности опознанных объектов.

Объем информации о данной местности, который может быть получен при дешифрировании по радиолокационному изображению, называется информационной емкостью радиолокационного изображения. Информационная емкость зависит главным образом от изобразительных свойств радиолокационного изображения. Изобразительные свойства радиолокационного изображения определяются тем, как передаются радиолокационным изображением контрасты местности и какие при этом наименьшие размеры объектов и целей изобразятся раздельно на радиолокационном снимке.

§ 18. Методы и способы дешифрирования радиолокационных снимков

При дешифрировании радиолокационного изображения, независимо от выбранного метода, необходимо:

- обнаружить цель или объект местности на изображении;
- опознать цель или объект местности;

* [10, 43, 45, 49, 52, 57, 61, 67, 80, 81, 86, 95, 115, 123, 129, 130, 134, 144, 150, 151, 165, 177, 180, 183, 187, 194, 208].

— проанализировать обнаруженную цель или объект местности и определить их количественные и качественные характеристики;

— оформить результаты дешифрирования в виде графического или текстового документа.

В зависимости от условий и места выполнения дешифрирование радиолокационных снимков может быть подразделено на полевое, аэровизуальное, камеральное и комбинированное.

Полевое дешифрирование

При полевом дешифрировании дешифровщик непосредственно на местности ориентируется по характерным и легко опознаваемым объектам местности и, сравнивая контуры объектов с их радиолокационными изображениями, наносит результаты опознавания условными знаками на снимок или топографическую карту.

При полевом дешифрировании попутно, непосредственными измерениями, определяются числовые и качественные характеристики объектов (характеристики растительности, водоемов, сооружений при них, характеристики населенных пунктов и т. д.). При этом на снимок или карту могут быть нанесены объекты, не изобразившиеся на снимке вследствие своих малых размеров или потому, что они не существовали в момент съемки. При полевом дешифрировании специально или попутно создаются эталоны (ключи), с помощью которых в дальнейшем в камеральных условиях облегчается опознавание объектов однотипной местности.

Недостатками полевого дешифрирования снимков являются его трудоемкость по времени и затратам и сложность его организации.

Аэровизуальное дешифрирование снимков

В последнее время в практике аэрофотографических работ все большее применение получает аэровизуальный метод дешифрирования аэрофотоснимков. Этот метод с успехом может быть применен и при дешифрировании радиолокационных изображений местности. Сущность аэровизуального метода заключается в опознавании изображений объектов с самолета или вертолета. Наблюдение может вестись через оптические и инфракрасные приборы. Аэровизуальное дешифрирование радиолокационных изображений позволяет увеличить производительность и снизить стоимость работ полевого дешифрирования.

Камеральное дешифрирование снимков

При камеральном дешифрировании снимков опознавание объектов и их интерпретация производится без сличения изображений с натурой, путем изучения изображений объектов по

их дешифровочным признакам. Камеральное дешифрирование снимков широко применяется при составлении контурных радиолокационных карт, обновлении топографических карт, геологических исследованиях, при исправлении и дополнении картографических материалов в труднодоступных районах.

Однако камеральное дешифрирование обладает существенным недостатком — невозможно полностью получить все необходимые сведения о местности. Кроме того, результаты камерального дешифрирования снимков соответствуют не времени выполнения дешифрирования, а моменту съемки. Поэтому представляется весьма целесообразным сочетание камерального и полевого или аэровизуального дешифрирования снимков, т. е. их комбинирование.

При комбинированном дешифрировании снимков основная работа по обнаружению и опознаванию объектов выполняется в камеральных условиях, а в поле или полете выявляются и опознаются те объекты или их характеристики, которые невозможно опознать камерально.

Камеральное дешифрирование делится на два метода:

- непосредственное или полуинструментальное дешифрирование;
- инструментальное дешифрирование.

Непосредственный метод дешифрирования

При непосредственном методе дешифрирования исполнитель зрительно, без приборов или с помощью увеличительных приборов, рассматривает снимок и, основываясь на дешифровочных признаках изображения и своем опыте, опознает и интерпретирует объекты.

При непосредственном методе дешифрирования снимков применяемые приборы являются вспомогательными, улучшающими условия наблюдения. Некоторые приборы позволяют дешифровщику определять количественные характеристики дешифрируемых объектов. Но основную роль в обнаружении, опознавании и интерпретации играет человек.

К вспомогательным приборам и инструментам относятся наборы луп с различным увеличением, измерительные шкалы, стереоскопы, параллактические линейки, параллаксометры, специальные приборы для дешифрирования, проекционные экраны, телевизионные и электронно-оптические замкнутые системы, улучшающие условия дешифрирования снимков.

Инструментальный метод дешифрирования

Как уже указывалось выше, весь процесс дешифрирования можно представить в виде трех этапов: подготовительно-ознакомительного (обнаружение), собственно чтения аэроснимка

(опознавание), формулирования выводов и окончательной оценки (интерпретация). Эти процессы могут быть разделены по месту и времени их выполнения, что облегчает возможность автоматизации дешифрирования. При инструментальном методе дешифрирования предполагается, что по крайней мере одна из трех операций дешифрирования (обнаружение, опознавание или интерпретация объектов) выполняется без участия в ней человека. На современном этапе полное решение этой задачи для всех трех операций следует считать бесперспективным. Но частичная автоматизация, т. е. автоматизация первых двух операций — обнаружения и опознавания заданных объектов, может быть и должна быть осуществлена. В этом суть и направление современной автоматизации дешифрирования.

Предпосылкой для автоматизации дешифрирования аэроснимков является создание опознающих автоматических устройств, называемых перцептронами. Устройство перцептрона основано на принципах опознавания объектов биологическими системами. Составной частью перцептрона является рецепторное устройство, своего рода сетчатка, аналогичная глазу человека. Оригинал воспринимается оптической системой, дающей изображение объекта опознавания на сетчатке. Сигналы с сетчатки поступают на ассоциирующую систему перцептрона, которая сравнивает полученное изображение с образами оригиналов, хранящихся в памяти перцептрона, и выдает сигнал опознавания или отрицания.

Особенностью перцептрона является его способность к обучению. Распознавание объектов выполняется перцептроном после многократного показа оригинала и опроса с подачей корректирующих команд на ассоциирующую систему. После такого процесса обучения ассоциирующая система с достаточно высокой вероятностью опознает объект среди аналогичных оригиналов.

За рубежом были попытки использовать «думающие» машины типа «Марк-1», «CONFLEX» и др. для дешифрирования аэроизображений. Эти попытки потерпели неудачу, так как возникли технические трудности в связи с высокой информативной емкостью аэроснимков, проективной нестабильностью аэроизображений, нестабильностью условий аэросъемки, недостаточной изученностью корреляционных зависимостей между элементами природной обстановки, необходимостью формализации качественных дешифровочных признаков.

На современном этапе целесообразно создавать системы, дифференцирующие указанные этапы дешифрирования между человеком и машиной. При этом автомат должен выполнять наиболее простые процессы, например, обнаружение и опознавание простых объектов. Задача автомата будет сводиться к выделению кадров с полезной информацией, требующей оперативного

анализа. В этих случаях к автоматам предъявляются жесткие требования по вероятности пропуска объекта и менее жесткие требования по вероятности ложной тревоги.

§ 19. Информационные возможности непосредственного метода камерального дешифрирования

Информационные возможности непосредственного метода дешифрирования снимков зависят от возможностей визуального восприятия изображений, технической вооруженности дешифровщика и изобразительных свойств снимков.

Возможности визуального восприятия

Визуальное восприятие объекта или его изображения зависит от следующих характеристик глаза:

- остроты зрения;
- контрастной чувствительности зрения.

Остротой, или разрешающей силой, человеческого зрения называют способность человеческого глаза различать мелкие объекты.

Человеческий глаз с различной остротой воспринимает точечные (компактные) и линейные (штриховые) объекты. Поэтому разрешающую силу делят на два рода — остроту первого и второго рода. Остроту монокулярного зрения первого рода определяет минимальный угол, под которым наблюдатель видит раздельно две точки. Средняя величина остроты монокулярного зрения первого рода $\eta_{з1} = 45''$.

Остроту монокулярного зрения второго рода характеризует минимальный угол, под которым глаз раздельно видит две параллельные линии. Средняя величина остроты монокулярного зрения второго рода $\eta_{зII} = 20''$.

Острота монокулярного зрения может быть выражена в линейной мере (линейный предел разрешения δl). Учитывая, что среднее расстояние наилучшего зрения $L_B = 250$ мм (рис. 52), для малых углов получим

$$\delta l = L_B \cdot \operatorname{tg} \eta_z. \quad (V.1)$$

Тогда острота монокулярного зрения в линейной мере составит

$$\delta l_I = \frac{250 \cdot 45''}{\rho''} \cong 0,06 \text{ мм},$$

$$\delta l_{II} = \frac{250 \cdot 20''}{\rho''} \cong 0,03 \text{ мм}.$$

Необходимо отметить, что приведенные значения остроты человеческого зрения получены при оптимальных условиях

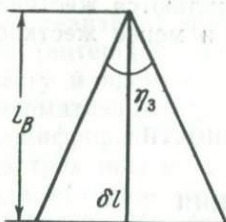


Рис. 52

$$K_B = \frac{B_o - B_\Phi}{B_o}, \quad (V.2)$$

где B_o , B_Φ — яркость объекта и фона соответственно.

Зрительно объект воспринимается только в том случае, если визуальный контраст K_B не менее некоторой величины ξ_k . Эта минимальная величина контраста, при которой глаз может воспринять объект, называется пороговой контрастной чувствительностью зрения. Контрастная чувствительность зрения меняется в зависимости от адаптационного состояния глаза. Экспериментально доказано, что:

- в светлых тонах $\xi_k = 0,02$;
- в средних тонах $\xi_k = 0,06$;
- в темных тонах $\xi_k = 0,25$.

Контрастную чувствительность зрения для целей дешифрирования фотоснимков следует рассматривать применительно не к объектам, а к их фотографическим изображениям. В черно-белой фотографии на снимке наблюдается тоновый контраст ΔD , являющийся разностью оптических плотностей объекта D_1 и фона D_2

$$\Delta D = D_1 - D_2. \quad (V.3)$$

В результате исследований установлена тесная зависимость информационной способности зрения не только от размеров объектов и их формы, но и от тонового контраста наблюдаемых изображений. Экспериментально установлено [16], что невооруженным глазом может быть воспринят кружок диаметром, равным 0,12 мм, имеющий резкие очертания и тоновый контраст по отношению к фону не менее 1,0. Уменьшение тонового контраста вызывает снижение остроты зрения, поэтому оно должно компенсироваться увеличением размеров изображения объекта. Сила воздействия изображения резкого точечного (компактного) объекта на глаз останется неизменной, если соблюдено условие

$$a' (\Delta D)^{\frac{1}{2}} = 0,12 \text{ мм}, \quad (V.4)$$

где a' — размер изображения компактного объекта с четкими границами.

Размеры объектов, мм	Тоновый контраст ΔD											
	0,06	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0
Компактные a'	0,49	0,38	0,27	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,10	0,08	0,03
Линейные c'	0,20	0,16	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03

Для линейных (штриховых) объектов эта зависимость выглядит следующим образом:

$$c' (\Delta D)^{\frac{1}{2}} = 0,05 \text{ мм}, \quad (V.5)$$

где c' — ширина изображения линейных объектов с четкими границами.

Учитывая (V.4) и (V.5), можно составить табл. 16 различности невооруженным глазом мелких деталей с резкими границами.

Следует отметить, что при тоновом контрасте менее 0,06 никакое увеличение размеров объекта не приведет к его обнаружению. Точно так же уменьшение размеров компактных объектов менее 0,07 (линейных менее 0,03 мм) не позволяет обнаружить их при любом увеличении контраста.

Применение оптических увеличительных приборов должно очевидно повысить соответственно информационную способность зрения, но такое соображение справедливо к абсолютно резкому изображению. Однако фотографическое изображение не может быть абсолютно резким вследствие дифракции света в оптической системе и дисперсии света в светочувствительном слое. Границы фотографического изображения всегда будут иметь некоторую полосу размытости δl (рис. 53), создающую «пятна размытости». Полосы размытости изменяют размер и тоновый контраст изображения объекта. Пятна размытости, с одной стороны, приводят к увеличению размеров изображения объектов, что повышает силу воздействия на глаз наблюдателя. С другой стороны, пятна размытости вызывают уменьшение контраста изображения объекта, что снижает силу воздействия на визуальное восприятие. В связи с этим, наблюдение через лупу приводит не только к возрастанию видимых размеров изображений объектов и их деталей, что улучшает их различимость, но и к увеличению полос размытости изображения, что ухудшает дешифрирование объектов. Поэтому наблюдение фотоизображения через слишком сильную лупу не всегда оправдано и не всегда целесообразно.

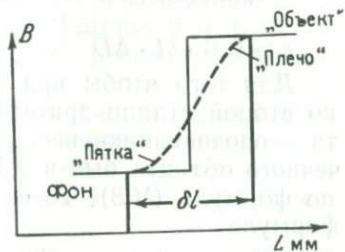


Рис. 53

МИНИМАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОМПАКТНЫХ ОБЪЕКТОВ,
ОПОНАВАЕМЫХ НА АЭРОСНИМКАХ ПО ФОРМЕ

Ширина поло- еы размы- тости δl , мм	Оптималь- ное уве- личение $\Gamma_{оп}^x$	Размеры изображений объектов (в мм), опознаваемых по форме при значениях тоновых контрастов ΔD					
		0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0
0,01	15	0,12	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03
0,02	7	0,22	0,16	0,13	0,10	0,08	0,07
0,03	5	0,33	0,23	0,19	0,16	0,12	0,11
0,05	3	0,55	0,39	0,32	0,25	0,21	0,18
0,07	2	0,78	0,55	0,45	0,35	0,29	0,29
0,10	1,5	1,10	0,78	0,64	0,49	0,42	0,35
0,20	0,75	2,21	1,57	1,28	0,99	0,84	0,70

Исследования показали, что для рассматривания фотографических изображений наиболее целесообразно применять лупы с увеличением, рассчитанным по следующей формуле:

$$\Gamma_{оп}^x = \frac{0,15 \text{ мм}}{\delta l \text{ мм}}, \quad (V.6)$$

где δl — полоса размытости изображения, измеряемая непосредственно на снимке.

Для априорной оценки оптимального увеличения лупы зарубежные источники рекомендуют формулу

$$\Gamma_{оп}^x = \frac{R_S}{2,5}, \quad (V.7)$$

где R_S — разрешающая способность фотографического изображения в лин/мм.

Для определения наименьших размеров объектов, различаемых на фотографическом изображении, рекомендуются следующие формулы:

— для объектов точечной формы

$$a \geq 1,4 \cdot \delta l \cdot \Delta D^{-\frac{1}{2}}, \quad (V.8)$$

— для объектов линейной формы

$$c \geq 0,6 \cdot \delta l \cdot \Delta D^{-\frac{1}{2}}. \quad (V.9)$$

Для того чтобы при дешифрировании аэроснимков перейти ко второй стадии зрительного восприятия изображения объекта — опознаванию, необходимо, чтобы размер изображения точечного объекта был в 2,5 раза больше размеров, вычисленных по формуле (V.8). То есть, эти размеры следует вычислить по формуле

$$a_{оп} \geq 3,5 \cdot \delta l \cdot \Delta D^{-\frac{1}{2}}. \quad (V.10)$$

В табл. 17 приведены минимальные значения размеров изображений компактных объектов, которые могут быть опознаны на снимках по форме в зависимости от ширины полосы размытости. Как видно из сравнения данных табл. 16 и 17, наличие нерезкости изображения существенным образом ограничивает применение оптических увеличительных приборов и информационную способность непосредственного метода дешифрирования.

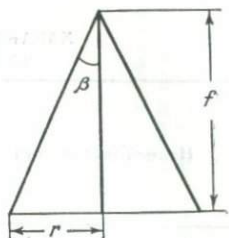


Рис. 54

Увеличительные приборы, применяемые при непосредственном дешифрировании снимков

Увеличительные лупы применяются для монокулярного рассматривания аэроснимков. Увеличительные лупы характеризуются кратностью увеличения Γ^x , фокусным расстоянием f и полем зрения r (рис. 54). Эти величины связаны между собой следующими отношениями:

$$\Gamma^x = \frac{250 \text{ мм}}{f \text{ мм}}, \quad (\text{V.11})$$

$$r = f \operatorname{tg} \beta = \frac{250}{\Gamma^x} \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (\text{V.12})$$

Могут применяться сложные лупы, построенные по схеме микроскопа и состоящие из двух частей: объектива и окуляра. В этом случае увеличение сложной лупы определится из соотношения

$$\Gamma^x = \Gamma_{об}^x \cdot \Gamma_{ок}^x \quad (\text{V.13})$$

или

$$\Gamma^x = \frac{250}{f_{ок} \cdot f_{об}}, \quad (\text{V.14})$$

где $\Gamma_{об}^x$, $\Gamma_{ок}^x$ — увеличение объектива и окуляра соответственно; $f_{ок}$, $f_{об}$ — фокусное расстояние окуляра и объектива.

Увеличительные лупы изготавливаются обычно 2, 4, 6, 8, 10, 12^x увеличения. Лупы 4-кратного увеличения и более изготавливаются на подставках.

Лупы с увеличением 10^x и более изготавливаются, как правило, с измерительными шкалами, помещаемыми в их фокальной плоскости и используемыми для измерения видимых размеров изображений. Лупы бывают чаще всего в виде наборов или комплектов для дешифрирования.

Технические характеристики некоторых луп и их наборов даны в табл. 18 и 19.

Таблица 18

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУП, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СССР
ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ АЭРОСНИМКОВ

Наименование луп	Наименование комплектов			
	НДЛ-2		НДЛ-3 и НДЛ-3к	
	Угловое увеличение, крат	Линейное поле зрения, см	Угловое увеличение, крат	Линейное поле зрения, см
Обзорная лупа	2	15×7,5	—	—
Штативная лупа	4	4,5	—	—
Измерительная лупа	10	1,7	—	—
Налобная лупа БЛ-1	—	—	2	15—18
Биноккулярная лупа ($\Gamma_{об}^x = 0,7^{\lambda}$) при исполь-				
зовании окуляров:				
$\Gamma_{ок}^x = 6^x$	—	—	4,2	Ø3,4
$\Gamma_{ок}^x = 12,5^x$	—	—	8,7	Ø2,5
$\Gamma_{ок}^x = 17^x$	—	—	11,9	Ø2,0

Таблица 19

ХАРАКТЕРИСТИКА ЛУП, ПРИМЕНЯЕМЫХ В США
ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ АЭРОСНИМКОВ

Наименование луп	Марка, тип	Угловое увеличе- ние, крат	Линейное поле зре- ния, см	Примечание
Лупа монокулярная, семикратная	AP-60A	7	2,7	
Лупа монокулярная, шестикратная	Pocket Comparator	6	2,7	
Лупа монокулярная, пятикратная	Pocket — Size transl. Type	5	3,2	
Лупа монокулярная, пятикратная	magnifier Type	5	2,0	
Лупа монокулярная, семикратная	376-GE	7	2,0	
Лупа монокулярная, тринадцатикратная	—	13	1,5	
Лупа монокулярная, панкратическая	FAA 185A	4,5÷9	—	Панкратичес- кое увеличение

Возможности стереоскопического рассматривания аэроснимков

Для биноклярного (стереоскопического) рассматривания парных изображений объектов (стереопар) применяются стереоскопы. Стереоскопы позволяют видеть объемное изображение местности и ее объектов, и оценивать их размеры в трех измерениях. Стереоскопическое зрение так же, как и монокулярное, имеет свою остроту. Острота стереоскопического зрения различна для наблюдения точечных и штриховых объектов. Средняя

Таблица 20

ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕРЕОСКОПОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СССР ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ АЭРОСНИМКОВ

Наименование стереоскопов и луп	Размеры обрабатываемых аэрофильмов, см	Увеличение стереоскопа, крат	Поле зрения, мм	Габариты, см	Масса (с упаковкой), кг	Примечание
Зеркально-линзовый стереоскоп ЗЛС-1	18×18 18×30 53×53	0,76÷1,11 3,3÷5	(90×90) ÷ ÷ (150×150) 45×67	50×55×34	7,7 (21)	Устранение продольных и поперечных параллаксов до 10 мм
Складной зеркально-линзовый стереоскоп ЗЛС-1	13×18 18×18	0,8 1,2	155×123 140×100	31×16,5×10	2,2	
Совещательный стереоскоп СС-1	13×18 18×18 30×50	1,5 4,4 9,5	132 45 20	47×47×32	23 (32)	
Стереоскоп дешифрования щелевых аэрофильмов ШЦ-1	18×18	1,0 4,0	110×110 45	89×23×28	8,0 (16)	
Стереоскоп-лорнет СЛ-1	8×23 18×18 18×24 18×18	1,6	132	6×15	0,2	
Измерительный стереоскоп проф. Дробышева СИД	18×18	2,5 3,5; 7,5	—	—	—	Измерение параллаксов с точностью 0,1—0,05 мм
Стереоскоп-пантограф СП-2	18×18 30×30	2; 3; 4; 5; 6; диоптрий	—	20×21	7,0	
Походный стереоскоп СП-2	8×23 18×18	2,2 1,0	65×65	26×21×5	1,3	
Полевой стереоскоп проф. Дробышева Д-2	8×23 18×18	4,0	90×120	—	2,0	
Камеральный стереоскоп КС-1	13×18 18×18 8×23	1,9; 3,9; 4,9; 5,9; 7,0	50×50 180×180 без линз	25×14 —	—	Позволяет рассматривать разномасштабные снимки от 0,7:1 до 2,3:1

острота стереоскопического зрения при наблюдении точечных объектов $\eta_{з.ст} = 30''$, а при наблюдении штрихов $\eta_{з.ст} = 10''$.

Стереоскопическое рассматривание радиолокационных снимков при дешифрировании во всех случаях выгоднее нестереоскопического. Для того, чтобы вникнуть в сущность изображений, нужно рельефно представить себе окружающую обстановку. Трехмерная картина, видимая в стереоскопе, в значительно большей степени позволяет судить не только о форме объекта, но и о его положении среди других объектов и взаимосвязи с ними. Кроме того, стереоскопическое изображение обладает большей разрешающей силой, чем нестереоскопическое, так как состоит из двух изображений, как бы наложенных одно на другое. Наконец, стереоскоп необходим при измерении высот и глубин объектов. Как показывают исследования, стереоскопическое рассматривание аэроснимков с увеличением $2-4\times$ повышает дешифрируемость объектов на 30—35%.

Характеристики некоторых стереоскопов представлены в табл. 20 и 21.

С целью лучшей организации процесса дешифрирования и создания оптимальных условий для дешифровщиков создаются приборы и комплекты приборов для дешифрирования. Технические характеристики некоторых приборов и комплектов представлены в табл. 22 и 23.

§ 20. Изобразительные свойства радиолокационного изображения

Изобразительные свойства радиолокационного изображения определяются тем, как передаются в изображении контрасты местности и какие при этом наименьшие размеры объектов местности изобразятся раздельно на снимке.

Изобразительные свойства радиолокационного изображения могут быть оценены следующими критериями:

- а) геометрическим масштабом, или способностью передавать линейные соотношения объектов съемки;
- б) детализметрическим масштабом, т. е. способностью передавать в изображении мелкие детали местности;
- в) фотометрическим масштабом, или способностью передавать яркостные соотношения объектов съемки.

Геометрический масштаб радиолокационного снимка

Исходя из формул связи между координатами точек местности и точек радиолокационного снимка, полученного РЛС БО с вдольфюзеляжной антенной, запишем знаменатель геометрического масштаба радиолокационного изображения:

— поперек полета носителя (вдоль строки)

$$M_y = \frac{ck}{2v_{py}} \cdot \frac{R_i}{D_i} = M_{з,y} \frac{R_i}{D_i}, \quad (V.15)$$

— вдоль полета носителя

$$M_x = \frac{W}{v_{p.1x}}, \quad (V.16)$$

где c — скорость распространения радиоволн;

$v_{p.y}$ — скорость записи (развертки) вдоль строки;

k — коэффициент изменения масштаба при фотозаписи;

R_i — наклонная дальность;

D_i — проекция наклонной дальности на горизонтальную плоскость;

W — скорость полета носителя;

$v_{p.1x}$ — скорость движения (протяжки) фотопленки;

$M_{z.y}$ — знаменатель масштаба записи вдоль строки ЭЛТ.

Согласно формулам (V.15) и (V.16), масштаб радиолокационного изображения вдоль полета в идеальном случае ($W = \text{const}$, $v_{p.1x} = \text{const}$) сохраняет постоянство, в то время как масштаб поперек полета (вдоль строки) меняется по гиперболе. При этом масштаб ближнего плана оказывается более мелким, чем дальнего. Нелинейность изменения масштаба тем ощутимее, чем больше ширина полосы обзора местности.

Масштаб записи вдоль строки устанавливается исходя из стандартных размеров экрана ЭЛТ (L_s) и необходимой ширины полосы обзора местности при съемке (ΔR). Так, при $\Delta R = 19, 28, 37$ и 56 км и $L_s = 100$ мм средний масштаб записи вдоль строки может принимать значения $M_{z.y} = 190\,000, 280\,000, 370\,000$ и $560\,000$ соответственно.

Применение оптической системы для проектирования изображения строки ЭЛТ на фотопленку способно изменить это соотношение в K раз. Для РЛС БО АН/АРQ-102 (см. табл. 3) запись изображения производится на фотопленку $L_{\phi} = 127$ мм, следовательно, значения $M_{z.y}$ на фотопленке будут равны $150\,000, 220\,000, 291\,000$ и $440\,000$.

Для радиолокационного изображения, полученного с помощью РСА, знаменатели масштабов определяются из следующих соотношений:

— поперек полета

$$M_y = \frac{ck}{2 \cdot v_{py}} \cdot \frac{f_{\text{ц}}}{f_{\text{сф}}} \cdot \frac{R_i}{D_i}, \quad (V.17)$$

— вдоль полета

$$M_x = \frac{W}{v_{p.1x}} \cdot \frac{v_{p.2x}}{v_{p.3x}}. \quad (V.18)$$

Здесь, кроме принятых ранее обозначений:

$f_{\text{ц}}$ и $f_{\text{сф}}$ — фокусные расстояния цилиндрической и сферической линз, входящих в конструкцию спектроанализатора;

$v_{p.2x}$ — скорость движения пленки в спектроанализаторе;

$v_{p.3x}$ — скорость перемещения изображения в выходной плоскости.

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ СТЕРЕОСКОПОВ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ АЭРОСНИМКОВ

Наименование стереоскопов	Марка стереоскопа	Размеры обрабатываемых аэроснимков, мм	Увеличение стереоскопа, крат	Масса в упаковке, кг	Кем изготавливается
1	2	3	4	5	6
Стереоскоп карманной, измерительный	TM	230×230	1	0,540	Leiss Aerotopograph corporation
Стереоскоп призмозеркальный	F-71 F-HB	230×230	1 или 4	2,8	Fairchild Camera and Instruments corporation
Стереоскоп для просмотра неразрезанных фильмов	C-1 Модель SC-2	230×230	От 6 до 30	24	Chicago Aerial Industries Inc.
Стереоскоп, 70 мм	Zoom 70 Модель II	70×70 (по неразрезанным фильмам)	От 7 до 80 панкратическое	4,8	—
Стереоскоп-стереобинокуляр	AR-26A AR-26B	70×70	От 2,5 до 36 панкратическое	10	—
Стереоскоп для наблюдения аэрофильмов	FL-2	70×70 240×240	2,5; 6; 12 3,5; 8; 16	Данных нет	«Бауш и Ломб» (США)
Микрооперационный стереоскоп	—	70×100	3—120	Данных нет	То же
Высокосильный стереоскоп	—	70×100	13—200	Данных нет	То же
Наблюдательный стереоскоп для наблюдения АФИ, ИКИ, РЛИ	—	57×57 230×460	0,7—3 со сменной оптикой до 120	Данных нет	То же
Стереоскоп для наблюдения аэрофильмов и диапозитивов	373 AM и 387	240×240	4—51	Данных нет	«Оптомеханизм» (США)
Зеркальный стереоскоп с параллаксометром	—	300×300	0,9; 3,5	7,2	«Карл Цейсс», Йена (ГДР)
Совещательный, сканирующий стереоскоп	SFG-3/6	300×300	1,25; 4	Данных нет	«Галилео» (Италия)
Сканирующий совещательный стереоскоп с поворотными зеркалами	ODSS-111	Данных нет	1,5; 4,5	Данных нет	«Олд Делфт» (Нидерланды)
Зеркальный стереоскоп с откидным бинокляром и параллаксометром	ST-4	Данных нет	1; 3; 8	Данных нет	«Вильд» (Швейцария)
Зеркальный стереоскоп с биноклярной насадкой и параллаксометром	—	300×300	1,1; 8; 3; 6	Данных нет	«Зигфрид Герцог» (ФРГ)
Сканирующий стереоскоп с откидным бинокляром. Светящаяся измерительная марка	—	—	1; 4	Данных нет	«Хиллер и Ватт» (Англия)
Зеркальный стереоскоп с откидным бинокляром и параллаксометром	MS/64	—	1; 6	Данных нет	«ОМИ» (Италия)

Наименование стереоскопов	Марка стереоскопа	Размеры обрабатываемых аэроснимков, мм	Увеличение стереоскопа, крат	Масса в упаковке, кг	Кем изготавливается
1	2	3	4	5	6
Полевой зеркальный стереоскоп с параллаксометром. Люминесцентное освещение	—	—	4	Данных нет	«Каселла» (Англия)
Зеркальный сканирующий стереоскоп с параллельно-двигательным механизмом	—	—	14	Данных нет	То же
Стереопантометр-сканирующий стереоскоп с параллаксометром	—	300×300	0,9; 3,5	Данных нет	«Карл Цейсс», Йена (ГДР)

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКТОВ
 ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ АЭРОНЕГАТИВОВ И ОТПЕЧАТКОВ С НИХ,
 ПРИМЕНЯЕМЫХ В СССР

Наименование прибора	Марка прибора	Назначение и технические данные прибора
1	2	3
Прибор для дешифрирования негативов	ПДН-4	<p>Предназначен для дешифрирования неразрезанных негативных аэрофильмов формата 19 см и 32 см. Прибор снабжен НДЛ-2</p> <p>Габариты: длина 345 мм ширина 345 мм высота 570 мм</p>
		<p>Масса 17 кг (40 кг в упаковке). Меняет наклон стола на $\varphi = 0-65^\circ, 80^\circ$. Потребляемая мощность 240 Вт</p>
Прибор для дешифрирования аэронегативов	ПДН-5м (ПДН-5)	<p>Предназначен для дешифрирования неразрезанных аэрофильмов и отпечатков размером 53 см, 32 см, 19 см и 8 см. Имеет регулируемое освещение от 0 до 5000 лк. В левом окне — местная подсветка до 10 000 лк. Прибор снабжен НДЛ-2, НДЛ-3, ЗЛС-1</p>
		<p>Габариты: высота 840 мм ширина 920 мм длина 1280 мм</p> <p>Масса 170 кг (355 кг в упаковке) Меняет наклон стола на $\varphi = 0-60^\circ$. Потребляемая мощность 2 кВт</p>
Просмотровый стол щелевого стереоскопа	ПСЦ-1	<p>Предназначен для дешифрирования неразрезанных аэрофильмов, полученных АЦАФА-5 (одновременно двух аэрофильмов размером 19 см). Имеет регулируемое освещение от 500 до 5000 лк</p> <p>Снабжен НДЛ-2 и СЦ-1</p> <p>Габариты: высота 720 мм ширина 750 мм длина 750 мм</p> <p>Масса 74 кг (полный комплект 148 кг). Изменение наклона стола $\varphi = 30-60^\circ$. Потребляемая мощность 650 Вт</p>
Походный комплект дешифровщика	ПКД-1	<p>Предназначен для дешифрирования сухих и мокрых аэрофильмов размером 13 см и 32 см и фотоотпечатков 13×18, 18×18 и 30×30</p> <p>Снабжен НДЛ-2, НДЛ-3, может использовать ЗЛС-1</p> <p>Габариты: высота 422 мм ширина 626 мм длина 1126 мм</p> <p>Масса 81 кг (90 кг) Угол наклона $\varphi = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ Регулируемое освещение до 5000 лк Потребляемая мощность 560 Вт</p>

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКТОВ
 ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ АЭРОНЕГАТИВОВ И ОТПЕЧАТКОВ С НИХ,
 ПРИМЕНЯЕМЫХ В США

Наименование прибора	Марка прибора	Назначение и тактико-технические данные прибора
1	2	3
Просмотровый стол для дешифрирования снимков	Модель US-10B-1	Предназначен для дешифрирования снимков в стационарных условиях. Характерной особенностью прибора является возможность измерения оптических плотностей фильма и оценка качества фильма
Просмотровый стол для дешифрирования аэроснимков	Модели 655-A/060 655-A/070 655-A/110 655-A/220 655-A/302	Позволяет одновременно рассматривать снимки двух смежных маршрутов, имеющих размер от 7 до 12,7 см, а также снимки одного маршрута, имеющие ширину 25 см. Длина обрабатываемых фильмов не более 152 м. Наблюдательная система — бинокулярный микроскоп марки Zoom-70 фирмы «Бауш и Ломб». Для подсвета используются лампы дневного света. Освещенность просмотрового окна 3000 футлабертов
Дешифровочный прибор для просмотра фильмов на экране	Variscan	Предназначен для просмотра фильма на экране. Размер экрана 76×76 см Размер просматриваемых фильмов: ширина от 35 до 240 мм, длина 305 мм Увеличения: 3, 6, 12, 30, 48 крат. Разрешение экрана 180—200 лин/мм при 30-кратном увеличении. Скорость перемотки пленки от 6 мм/мин до 76 м/мин Габариты: 173×129×228 см (высота, ширина, длина). Масса 817 кг

Анализируя приведенные формулы (V.17) и (V.18), убеждаемся, что характер масштабных построений для случая искусственного раскрыва антенны остался таким же, что и в случае РЛС БО с вдольфюзеляжной антенной. Усложнился лишь механизм настройки. В процессе регулировки и настройки аппаратуры стремятся к тому, чтобы масштаб изображения во всех направлениях оказывался бы равным и постоянным. Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований, масштаб реальных радиолокационных снимков вдоль направления полета не сохраняет постоянной величины. Разность экстремальных масштабов достигает $\approx 5\%$.

Масштаб по направлению сканирования изменяется не по гиперболическому закону. Изоколы масштабов реального радиолокационного изображения имеют весьма сложные очертания, а разность экстремальных масштабов достигает $\approx 25\%$.

Деталиметрический масштаб радиолокационного снимка

Деталиметрическим масштабом аэроснимка называется отношение диаметра наименьшей детали (a), различаемой на черно-белом чертеже, к диаметру наименьшего элемента местности (A), различаемого на фотоизображении, умноженному на знаменатель геометрического масштаба (M_r)

$$\frac{1}{M_d} = \frac{a}{A \cdot M_r} \quad (V.19)$$

По результатам исследований $a=0,12$ мм. Что же касается произведения ($A \cdot M_r$), то для радиолокационных систем, это разрешение на местности для данных условий съемки — техническая характеристика применяемой радиолокационной аппаратуры.

Как указывалось выше (глава II), разрешение РЛС БО с вдольфюзеляжной антенной рассчитывают по формулам:

— по дальности

$$\delta Y = \left(\frac{c\tau}{2} + \frac{\Delta R}{L_s} d_n \right) \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{H}{R} \right)^2}}, \quad (V.20)$$

— по азимуту

$$\delta X = \frac{\lambda R}{d_a}, \quad (V.21)$$

где τ — длительность радиоимпульса;

d_n — диаметр светового пятна на экране ЭЛТ;

λ — длина волны излучений;

d_a — длина вдольфюзеляжной антенны;

H — высота полета носителя;

R — величина наклонной дальности до объекта.

На основании вышеприведенных формул, приняв за исходные данные параметры РЛС БО AN/APS-84 ($\lambda = 3$ см, $d_a = 6$ м, $\tau = 0,13$ мкс, $L_s = 100$ мм, $d_n = 25$ мкм, $\Delta R = 19, 37, 56$ км), рассчитаем разрешение на местности для различных случаев съемки (табл. 24, 25).

Для сравнения в табл. 26 даны величины разрешения на местности для аэрофотоснимков, полученных АФА с $f=1000$ мм и разрешающей способностью $R_s=40$ лин/мм. Значение диаметра наименьшей детали, различаемой на аэрофотоснимке, рассчитано по формуле (V.10) и принято равным 0,06 мм.

Как видно из приведенных таблиц, разрешение РЛС БО с вдольфюзеляжной антенной далеко от возможностей АФА в тех же условиях съемки. С целью повышения разрешающей способности радиолокационных изображений были разработаны способы создания искусственного раскрыва антенны за счет поступательного движения самолета и способы сжатия зондирующего импульса и последующей обработки отраженных импульсов.

Т а б л и ц а 24

РЛС	$H = 10\,000$ м	$H = 10\,000$ м	$H = 10\,000$ м
	$\Delta R = 19$ км	$\Delta R = 37$ км	$\Delta R = 56$ км
	$\frac{H}{R} = 0,3-0,2$	$\frac{H}{R} = 0,3-0,14$	$\frac{H}{R} = 0,3-0,11$
δY	$25,6 \div 24,2$ м	$30,3 \div 28,7$ м	$35,4 \div 33,4$ м

Т а б л и ц а 25

РЛС	$R_{\max} = 33$ км	$R_{\max} = 52$ км	$R_{\max} = 69$ км	$R_{\max} = 88$ км
ΔX	198 м	312 м	414 м	528 м

Т а б л и ц а 26

АФС	$R_{\max} = 33$ км	$R_{\max} = 52$ км	$R_{\max} = 69$ км	$R_{\max} = 88$ км
ΔL	2,0 м	3,1 м	4,1 м	5,3 м

Продолжительность зондирующего импульса в РСА благодаря сжатию не превышает $\tau = 0,03$ мкс, а разрешение по азимуту составляет:

— для случая «несфокусированной» антенны

$$\delta X = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda R}; \quad (V.22)$$

— для случая «сфокусированной» антенны

$$\delta X = d_a. \quad (V.23)$$

Вычисленные по этим формулам величины разрешения становятся сравнимыми с разрешением АФА, но в этом случае для полной оценки разрешающей способности радиолокационного изображения становится необходимым учитывать разрешающую способность блоков, входящих в аппаратуру обработки радиосигналов (объектива фоторегистратора, фотопленки, оптики спектроанализатора и т. д.). Для расчета разрешающей способности радиолокационного изображения, полученного РСА, можно рекомендовать следующие формулы:

$$\begin{aligned} \delta Y_{\text{РСА}} = & \left[(0,3c\tau)^2 + \left(\frac{\Delta R}{L_9} d_n \right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{2L_1 R_{\text{об}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{2L_2 R_{\text{сн}}} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\Delta R}{2L_1 R_{\Phi 1}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{2L_2 R_{\Phi 2}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{L_1} \Delta_1 \right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{L_1} \cdot \frac{\delta_1}{n_{\text{об}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{L_2} \Delta_2 \right)^2 + \right. \end{aligned}$$

$$+ \left(\frac{\Delta R}{L_2} \Delta_3 \right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{L_2} \Delta_4 \right)^2 \Bigg]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{H}{R} \right)^2}}, \quad (\text{V.24})$$

$$\delta X = [(d_a)^2 + (M_{3.x.1} \cdot d_n)^2 + \left(M_{3.x.1} \cdot \frac{1}{2R_{об}} \right)^2 + \left(M_{3.x.1} \cdot \frac{1}{2R_{\Phi_1}} \right)^2 + \left(M_{3.x.2} \cdot \frac{1}{2R_{\Phi_1}} \right)^2 + \left(M_{3.x.2} \cdot \frac{1}{2R_{\Phi_2}} \right)^2 + \left(M_{3.x.1} \cdot \frac{\delta_1}{n_{об}} \right)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{V.25})$$

Здесь, кроме принятых ранее обозначений:

- L_1 — ширина изображения на первичной фотопленке;
- L_2 — ширина изображения на вторичной фотопленке;
- $R_{об}$ — разрешающая способность объектива фоторегистратора;
- R_{Φ_1}, R_{Φ_2} — разрешающая способность первичной и вторичной пленок;
- $R_{сп}$ — разрешающая способность объектива спектроанализатора;
- Δ_1 — поперечное смещение пленки в фоторегистраторе;
- δ_1 — невыравнивание пленки в фоторегистраторе;
- $n_{об}$ — относительное отверстие объектива фоторегистратора;
- Δ_2 — поперечное смещение первичной пленки в спектроанализаторе;
- Δ_3 — поперечное смещение вторичной пленки в спектроанализаторе;
- Δ_4 — несинхронность протяжки пленок в спектроанализаторе (имеет место только в спектроанализаторе телескопического типа).

По вышеприведенным формулам рассчитаем значение разрешения на местности радиолокационного изображения, полученного с помощью РСА АН/АРQ-102 для различных случаев съемки (табл. 27). При этом примем следующие значения параметров блоков РСА (табл. 28).

Исходя из данных табл. 28 и формулы (V.19), можно получить следующие значения знаменателя деталиметрического масштаба для радиолокационных снимков (табл. 29) и аэрофотоснимков (табл. 30).

Т а б л и ц а 27

РЛС	$H = 10\,000$ м	$H = 10\,000$	$H = 10\,000$	$H = 10\,000$
	$\Delta R = 19$ км	$\Delta R = 28$ км	$\Delta R = 37$ км	$\Delta R = 56$ км
	$\frac{H}{R} = 0,3-0,29$	$\frac{H}{R} = 0,3-0,1$	$\frac{H}{R} = 0,3-0,14$	$\frac{H}{R} = 0,3-0,11$
δY	9,4—9,1 м	13,7 — 13,1 м	17,3 — 16,7 м	24,8 — 23,8 м
δX	7,9 м	11,5 м	14,5 м	18,6 м

Т а б л и ц а 28

Параметр	Величина	Параметр	Величина
L_3	100 мм	$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$	0,01 мм
L_1	127 мм	δ_1	0,02 мм
L_2	70 мм	$n_{об}$	2
ΔR	19, 28, 37, 56 км	R_{Φ_1}, R_{Φ_2}	120 лин/мм
$R_{об}, R_{сп}$	30 лин/мм	d_a	1,27 м

Т а б л и ц а 29

РЛС	$H = 10\ 000$	$H = 10\ 000$	$H = 10\ 000$	$H = 10\ 000$
	$\Delta R = 19$ км	$\Delta R = 28$ км	$\Delta R = 37$ км	$\Delta R = 56$ км
	$R_{max} = 33$ км	$R_{max} = 52$ км	$R_{max} = 69$ км	$R_{max} = 88$ км
M_D	66 000 ÷ 78 500	96 000 ÷ 114 000	121 000 ÷ 144 000	155 000 ÷ 207 000

Т а б л и ц а 30

АФС	$R_{max} = 33$ км	$R_{max} = 52$ км	$R_{max} = 69$ км	$R_{max} = 88$ км
M_D	16 700	25 800	34 200	44 100

Из сравнения табл. 29 и 30 следует, что изобразительные качества радиолокационных изображений по информативности почти в 5 раз хуже аэрофотоизображений.

Фотометрический масштаб радиолокационного снимка

Фотометрическим масштабом изображения называют отношение интервала яркости, передаваемого снимком, к интервалу яркости, существующему в натуре:

$$\frac{1}{M_{\Phi}} = \frac{U_{сн}}{U_0}, \quad (V.26)$$

где M_{Φ} — знаменатель фотометрического масштаба;

$U_{сн} = \frac{b_2}{b_1}$ — интервал яркостей объектов изображения;

$U_0 = \frac{B_2}{B_1}$ — интервал яркостей объектов, наблюдаемых в натуре;

b_1, b_2 — яркости объектов, наблюдаемые на изображении;

B_1, B_2 — яркости объектов, наблюдаемые в натуре.

Интервал яркостей фотографического изображения создается различиями его плотности. Количественно это может быть выражено с помощью характеристической кривой. Аппроксимация характеристической кривой дает возможность ее математического выражения

$$D = \begin{cases} D_0, & \text{при } H = H_0 \\ D_0 + \gamma \lg \frac{H}{H_0}, & \text{при } H > H_0, \end{cases} \quad (\text{V.27})$$

где $H_0 = B_1 t$ — экспозиция, соответствующая точке перегиба кривой;

γ — коэффициент контрастности данного светочувствительного материала.

Контрасты фотографического изображения обусловлены, во-первых, контрастами самих объектов, т. е. различиями в отражательной способности этих объектов и различиями в их освещенности, и, во-вторых, свойствами светочувствительного материала, с помощью которого закрепляется изображение объектов. Кроме того, на величины контрастов влияют и побочные причины. К ним относятся спектральное поглощение света воздухом и съемочным объективом и дополнительная яркость оптического изображения, создаваемая яркостью воздушной дымки.

В общем случае контраст фотографического изображения определяется следующей зависимостью:

$$\Delta = D_2 - D_1 = \gamma \lg \frac{\sum_{\lambda_i}^{\lambda} r_{1\lambda} T_{\lambda} S_{\lambda} + T(k + \sigma)}{\sum_{\lambda_i}^{\lambda} r_{2\lambda} T_{\lambda} S_{\lambda} + T(k + \sigma)}, \quad (\text{V.28})$$

где $r_{1\lambda}$, $r_{2\lambda}$ — коэффициенты спектрального отражения;

T_{λ} — коэффициент спектральной прозрачности светофильтра;

S_{λ} — спектральная чувствительность аэропленки;

k — коэффициент яркости дымки;

σ — коэффициент светорассеяния в камере АФА;

T — коэффициент общей прозрачности светофильтра.

Максимальная разность плотностей аэрофотоснимка, т. е. различие в плотности самого светлого и самого темного объектов, может достигать величины, определяемой следующей зависимостью:

$$D_{\max} - D_{\min} = \gamma L, \quad (\text{V.29})$$

где L — фотографическая широта.

В соответствии с основными характеристиками используемых аэропленок фотографическая широта может иметь значения от 0,6 до 1,5. Коэффициент контрастности γ при этом соответственно будет иметь значения 3,0 и 1,7, тогда

$$\Delta_{\max} = D_{\max} - D_{\min} = 1,8 \div 2,5.$$

Эти значения Δ_{\max} будут соответствовать интервалам яркости изображения, равным

$$U_{\text{сн.и}} = \frac{b_{\max}}{b_{\min}} = 60 \div 300.$$

Однако в практике аэрофотосъемки интервал плотностей всегда значительно меньше, во-первых, потому, что одна и та же выдержка определяется сразу для всех аэроснимков маршрута, и, во-вторых, потому, что при ее расчете должно быть гарантировано отсутствие экспозиций в области недодержек. В связи с этим интервал плотностей аэрофотоизображений следует считать в пределах $1,0 \div 1,5$, что соответствует интервалу яркостей

$$U_{\text{сн.пр}} = \frac{b_{\max}}{b_{\min}} = 10 \div 30.$$

Что же касается интервала яркостей аэроландшафта, то по исследованиям В. Я. Михайлова [71] минимальное значение (для ландшафта со снеговым покровом) составляет 10, но в зависимости от условий освещенности может увеличиваться до 50. Для бесснежного ландшафта интервал яркостей может меняться от 2 до 10, но в отдельных случаях доходит до 30.

Таким образом минимальное значение фотометрического масштаба для аэроландшафта в редких случаях может быть меньше единицы ($\frac{1}{M_{\phi}} = 0,6$). Отсюда следует, что при аэрофотосъемке большинство интервалов яркостей, существующих в природе, передается в изображении без искажений.

В § 5, 6, 7, 8 подробно рассмотрен процесс формирования радиолокационного изображения при съемке. При этом сделаны следующие выводы:

1. Зависимость плотности почернения фотопленки от уровня сигнала на входе индикатора определяется такой же сенситометрической кривой, как и в случае аэрофотосъемки, но с наклоном, увеличенным в γ_n раз, где γ_n — параметр амплитудной характеристики ЭЛТ.

Эта зависимость может быть выражена следующими выражениями:

$$D = \begin{cases} D_0, & \text{при } V < V_0 \\ D_0 + \gamma_n \lg \frac{V}{V_0} & \text{при } V > V_0 \end{cases} \quad (\text{V.30})$$

или

$$D = \begin{cases} D_0, & \text{при } P_{\text{вх}} < P_{\text{ш}} \\ D_0 + \gamma_n \lg \left(1 + \frac{\gamma_n}{2} \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{ш}}} \right) & \text{при } P_{\text{вх}} > P_{\text{ш}}, \end{cases} \quad (\text{V.31})$$

где, кроме принятых ранее обозначений:

V_0 , V — напряжение на входе индикатора;
 $P_{ш}$, $P_{вх}$ — мощность шума и сигналов от объектов на входе индикатора.

2. Как показывают исследования, в приемниках с нелинейной (логарифмической) амплитудной характеристикой все перепады интенсивности отражения местности в пределах 80 дБ динамического диапазона могут быть зарегистрированы на фотопленке, но относительные контрасты соседних участков невелики, что может затруднить дешифрирование и опознавание различий в характеристике подстилающих поверхностей.

В приемнике с АРУ коэффициент усиления для каждого элемента дальности будет зависеть от среднего уровня сигнала по участку длиной $\Delta R_{АРУ}$, предшествующему данному элементу. Основное различие радиолокационного изображения в приемниках с нелинейной амплитудной характеристикой и с АРУ заключается в том, что при использовании АРУ все естественные контрасты на местности в пределах зоны усреднения АРУ сохраняются в выходном сигнале приемника и претерпевают изменения только при нелинейном процессе регистрации. Применение АРУ в приемном тракте позволяет получать большие контрасты при наблюдении соседних целей, оно как бы подчеркивает контуры изображений. Вместе с тем, участки местности, имеющие одинаковую отражающую способность, будут иметь разную плотность на радиолокационном изображении в зависимости от характера местности, окружающей данный участок. Это затрудняет дешифрирование местности по тону изображения.

3. Принципиальное отличие РСА от некогерентных РЛС состоит в том, что операции выделения информации об отражательной способности элементов местности предшествует запоминание принятых вдоль траектории полета сигналов и их последующее когерентное суммирование. Однако градационные характеристики выходного сигнала тракта обработки и плотности вторичной фотопленки близки характеристикам РЛС БО при наличии АРУ в приемном тракте. При этом изображение, получаемое РСА, характеризуется следующими особенностями:

— в каждом участке изображения в пределах зоны облучения антенны РСА экспозиция на фотопленке пропорциональна ЭПР целей;

— цели с одной и той же ЭПР могут регистрироваться с разной интенсивностью на выходе в зависимости от того, каким фоном они окружены;

— сильные цели могут подавлять фон, который их окружает.

Указанные особенности затрудняют опознавание элементов подстилающей поверхности по тону их изображения и в качестве дешифровочных признаков приходится использовать относительные контрасты и форму изображения.

4. Следует отметить, что рассмотренные искажения градационных характеристик радиолокационного изображения присущи любым устройствам обработки сигналов, имеющим недостаточный для воспроизведения всех сигналов динамический диапазон. Согласно опубликованным данным [82], полагают динамический диапазон индикаторов равным:

- для диапозитивов —30 дБ,
- для негативов —20 дБ,
- для электронно-лучевых трубок —10 дБ.

Минимальной разрешаемой градацией для глаза считается 1 дБ.

В связи с тем, что динамический диапазон отраженных аэроландшафтом радиосигналов значительно шире вышеприведенных для индикаторов величин (до 80 дБ), возникает необходимость сжатия диапазона, что приводит к искажениям градации. В этом смысле цифровые вычислители не имеют указанных ограничений, так как их динамический диапазон определяется числом уровней квантования. Однако реализация такой обработки с большим динамическим диапазоном не всегда возможна из-за ограниченного объема памяти вычислителя, а также из-за технической сложности изготовления приемника с динамическим диапазоном выходного сигнала более 30 дБ.

§ 21. Дешифровочные признаки радиолокационных изображений

Демаскирующие и дешифровочные признаки объектов

Дешифрирование объектов по снимкам основано на определении суммы признаков, принадлежащих объектам и отличающих эти объекты от окружающего фона.

Признаки, по которым производится определение объектов в натуре, называются демаскирующими.

Признаки же объектов в том виде, в котором они передаются радиолокационными изображениями, называются дешифровочными. Например, демаскирующими признаками объекта является его форма, размеры, отражательная способность, а дешифровочные признаки, соответствующие этим демаскирующим признакам, есть форма, размеры, а также тон изображения объекта на радиолокационном снимке. Демаскирующие признаки принадлежат самому объекту, дешифровочные — его изображению на снимке. Дешифровочные признаки зависят от условий съемки, от качества фотолабораторной обработки, условий рассматривания и масштаба изображения.

По аналогии с аэрофотосъемкой дешифровочные признаки радиолокационных изображений можно разделить на две основные группы — прямые и косвенные.

К прямым дешифровочным признакам относят тон изображения, размер, форму, структуру и тень изображения. Прямые признаки играют основную роль при дешифрировании радиолокационных изображений. Наиболее важным демаскирующим признаком при радиолокационной съемке является отражательная способность объектов и фона, создающая тон, структуру радиолокационного изображения и в конечном итоге все прямые и косвенные дешифровочные признаки объектов.

Как это было показано ранее (§ 6), тон радиолокационного изображения не может служить устойчивым, объективным дешифровочным признаком в силу своей зависимости от многочисленных факторов, учет которых практически невозможен. И, тем не менее, тон изображения является наиболее важным дешифровочным признаком радиолокационных изображений. Благодаря различию тона изображения становится возможным познание формы и размеров изображений объектов и выявление всех прямых и косвенных дешифровочных признаков.

При всей неустойчивости тона радиолокационного изображения, при достаточно твердом знании характера радиолокационного отражения можно выделить относительные контрасты изображения, по которым можно с уверенностью распознавать наиболее характерные поверхности ландшафта. В табл. 31 даны характеристики отражения радиосигналов некоторыми, наиболее часто встречающимися поверхностями ландшафта и тон их изображения на радиолокационных снимках. Еще раз следует подчеркнуть, что применение АРУ в приемном тракте РЛС позволяет получать большие контрасты при наблюдении соседних целей, происходит как бы подчеркивание контуров изображений. С другой стороны, участки местности, имеющие одинаковую отражательную способность, будут иметь разную плотность на радиолокационном изображении в зависимости от характера местности, окружающей данный участок.

Важным дешифровочным признаком является форма изображения объектов. Форма различного рода крупных построек, сооружений, контуры дорог, рек, ручьев, аэродромов, а также форма сооружений в море (пирс, мол) настолько характерны, что их опознавание на радиолокационном изображении не представляет особого труда.

В то же время следует иметь в виду, что речь может идти об опознавании объектов весьма крупных размеров. Как было показано ранее (см. табл. 17), на фотоснимке возможно опознавание изображений, размеры которых являются функцией ширины полосы размытости и тонового контраста изображения.

Следует считать, что у современных фоторегистрирующих устройств полоса размытости изображения будет определяться числом строк разложения передающей электронно-лучевой труб-

Таблица 31

Вид отражающей поверхности	Характер отражения	Тон изображения
Гладкая (водная) поверхность с наклоном в сторону антенны РЛС БО	Зеркальное, относительно интенсивное, вызванное эффектом ориентации	Темный, умеренно светлый
Гладкая поверхность с наклоном от антенны РЛС БО	Относительно слабое, вызванное эффектом ориентации	Умеренно темный
Шероховатая (h — более одной длины волны)	Диффузное, от средней до высокой интенсивности	Умеренно светлый
Плоская, малшероховатая (h — менее одной длины волны)	Зеркальное, если поверхность гладкая	Темноватый
Естественные угловые отражатели (например, скальные выступы гор)	Очень интенсивное отражение от поверхностей, направленных к антенне	Очень светлый
Высокорасположенные, влажные поверхности	Относительно интенсивное, пропорционально возрастанию диэлектрической постоянной поверхности	Умеренно светлый
Низкорасположенные, влажные поверхности	Относительно слабое, пропорционально уменьшению диэлектрической постоянной поверхности	Умеренно темный
Отдельные группы деревьев, леса	Диффузное отражение высокой интенсивности	Светлый
Кустарники, заросли	Высокой интенсивности с возрастанием при увеличении диэлектрической постоянной	Светлый (в местах сухостоя — относительно темный)
Травяной покров	Диффузное, умеренной интенсивности с понижением при умеренной влажности	Умеренно темный (при малой влажности поверхности — темный)
Посевы широколиственных культур с естественной влажностью	Диффузное, высокой интенсивности	Светлый
Посевы узколиственных сельскохозяйственных культур	Диффузное, средней интенсивности	Умеренный

Вид объектов	Знаменатель масштаба			
	150 000	220 000	290 000	440 000
Объекты компактной формы	24÷18	35÷27,5	46,6÷35	70÷53
Объекты линейной формы	4,5÷3,0	6,6÷4,4	8,7÷5,8	13,2÷8,8

ки. Так, например, при $N=3000$ ТВ линий, ширине экрана $L_s = 100$ мм ширина полосы размытости изображения $\delta l = 0,03$ мм.

Как указывается выше, пограничный контраст радиолокационного изображения у радиолокационных станций с АРУ будет весьма высок (0,5—0,7). Следовательно, согласно табл. 17 на радиолокационном изображении возможно опознавание объектов компактной формы размером 0,16—0,12 мм и объектов линейной формы шириной 0,03—0,02 мм. Учитывая возможный масштаб радиолокационного снимка, составим таблицу размеров объектов, опознаваемых по форме на радиолокационном изображении (табл. 32).

Важным дешифровочным признаком является размер объекта. Как было показано выше, радиолокационный снимок, полученный РЛС БО, представляет собой ортогональную проекцию с определенными допущениями, масштаб которой с достаточным приближением остается постоянным по полю изображения. Исходя из этого, действительные размеры объектов могут быть определены из соотношения

$$A = l \cdot M_r, \quad (V.32)$$

где A — ширина (длина) объекта;

l — ширина (длина) изображения объекта;

M_r — среднее значение знаменателя масштаба изображения, определенное по диагональным направлениям снимка.

Вычисленные по вышеприведенным формулам размеры крупных объектов могут иметь погрешность не более 10% от действительного их значения.

Для мелких по величине объектов вступает в силу явление засветки, в результате которого размеры изображения ярких объектов будут на снимках выглядеть значительно больше ожидаемых. Это особенно касается объектов, способных создавать эффекты сверкания.

Точность определения размеров объектов по радиолокационным изображениям снижается из-за смещения за рельеф. На радиолокационном снимке фиксируются наклонные дальности до объекта. Следовательно, отражающий объект «В», возвышающийся над средней поверхностью, как показано на рис. 55, изобразится на линии развертки на расстоянии R , хотя должен

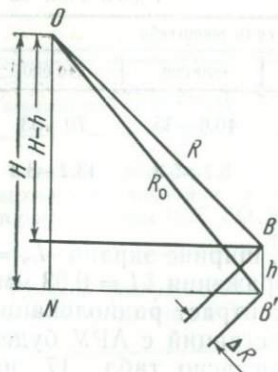


Рис. 55. Смещение за рельеф

был бы изобразиться на расстоянии R_0 . Разность между R и R_0 является смещением за рельеф, т. е.

$$\Delta R = R_0 - R. \quad (V.33)$$

Из рис. 55 получаем

$$R_0 = \sqrt{R^2 + h(2H - h)}, \quad (V.34)$$

где H — высота съемки;

h — высота объекта над средней поверхностью.

Подставив значение R_0 в уравнение (V.33), получим

$$\Delta R = R \left[\sqrt{1 + \frac{h(2H - h)}{R^2}} - 1 \right]. \quad (V.35)$$

Большинство объектов природного ландшафта состоит из совокупности однородных или разнородных элементов, образующих в своем сочетании те или иные природные или культурные комплексы. Каждый тип подобных комплексов обычно характеризуется определенными особенностями радиолокационного изображения. Сочетание на том или ином участке снимка участков различного тона, площади и формы называется тональной структурой изображения.

Тональная структура радиолокационного изображения представляет собой сочетание изображений отдельных элементов данного комплекса, характеризующих особенности почвенно-растительного покрова, условия увлажненности поверхности, а также форм и элементов рельефа. Она отражает также особенности их взаимного расположения, характер и величину интервалов между этими элементами, а также их геометрические и диэлектрические свойства. В табл. 33 представлены характеристики структур некоторых культурных комплексов.

Характер тональной структуры радиолокационного изображения, как и аэрофотографического изображения, определяется главным образом внешними особенностями объектов местности и степенью детальности их отображения на снимках.

Однако для радиолокационных изображений характерно свойство выделения и передачи некоторых структурных геологических деталей местности, которые либо вовсе не обнаруживаются на обычном аэрофотоснимке, либо прослеживаются с трудом. Причина, лежащая в основе подобного изображения на радиолокационном снимке близких по составу геологических пород, не известна. Она может быть обусловлена либо диэлектрическими постоянными этих пород, либо характеристиками поверхностной конфигурации.

Объекты	Интенсивность отражения	Характер радиолокационного изображения
Города	Очень высокая	Линейная, прямоугольная сетка, образуемая кварталами зданий, улицами и площадями
Пригороды	Умеренная	Линейная, прямоугольная сетка, образуемая кварталами зданий и улицами
Шоссейные дороги (улучшенные)	Очень низкая	Линейность, умеренная кривизна
Шоссейные дороги	Та же	Линейность, возможны участки с резкой кривизной, по тону слабо отличаются от окружающей местности
Силовые линии электропередач	Очень высокая	Регулярная пунктирная линия светлого тона, образуемая металлическими опорами
Железные дороги	Та же	Линейность, очень пологая кривизна
Мосты, переправы	Та же	Короткий, светлый отрезок прямой линии
Аэродромы, ВПП, аэродромные постройки	От площади аэродрома, ВПП — низкая, от построек — умеренная	Площадь аэродрома — умеренно темная, Х-образные ВПП — темные, постройки — светлые
Промышленные объекты	Очень высокая	Площадь светлого тона с резкими границами
Сельскохозяйственные угодья	Различная (от высокой до низкой)	Площади, как правило, прямоугольной формы

Косвенные дешифровочные признаки

К косвенным дешифровочным признакам относят:

- местоположение и взаимную связь объектов с его деталями или другими объектами;
- следы деятельности объекта.

Обнаруживая и опознавая отдельные объекты, наблюдатель устанавливает существующую связь между ними, их взаимную зависимость, зависимость характеристики одних объектов от характера местности или наличия других объектов. Косвенные признаки не принадлежат изображению объекта, но указывают

на его наличие в данном месте или на его характерные особенности.

Косвенные признаки, особенно при камеральном дешифрировании, имеют очень важное значение, а иногда, если прямые демаскирующие признаки объектов не изобразились на снимке (замаскированы), косвенные признаки становятся единственной возможностью для обнаружения объектов. Так, например, обнаружение местоположения нефти и газа при геологическом дешифрировании зачастую становится возможным при учете и сопоставлении состава подстилающей поверхности и рельефа местности. В некоторых случаях направление течения реки удастся установить по острому углу впадения притоков, по тупой форме очертаний островов, направленных против течения. При дешифрировании растительности для разделения участков, покрытых кустарником и лесом, учитывают их заболоченность и расположение среди окружающих форм рельефа. При дешифрировании дорог отличию шоссеиных магистралей от железных дорог помогает обнаружение развязов, запасных путей, железнодорожных сооружений и т. д.

§ 22. Методика камерального дешифрирования радиолокационных изображений

Дешифрирование радиолокационных снимков выполняется в различных целях: при составлении контурных радиолокационных карт, обновлении топографических карт, составлении геологических карт, изучении природных ресурсов Земли.

Большие площади, изображаемые на радиолокационных снимках, их мелкий масштаб облегчают изучение главных форм, отличительных черт и общих особенностей местности, которые лишь с большим трудом прослеживаются непосредственно на местности или по записи, получаемой другими датчиками.

С другой стороны, тот же мелкий масштаб радиолокационных снимков и малое разрешение (по сравнению с аэрофотографическими снимками) не позволяют обнаруживать на снимках мелкие детали местности, так необходимые для ориентирования и привязки радиолокационных снимков к географической или геодезической системе координат.

Поэтому при дешифрировании радиолокационных изображений для повышения достоверности опознавания и возможности определения координат отдешифрированных объектов в заданной системе координат обязательно следует использовать вспомогательные материалы. К таким материалам относятся:

— топографические и географические карты крупных масштабов;

— физико-географические, топографические и экономические описания изучаемого района;

— аэрофотоснимки других залетов, съемочные материалы с искусственных спутников Земли;

— различные эталоны (ключи) целей и объектов местности, выполненные на радиолокационных изображениях.

Выбор масштаба карты, используемой для дешифрирования, производится в зависимости от масштаба радиолокационных изображений и поставленных перед дешифрированием задач.

При наличии топографических карт масштаба 1 : 200 000 и крупнее вопросы дешифрирования радиолокационных снимков упрощаются. Топографическая карта, помещенная на экран фототрансформатора, может служить основой для последующего преобразования и приведения радиолокационного изображения к масштабу этой карты.

Дальнейшая обработка радиолокационного изображения сведется в этом случае к совмещению его с картой и сопоставлению имеющихся на ней и радиолокационном изображении объектов и к дополнению карты вновь появившимися и опознанными на изображении объектами.

Для правильной интерпретации радиолокационных изображений целесообразно:

— использование при рассматривании стереоскопического эффекта (если по условиям съемки это возможно);

— проектирование радиолокационного изображения на экран с изображением топографической карты;

— совместное дешифрирование инфракрасных, телевизионных, фотографических и лазерных изображений той же местности;

— соблюдение определенной последовательности дешифрирования элементов местности.

Проектирование изображения на топографическую карту и совмещение основных, легко опознаваемых контуров и объектов освобождает от их дешифрирования и позволяет легче опознать и интерпретировать вновь появившиеся на местности и отсутствующие на карте объекты. Совместное использование результатов различных технических видов съемки при дешифрировании позволяет уверенней дешифрировать малоразмерные объекты.

Последовательность дешифрирования элементов местности и заданных объектов зависит от задач и целей дешифрирования, наличия вспомогательных материалов и используемых при дешифрировании инструментов.

Наиболее типичным случаем является топографическое дешифрирование, при котором должны быть определены характер рельефа, тип грунта, направление водотоков, вид растительности, характер и местоположение искусственных объектов (населенных пунктов, дорог, линий связи и т. п.). Принципиальная схема анализа радиолокационного снимка в этом случае

I. Обнаружение

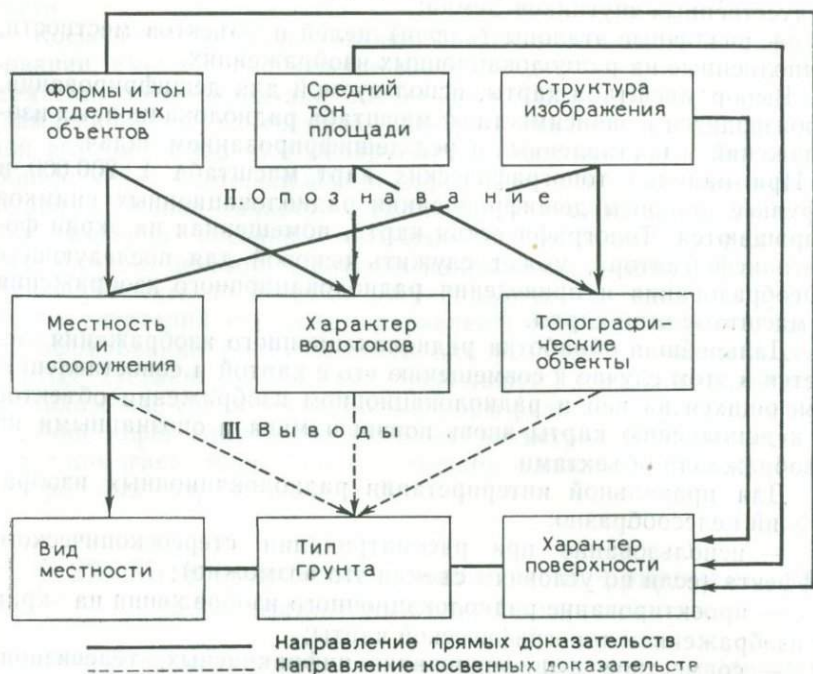


Рис. 56

представлена на рис. 56. Последовательность действий при этом следующая:

а) ориентируют снимок таким образом, чтобы светлые части изображения были направлены от дешифровщика, а тени — к дешифровщику;

б) выделяют (очерчивают пунктиром или желтой краской) площади изображения одинакового вида (однородной структуры);

в) производят анализ площадей, выделяя при этом следующее:

— элементы светлого и темного тонов и их геометрическую конфигурацию;

— наличие радиолокационных теней (их размеры, форму и направление);

— структуру изображения (гладкая, зернистая, пятнистая, грубая, нерегулярная макроструктура);

г) оценивают характер местных водотоков (дендриты, параллельные, серповидные и т. д.); выделяют площади, в которых отсутствуют водотоки, и, наоборот, площади с высокой степенью развития водоточных систем, оценивают плотность водотоков;

д) производят оценку топографии местности:

— выявляют характер рельефа по величине и форме радиолокационных теней и плотности водотоков,

— определяют топографические объекты и покров местности по среднему тону изображения и относительному контрасту;

е) оценивают вид растительности и вид искусственных объектов:

— опознают сельскохозяйственные угодья по их форме и размерам, вид растительности (сельскохозяйственные культуры, травы, лесонасаждения, кустарники и т. п.);

ж) осуществляют общую итоговую оценку исследуемой площади по виду и взаимному расположению опознанных объектов;

з) составляют выводы о генетической и морфологической структуре местности, о типах грунтов и параметрах, требуемых в соответствии с поставленной задачей.

При дешифрировании радиолокационных изображений используются зависимости между характером отражающих поверхностей и радиолокационным тоном изображения (см. табл. 31), а также учитываются данные об интенсивности отражения радиоволн и характере радиолокационного изображения искусственных объектов (см. табл. 33).

При оценке рельефа местности учитываются величина и направленность радиолокационных теней, образуемых на снимках необлучаемыми участками местности, закрытыми впередилежащими возвышенностями.

Для оценки типа грунта большое значение имеет учет характера водотоков, которые могут отражать степень твердости материковой породы, структуру геологического строения, геоморфологию местности и т. п.

На радиолокационном изображении различают следующие виды водотоков: ручьи, реки, озера, искусственные водоемы, высохшие русла, следы дождевых горных потоков. По своей форме они могут быть разветвленными (дендриты), прямоугольными, решеткообразными, параллельными, серповидными, плетевидными. Выявление генетических и морфологических характеристик местности способствует определению вероятного типа грунта. Например, затопляемая долина может указывать на наличие наносных отложений на материковых породах.

Изложенная методика дешифрирования радиолокационных изображений является наиболее общей, но не исчерпывающей. В зависимости от целей дешифрирования, наличия приборов, инструментов и вспомогательных материалов, а также в зависимости от срочности работы методика может дополняться или сокращаться.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ МЕСТНОСТИ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ СНИМКАМ

§ 23. Общие сведения

Известные методы определения координат объектов местности по одиночным РЛ снимкам основаны главным образом на использовании опорных точек, так как существующие навигационные системы в большинстве случаев не обеспечивают необходимой точности.

Среди этих методов имеются простейшие, основанные на переносе объектов со снимка на топографическую карту с помощью графических, графо-аналитических и оптико-механических способов, и более сложные, основанные на аналитическом решении задачи с использованием ЭВМ.

Основным недостатком простейших методов, препятствующих их широкому применению, является повышенное требование к плотности опорных точек.

В основу известных аналитических методов определения координат объектов местности положена априорная математическая модель РЛ изображения и ее связь с системой координат карты [113] или полиномы [131], созданные с учетом угловых и линейных эволюций носителя.

В первом случае [113] задача определения координат объектов решается в два этапа. Вначале по известным значениям масштабов записи изображения вдоль и поперек полета носителя производится преобразование измеренных координат точек снимка в фотограмметрическую систему координат. Затем по опорным точкам осуществляется геодезическое ориентирование фотограмметрической системы координат. Средние квадратические погрешности определения координат объектов при использовании этого метода по снимкам м-ба 1 : 250 000, полученным с высоты 150 м, колеблются от 65 до 78 м.

Во втором случае [131] используются полиномы третьего порядка. Коэффициенты полиномов определяются как минимум по 7 опорным точкам. Исследования точности метода, выполненные по РЛ снимкам м-ба 1 : 250 000 на площади 21,6 тыс. км², показали, что средние квадратические погрешности определения координат объектов местности составляют около 150 м.

Недостатками этих аналитических методов, на наш взгляд,

являются приближенное решение задачи в первом методе и слишком большое количество требуемых опорных точек во втором методе. Кроме того, точность этих методов несмотря на то, что в обоих случаях использовались снимки одного масштаба, колеблется в очень широких пределах, что не позволяет составить окончательного суждения о возможной точности определения координат объектов местности по РЛ снимкам.

В течение нескольких последних лет большое внимание стали уделять способам получения стереоскопических РЛ изображений местности и методам их фотограмметрической обработки [108, 141, 142, 158]. В результате создана экспериментальная программа обработки пары РЛ снимков на стереоплоттере AS-11A. Программа учитывает систематические деформации модели, вызванные угловыми и линейными эволюциями носителя, а также некомпенсированными источниками геометрических искажений модели [178].

В последнем случае при помощи полиномов третьего порядка по специальным меткам, сформированным на изображении, вводят поправки в измеренные координаты точек модели.

Точность программы исследована по макетным и реальным РЛ снимкам м-ба 1 : 200 000. Сделана попытка составить участок карты в м-бе 1 : 24 000 с сечением горизонталей 30 м. Однако полученных данных оказалось недостаточно для оценки точности метода.

За рубежом для аналитической обработки РЛ снимков, наряду с использованием обычных приборов, таких, как монокомпараторы и стереокомпараторы [68], создан ряд специальных приборов. Для автоматизированного определения координат объектов и переноса их со снимка на карту в США разработаны приборы LR-1 и LR-2 [135, 147]. По данным американской печати, прибор LR-1 обеспечивает проектирование радиолокационных кадровых, панорамных и других снимков на топографическую карту в короткие сроки и с необходимой точностью. Проектирование осуществляется аналитическим способом с использованием электронного вычислительного устройства аналогового типа по элементам внешнего ориентирования или по опорным точкам, опознанным на снимке и карте. В приборе используются микроэлектронные аналоговые счетно-решающие устройства. Масштаб выходной информации может изменяться от 0,5 до 10. Вспомогательная информация (элементы внешнего и внутреннего ориентирования снимка и другие параметры) вводится вручную оператором. Все преобразования производятся автоматически. Оператор обводит маркой объект или контур на снимке, одновременно выходное устройство вычерчивает их трансформированное положение на карте. При обработке снимков, получаемых радиолокационными станциями бокового обзора, изменяется только масштаб изображения (одинаково по обеим осям).

Последующие разработки показали, что использование цифровой вычислительной техники имеет большие преимущества, чем аналоговая вычислительная техника, использованная в приборе LR-1. Преимущества цифрового решения состоят в повышении точности всей системы, использовании большего диапазона параметров устройства ввода и улучшения удобства работы оператора. Исходя из этих преимуществ, в 1970 г. фирмой Bendix был разработан новый цифровой прибор LR-2.

LR-2 так же, как и LR-1, обеспечивает проектирование радиолокационных, кадровых, перспективных, панорамных, инфракрасных снимков на топографическую карту. Прибор состоит из трех блоков: блока ввода, ЭВМ и координатографа.

Блок ввода содержит просветный стол, кодирующее устройство для преобразования измеренных координат точек снимка в цифровую форму, пульт ввода и систему индикации.

Кодирующее устройство представляет собой полностью электронную систему, основанную на принципе «светового пера», что позволило заменить громоздкие рычаги, использованные в приборе LR-1, и тем самым повысить точность измерений до 0,05 мм. На пульте блока ввода оператор нажатием клавишей устанавливает данные, касающиеся типа бортовой аппаратуры, а также параметры съемки. Система индикации отображает вычисленные координаты объекта и расстояния между двумя любыми точками местности на световом табло в десятичном виде.

ЭВМ представляет собой специализированный процессор для решения тригонометрических зависимостей, умножения, деления и преобразования чисел из двоично-десятичного кода в двоичный и обратно. Разрядная сетка ЭВМ составляет 24 разряда двоичного кода. Это обеспечивает трансформирование снимка с точностью, которая приблизительно на порядок выше, чем точность вводимых данных. Использование твердых интегральных схем позволило получить минимальный объем и массу ЭВМ.

Координатограф представляет собой автоматизированный электронный прибор с размером рабочей поверхности 560 × 560 мм, управляемый ЭВМ. Он состоит из двух точных шаровых гаек, смещаемых винтами, вращаемыми электромоторами, находящимися на концах двух кареток и карандашного устройства, управляемого ножной педалью. Может работать в двух режимах: режиме «Zero», отслеживая на карте отдельные объекты, и в режиме «Origate», вычерчивая контуры на карте по данным трансформирования со скоростью 12,7 мм/с. Средняя квадратическая погрешность переноса контуров на карту составляет 0,25 мм.

Наряду с созданием универсальных приборов, позволяющих определять координаты объектов по радиолокационным, пла-

новым, перспективным, панорамным и т. д. снимкам, созданы специализированные приборы для определения координат объектов только по РЛ снимкам. Типичным примером таких приборов является вычислительное устройство Fieldata [143].

Вычислительное устройство Fieldata предназначено для определения координат объектов по паре перекрывающихся радиолокационных снимков с навигационными и радиолокационными данными. Прибор состоит из измерительного устройства и восстановителя, преобразовывающего наклонные дальности в горизонтальные. Восстановитель использует данные, полученные в виде перфоленты с вычислительного устройства, и может работать автоматически, полуавтоматически и при ручном управлении.

В США для дешифрирования и определения координат объектов по радиолокационным, плановым, перспективным, панорамным аэрофотоснимкам и инфракрасным аэроснимкам используется автоматизированная лаборатория AN/TSQ-43 [118]. Она обеспечивает автоматизированное измерение координат точек снимка и перевычисление их в геодезическую систему координат с учетом элементов внешнего ориентирования, зафиксированных в полете, и вида проекции обрабатываемого изображения.

В комплект лаборатории наряду с другими приборами входят наблюдательно-вычислительное устройство и ЭВМ «М-18». Наблюдательно-вычислительное устройство предназначено для просмотра снимков и производства на них измерений. Оно состоит из двух просмотровых окон для фильмов шириной от 70 до 241 мм и длиной до 152 м и бинокулярного микроскопа, являющегося частью измерительной системы. Измерительная система устройства состоит из двух ходовых винтов и кодирующего блока, который преобразует смещение ходового винта из аналоговой формы в цифровую для ввода в ЭВМ. Точность измерений составляет 25 мкм. ЭВМ «М-18» предназначена для определения координат объектов как в системе географических координат, так и в системе прямоугольных координат универсальной поперечной проекции Меркатора, а также для определения расстояния между объектами на местности. Вычисление производится путем ручного ввода с пульта ЭВМ оператором наблюдательно-вычислительного устройства следующих параметров:

- высоты полета самолета;
- углов наклона бортовой аппаратуры;
- типа бортовой аппаратуры;
- специальных параметров бортовой аппаратуры.

ЭВМ компенсирует искажения радиолокационных и инфракрасных снимков, а также перспективные и панорамные искажения аэрофотоснимков.

В целом проблема определения координат объектов местности по РЛ снимкам находится еще в начальной стадии изучения и темпы ее развития значительно отстают от темпов развития бортовой аппаратуры. Поэтому в настоящее время разработка методов фотограмметрической обработки РЛ снимков является весьма актуальной задачей.

§ 24. Аналитический метод определения координат объектов по одиночному РЛ снимку

при съемке с малых высот

Назначение и сущность метода

Рассматриваемый ниже метод предназначен для определения координат объектов местности при съемке с малых высот полета носителя, когда влиянием кривизны Земли и атмосферной рефракции радиоволн на точность определения координат можно пренебречь.

Для решения задачи необходимо знать следующие исходные данные, приведенные в табл. 34

Таблица 34

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наименование исходных данных	Обозначение	Наименование исходных данных	Обозначение
Навигационные параметры, соответствующие центру условного кадра:		Элементы ориентирования снимка:	
— географическая широта носителя	$\overset{\circ}{\varphi}_s$	— наклонная дальность	R_0
— географическая долгота носителя	$\overset{\circ}{\lambda}_s$	— калибровочные наклонные дальности	R_1, \dots, R_i
— высота полета носителя	$\overset{\circ}{H}$	Постоянные параметры РЛС:	
— истинный текущий курс носителя	$\overset{\circ}{A}$	— знаменатель масштаба записи изображения по дальности	$\dot{M}_u = \frac{c \cdot k}{2V_{py}}$
Элементы ориентирования антенны:			или $\dot{M}_y = \frac{c \cdot k}{2V_{py}} r_y$
— постоянный угол отворота антенны по курсу	ψ_{const}	— знаменатель масштаба записи изображения по азимуту	\dot{M}_x
— постоянный угол наклона антенны по тангажу	ϑ_{const}	Признак обзора	
		— левосторонний	+
		— правосторонний	-

Примечание. Параметры \dot{R}_0 и \dot{M}_y необходимы только при отсутствии калибровочных меток дальностей.

Кроме того, в наличии должны быть топографические карты на район съемки.

Сущность данного метода заключается в следующем:

а) по навигационным параметрам, зафиксированным в поле-те, вычисляем координаты опорных точек, предварительно опознанных на снимке и топографической карте;

б) по расхождениям вычисленных и снятых с карты координат опорных точек составляем уравнения поправок, решив которые под условием $[vv] = \min$, определим исправленные значения навигационных параметров, элементов ориентирования снимков и постоянных параметров РЛС;

в) по исправленным значениям навигационных данных, элементов ориентирования снимков и постоянных параметров РЛС вычисляем значение координат искомых объектов.

Порядок вычислений с использованием ЭВМ показан в виде блок-схемы на рис. 57.

Определение плоских координат объекта по навигационным данным

С помощью любого измерительного прибора типа монокомпаратора измерим координаты объекта на снимке. При этом в зависимости от того, имеются ли на снимке калибровочные метки дальности или нет, последовательность операций будет различна.

При отсутствии на снимке калибровочных меток дальности или при наличии одной метки измерения выполним относительно края снимка или этой метки и метки ориентирования матрицы, определяющей центр условного кадра. Для этого в строгой последовательности наведем визирное устройство измерительного прибора на следующие точки снимка (рис. 58, а, б):

— точка 1 — метка, определяющая центр условного кадра ($x_{п.ц}$, $y_{п.ц}$);

— точка 2 — произвольная точка, находящаяся на краю снимка или на калибровочной метке дальности ($x_{п.2}$, $y_{п.2}$);

— точка 3 — произвольная точка, находящаяся на том же краю снимка или на той же калибровочной метке, на некотором расстоянии от точки 2 в сторону полета носителя ($x_{п.3}$, $y_{п.3}$);

— «Объект» — ($x_{п.об}$, $y_{п.об}$).

При наличии на снимке серии калибровочных меток дальности, также в строгой последовательности, наведем визирное устройство на следующие точки снимка (рис. 59, а, б):

— точка 1 — метка, определяющая центр условного кадра ($x_{п.ц}$, $y_{п.ц}$);

— точка 2 — произвольная точка, находящаяся на первой калибровочной метке дальности (R_1), имеющей минимальное значение дальности ($x_{п.2}$, $y_{п.2}$);

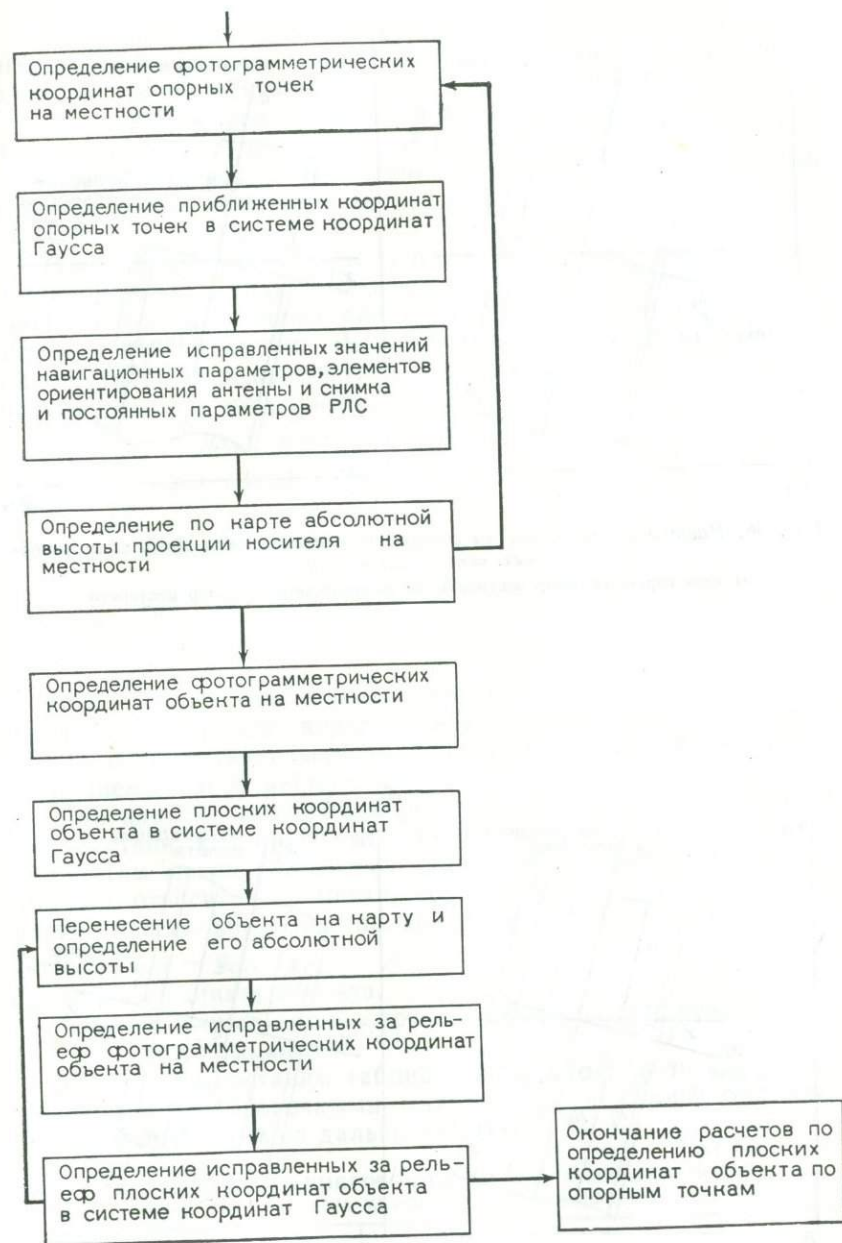
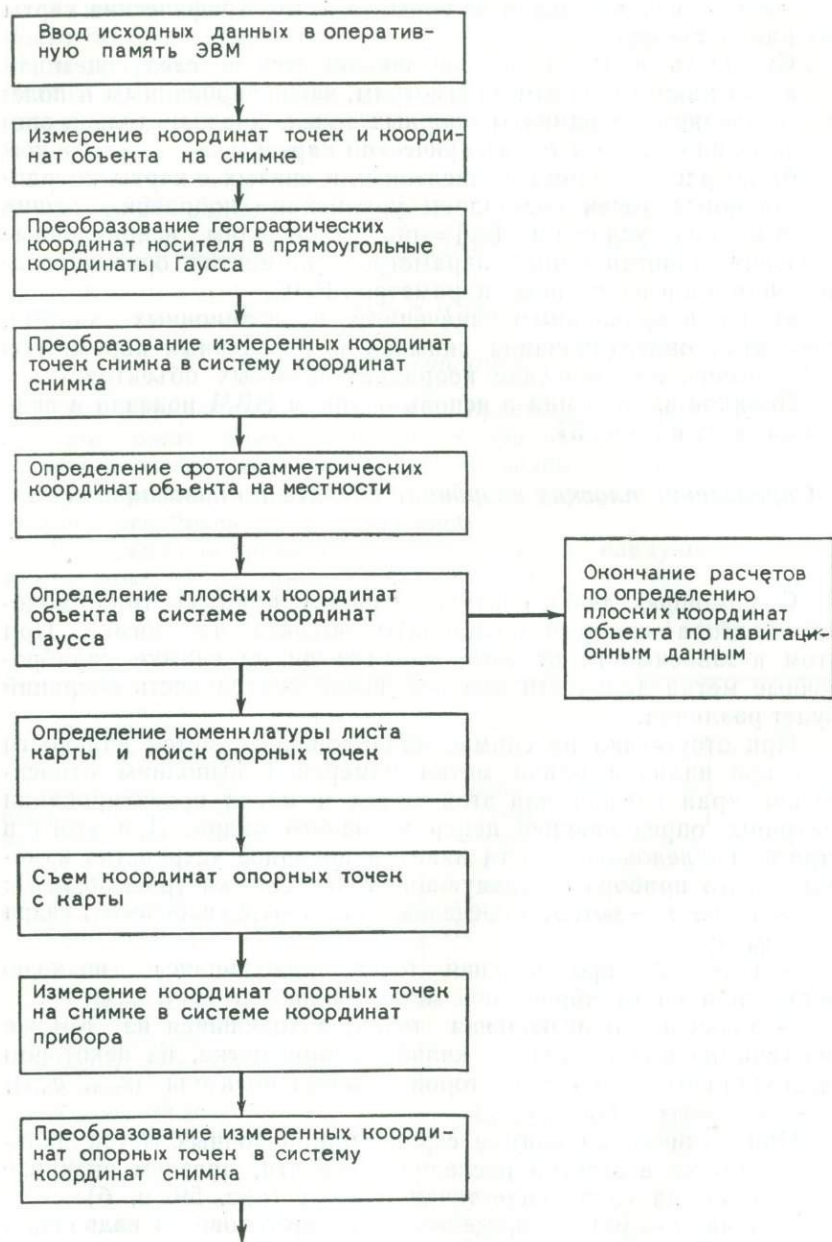


Рис. 57. Блок-схема аналитического метода определения координат объектов при съемке с малых высот

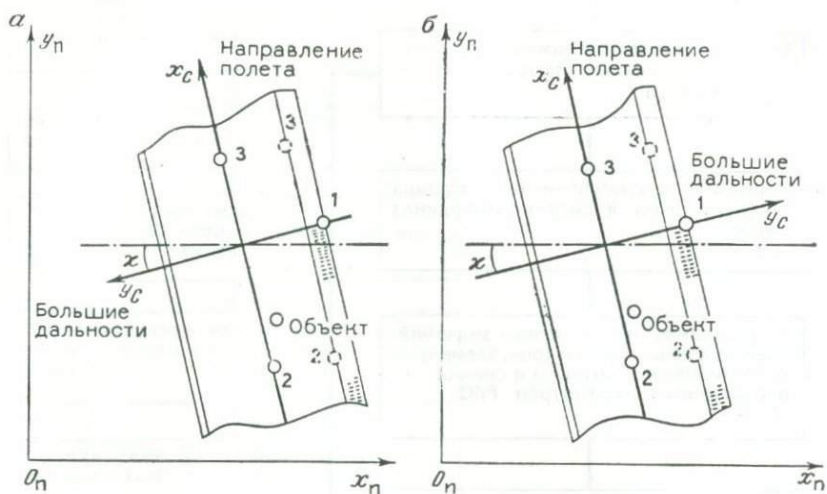


Рис. 58. Расположение точек на снимке при отсутствии серии калибровочных меток дальности:

а) левосторонний обзор местности, б) правосторонний обзор местности

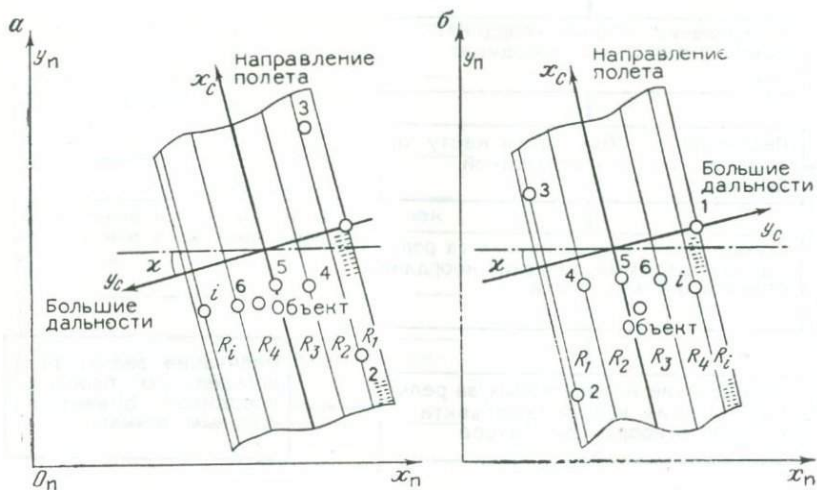


Рис. 59. Расположение точек на снимке при наличии серии калибровочных меток дальности:

а — левосторонний обзор местности, о — правосторонний обзор местности

— точка 3 — произвольная точка, находящаяся на той же калибровочной метке на некотором расстоянии от точки 2 в сторону полета носителя ($x_{п.3}$, $y_{п.3}$);

— точка 4 — произвольная точка, находящаяся на второй калибровочной метке дальности (R_2), ($x_{п.4}$, $y_{п.4}$);

— точка i — произвольная точка, находящаяся на i -ой калибровочной метке дальности (R_i), ($x_{п.i}$, $y_{п.i}$);

— «Объект» — ($x_{п.об}$, $y_{п.об}$).

Измеренные координаты точек снимка преобразуем в систему координат снимка в соответствии с формулами (III.21) и (III.22) и построениями рис. 58 и 59. При этом ввиду отсутствия в существующих РЛС двух меток, расположенных на одной строке, определить угол θ не представляется возможным, поэтому примем его равным нулю. Тогда

$$\left. \begin{aligned} x_{с.i} &= (y_{п.i} - y_{п.ц}) \cdot \cos \alpha - (x_{п.i} - x_{п.ц}) \cdot \sin \alpha \\ y_{с.i} &= \mp [(y_{п.i} - y_{п.ц}) \cdot \sin \alpha + (x_{п.i} - x_{п.ц}) \cdot \cos \alpha] \end{aligned} \right\} \quad (VI.1)$$

где

$$\sin \alpha = \frac{x_{п.2} - x_{п.3}}{l_{2-3}},$$

$$\cos \alpha = \frac{y_{п.3} - y_{п.2}}{l_{2-3}},$$

$$l_{2-3} = [(x_{п.2} - x_{п.3})^2 + (y_{п.3} - y_{п.2})^2]^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь, как и прежде, верхний знак перед скобками в формуле (VI.1) соответствует левостороннему, а нижний знак — правостороннему обзору местности.

При наличии серии калибровочных меток составим таблицу соответствия калибровочных значений наклонных дальностей ординатам меток дальностей (табл. 35) и вычислим ординату объекта относительно метки, соответствующей меньшей дальности, между которыми находится изображение объекта,

$$y_{об} = y_{с.об} - y_{с.i}, \quad (VI.2)$$

где $y_{с.об}$ — ордината объекта,

$y_{с.i}$ — ордината калибровочной метки, соответствующей меньшей дальности.

Кроме того, составим таблицу соответствия разностей между соседними калибровочными дальностями и ординатами соответствующих им меток дальностей (табл. 36).

Таблица 35
СООТВЕТСТВИЕ КАЛИБРОВОЧНЫХ НАКЛОННЫХ ДАЛЬНОСТЕЙ
ОРДИНАТАМ МЕТОК ЭТИХ ДАЛЬНОСТЕЙ

R_1	R_2	R_3	...	R_i
$y_{с.2}$	$y_{с.4}$	$y_{с.5}$...	$y_{с.(i+2)}$

СООТВЕТСТВИЕ РАЗНОСТЕЙ
МЕЖДУ СОСЕДНИМИ КАЛИБРОВОЧНЫМИ ДАЛЬНОСТЯМИ И ОРДИНАТАМИ
СООТВЕТСТВУЮЩИХ ИМ МЕТОК ДАЛЬНОСТЕЙ

$$\Delta R_1 = R_2 - R_1 \quad \Delta R_2 = R_3 - R_2 \quad \Delta R_3 = R_4 - R_3 \quad \dots \quad \Delta R_i = R_{i+1} - R_i$$

$$\begin{array}{ccccccc} \Delta y_1 = y_{c.4} - & \Delta y_2 = y_{c.5} - & \Delta y_3 = y_{c.5} - & \dots & \Delta y_i = y_{c.(i+3)} - \\ -y_{c.2} & -y_{c.4} & -y_{c.5} & & -y_{c.(i+2)} \end{array}$$

После этого вычислим наклонную дальность до объекта.

При отсутствии калибровочных меток в соответствии с формулой (III.23) будем иметь

$$R_{об} = M_y \cdot y_{c.об} + R_0. \quad (VI.3)$$

При наличии серии калибровочных меток представляется возможность вычислить наклонную дальность до объекта местности, исправленную за нелинейность строчной развертки. В этом случае, допуская, что изображение между двумя соседними калибровочными метками деформировано по линейному закону, получаем

$$R_{об} = \frac{\Delta R_i}{\Delta y_i} y_{об} + R_i, \quad (VI.4)$$

где ΔR_i , Δy_i — величины, выбираемые из табл. 36,

R_i — значение меньшей из калибровочных дальностей, между которыми находится объект.

Если объект находится на краю снимка, для вычисления $R_{об}$ используем две ближайшие калибровочные дальности. Вычислив $R_{об}$, определим фотограмметрические координаты объекта на местности. Для этого запишем формулы (IV.19) в следующем виде

$$\left. \begin{array}{l} X_{\phi.об}^H = M_x \cdot x_{c.об} \pm \sin \psi_{const} \sqrt{R_{об}^2 - (h - H)^2 \cdot \sec^2 \vartheta_{const}} - \\ - (h - H) \cdot \cos \psi_{const} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_{const} \\ Y_{\phi.об}^H = \pm \cos \psi_{const} \sqrt{R_{об}^2 - (h - H)^2 \cdot \sec^2 \vartheta_{const}} + (h - H) \times \\ \times \sin \psi_{const} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_{const} + Y_s^0 \end{array} \right\} \quad (VI.5)$$

В данном случае примем $Y_s^0 = h = 0$.

Преобразуем зафиксированные в полете географические координаты φ_s , λ_s носителя, соответствующие центру условного кадра, в прямоугольные координаты Гаусса по следующим известным [68] формулам:

$$X_{r,s}^0 = \varphi_M + \frac{l^2 \cdot N \cdot \sin^0 \varphi_S \cos^0 \varphi_S}{2} \left\{ 1 + \frac{l^2 \cdot \cos^2 \varphi_S}{12} [5 - l^2 + \right.$$

$$\left. + \eta^2 (9 + 4\eta^2)] \right\},$$

$$Y_{r,s}^0 = 500\,000 + l \cdot N \cdot \cos^0 \varphi_S \left[1 + \frac{l^2 \cdot \cos^2 \varphi_S}{6} (1 - l^2 + \eta^2) \right],$$

$$\text{где } \varphi_M^0 = 6367558,5 \cdot \varphi_S^0 - 16036,5 \cdot \sin^0 2\varphi_S + 16,83 \cdot \sin^0 4\varphi_S,$$

$$l = \operatorname{tg} \varphi_S,$$

$$\eta^2 = e^{l^2} \cdot \cos^2 \varphi_S,$$

N — радиус кривизны первого вертикала, вычисляемый по формуле

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi_S)^{\frac{1}{2}}}; \quad l = (\lambda_S^0 - \lambda_{oc}^0),$$

λ_{oc} — долгота осевого меридиана зоны, вычисляемая по формулам

$$\text{— при } \lambda_S^0 \geq 0 \quad \lambda_{oc} = 6^\circ \cdot N_{3,B} - 3^\circ,$$

$$\text{— при } \lambda_S^0 < 0 \quad \lambda_{oc} = 6^\circ \cdot N_{3,3} + 3^\circ,$$

$N_{3,B}$, $N_{3,3}$ — номер зоны, отсчитываемый к востоку или западу от Гринвичского меридиана:

$$\text{— при } \lambda_S^0 \geq 0 \quad N_{3,B} = \left[\frac{\lambda_S^0}{6^\circ} \right]^* + 1,$$

$$\text{— при } \lambda_S^0 < 0 \quad N_{3,3} = \left[\frac{\lambda_S^0}{6^\circ} \right]^* - 1,$$

$\left[\frac{\lambda_S^0}{6^\circ} \right]^*$ — целая часть выражения, полученная от деления долготы носителя на долготу зоны, равную 6° .

В соответствии с формулами преобразования координат на плоскости и найденными значениями $X_{r,s}^0$, $Y_{r,s}^0$, $X_{\phi,об}^H$, $Y_{\phi,об}^H$ определяем координаты объекта на местности в системе координат Гаусса

$$\left. \begin{aligned} X_{r,об}^H &= X_{r,s}^0 + X_{\phi,об}^H \cdot \cos A + Y_{\phi,об}^H \cdot \sin A \\ Y_{r,об}^0 &= Y_{r,s,п}^0 + X_{\phi,об}^H \cdot \sin A - Y_{\phi,об}^H \cdot \cos A \end{aligned} \right\}. \quad (\text{VI.6})$$

Здесь $Y_{r,s,п}^0 = N_{3,B} \cdot 10^6 + Y_{r,s}^0$ при $\lambda_S^0 \geq 0$,

$Y_{r,s,п}^0 = (61 + N_{3,3}) \cdot 10^6 + Y_{r,s}^0$ при $\lambda_S^0 < 0$.

Определение номенклатуры листа карты

При использовании в качестве исходной плановой основы топографической карты целесообразно с целью сокращения времени, необходимого на подбор карты, определить номенклатуру листа карты, соответствующую местоположению носителя.

Для определения номенклатуры листа карты используем географические координаты φ_S , λ_S носителя. При этом номенклатуру будем определять только для карт масштабов 1:25 000 и 1:200 000, так как по номенклатуре листа карты м-ба 1:25 000 несложно установить номенклатуру топографической карты любого другого масштаба (рис. 60), а карта м-ба 1:200 000 является наиболее мелкомасштабной топографической картой, на которой еще возможно проводить измерительные работы.

Известно, что номенклатура листа карты м-ба 1:25 000 состоит из:

- номера географического пояса, выраженного заглавными буквами латинского алфавита,
- номера листа карты м-ба 1:1 000 000, выраженного арабскими цифрами,
- номера листа карты м-ба 1:100 000, также выраженного арабскими цифрами,
- номера листа карты м-ба 1:50 000, выраженного заглавными буквами русского алфавита,
- номера листа карты м-ба 1:25 000, выраженного прописными буквами русского алфавита.

Номенклатура листа карты м-ба 1:200 000 состоит из:

- номера географического пояса, выраженного заглавными буквами латинского алфавита,
- номера листа карты м-ба 1:1 000 000, выраженного арабскими цифрами,
- номера листа карты м-ба 1:200 000, выраженного римскими цифрами.

Так как географические пояса отсчитываются через 4° к северу и к югу от экватора, номер географического пояса можно вычислить по следующей формуле:

$$C_1 = \left[\frac{\varphi_S}{14\,000''} \right]^*$$

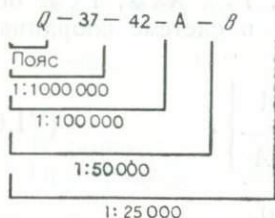


Рис. 60. Номенклатура топографических карт

где $[]^*$ — целое положительное число, соответствующее номеру пояса.

Для выражения номера пояса буквами латинского алфавита произведем сравнение числа C_1 с данными табл. 37.

Номер листа карты м-ба 1:1 000 000 определим по географической долготе носителя. При этом примем во внимание, что

Таблица 37

ВЫРАЖЕНИЕ НОМЕРА ПОЯСА БУКВАМИ ЛАТИНСКОГО АЛФАВИТА

C_1	Номер географического пояса	C_1	Номер географического пояса	C_1	Номер географического пояса	C_1	Номер географического пояса
0	A	6	G	11	L	17	R
1	B	7	H	12	M	18	S
2	C	8	I	13	N	19	T
3	D	9	J	14	O	20	U
4	E	10	K	15	P	21	V
5	F			16	Q		

размер стороны этого листа по долготе равен 6° . Тогда для восточного полушария при $\lambda_S \geq 0$ получим $N_1 = C_2 + 31$, а для западного полушария, при $\lambda_S < 0$ будем иметь

$$N_1 = 30 - C_2,$$

где

$$C_2 = \left[\frac{\lambda_S^0}{21\,600''} \right]^*$$

N_1 — номер листа карты м-ба 1 : 1 000 000.

Номер листа карты м-ба 1 : 100 000 определим в соответствии с принятым делением листа карты м-ба 1 : 1 000 000 на 144 листа карты м-ба 1 : 100 000. Тогда

$$\text{— при } \varphi_S \geq 0, \lambda_S \geq 0 \quad N_2 = 133 - 12 \cdot C_3 + C_4,$$

$$\text{— при } \varphi_S \geq 0, \lambda_S < 0 \quad N_2 = 144 - 12 \cdot C_3 - C_4,$$

$$\text{— при } \varphi_S < 0, \lambda_S \geq 0 \quad N_2 = 1 + 12 \cdot C_3 + C_4,$$

$$\text{— при } \varphi_S < 0, \lambda_S < 0 \quad N_2 = 12 + 12 \cdot C_3 - C_4,$$

где

$$C_3 = \left[\frac{|\varphi_S^0| - C_1 \cdot 14\,400''}{1\,200''} \right]^* = \left[\frac{A_1}{1\,200''} \right]^*,$$

$$C_4 = \left[\frac{|\lambda_S^0| - C_2 \cdot 21\,600''}{1\,800''} \right]^* = \left[\frac{B_1}{1\,800''} \right]^*,$$

N_2 — номер листа карты м-ба 1 : 100 000.

Номер листа карты м-ба 1 : 50 000 найдем как результат деления листа карты м-ба 1 : 100 000 на четыре листа карты м-ба 1 : 50 000. Тогда

$$\text{— при } \varphi_S \geq 0, \lambda_S \geq 0 \quad N_3 = 3 - 2 \cdot C_5 + C_6,$$

$$\text{— при } \varphi_S^0 \geq 0, \lambda_S^0 < 0 \quad N_3 = 4 - 2 \cdot C_5 - C_6,$$

$$\text{— при } \varphi_S^0 < 0, \lambda_S^0 \geq 0 \quad N_3 = 1 + 2 \cdot C_5 + C_6,$$

$$\text{— при } \varphi_S^0 < 0, \lambda_S^0 < 0 \quad N_3 = 2 + 2 \cdot C_5 - C_6,$$

где

$$C_5 = \left[\frac{A_1 - C_3 \cdot 1200''}{600''} \right]^* = \left[\frac{A_2}{600''} \right]^*,$$

$$C_6 = \left[\frac{B_1 - C_4 \cdot 1800''}{900''} \right]^* = \left[\frac{B_2}{900''} \right]^*,$$

N_3 — номер листа карты м-ба 1:50 000.

Полученное число N_3 выразим заглавными буквами русского алфавита, сравнив его с данными табл. 38.

Номер листа карты м-ба 1:25 000 получим в соответствии с принятым делением листа карты м-ба 1:50 000 на четыре листа карты м-ба 1:25 000. Тогда

$$\text{— при } \varphi_S^0 \geq 0, \lambda_S^0 \geq 0 \quad N_4 = 3 - 2 \cdot C_7 + C_8,$$

$$\text{— при } \varphi_S^0 \geq 0, \lambda_S^0 < 0 \quad N_4 = 4 - 2 \cdot C_7 - C_8,$$

$$\text{— при } \varphi_S^0 \geq 0, \lambda_S^0 \geq 0 \quad N_4 = 1 + 2 \cdot C_7 + C_8,$$

$$\text{— при } \varphi_S^0 < 0, \lambda_S^0 < 0 \quad N_4 = 2 + 2 \cdot C_7 + C_8,$$

где

$$C_7 = \left[\frac{A_2 - C_5 \cdot 600''}{300''} \right]^*,$$

$$C_8 = \left[\frac{B_2 - C_6 \cdot 900''}{450''} \right]^*,$$

N_4 — номер листа карты м-ба 1:25 000.

Величину N_4 сравним с прописными буквами русского алфавита (табл. 39).

Таблица 38

ВЫРАЖЕНИЕ НОМЕРА ЛИСТА КАРТЫ
МАСШТАБА 1:50 000
БУКВАМИ РУССКОГО АЛФАВИТА

N_3	Номер листа карты масштаба 1:50 000
1	А
2	Б
3	В
4	Г

Таблица 39

ВЫРАЖЕНИЕ НОМЕРА ЛИСТА КАРТЫ
МАСШТАБА 1:25 000
БУКВАМИ РУССКОГО АЛФАВИТА

N_4	Номер листа карты масштаба 1:25 000
1	а
2	б
3	в
4	г

ВЫРАЖЕНИЕ НОМЕРА ЛИСТА КАРТЫ М-БА 1:200 000 РИМСКИМИ ЦИФРАМИ

N_5	Номер листа карты м-ба 1:200000	N_5	Номер листа карты м-ба 1:200000	N_5	Номер листа карты м-ба 1:200000	N_5	Номер листа карты м-ба 1:200000
1	I	10	X	19	XIX	28	XXVIII
2	II	11	XI	20	XX	29	XXIX
3	III	12	XII	21	XXI	30	XXX
4	IV	13	XIII	22	XXII	31	XXXI
5	V	14	XIV	23	XXIII	32	XXXII
6	VI	15	XV	24	XXIV	33	XXXIII
7	VII	16	XVI	25	XXV	34	XXXIV
8	VIII	17	XVII	26	XXVI	35	XXXV
9	IX	18	XVIII	27	XXVII	36	XXXVI

Листы карты м-ба 1 : 200 000 получаются в результате деления листа карты м-ба 1 : 1 000 000 на 36 частей. Поэтому номер этого листа можно вычислить по следующим формулам

$$- \text{при } \varphi_S \geq 0, \lambda_S \geq 0 \quad N_5 = 31 - 6 \cdot C_9 + C_{10},$$

$$- \text{при } \varphi_S \geq 0, \lambda_S < 0 \quad N_5 = 36 - 6 \cdot C_9 + C_{10},$$

$$- \text{при } \varphi_S < 0, \lambda_S \geq 0 \quad N_5 = 1 + 6 \cdot C_9 + C_{10},$$

$$- \text{при } \varphi_S < 0, \lambda_S < 0 \quad N_5 = 6 + 6 \cdot C_9 + C_{10},$$

где

$$C_9 = \left[\frac{A_1}{2 \cdot 400''} \right]^*,$$

$$C_{10} = \left[\frac{B_1}{3 \cdot 600''} \right]^*,$$

N_5 — номер листа карты м-ба 1 : 200 000.

Для выражения величины N_5 римскими цифрами, сравним ее с данными табл. 40.

Полную номенклатуру листа карты м-ба 1 : 200 000 получим путем присоединения N_5 к номеру географического пояса и номеру листа карты м-ба 1 : 1 000 000.

По вычисленной номенклатуре выберем соответствующий лист топографической карты. Затем, используя координаты

$X_{г.с.}^0, Y_{г.с.}^0$ и $X_{г.об.}^H, Y_{г.об.}^H$, нанесем на карту местоположение носителя и объекта. По истинному курсу носителя приближенно ориентируем карту относительно кадра фильма. Сличим изображение на снимке с участком карты, соответствующим местоположению носителя и объекта, и идентифицируем опорные точки.

Как будет показано ниже, в том случае, когда на снимке отсутствуют калибровочные метки дальности, количество опорных точек не должно быть меньше пяти, а при наличии на

снимке серии калибровочных меток дальности — меньше четырех.

В качестве опорных точек выберем точки, надежно опознаваемые на снимке и карте и не меняющие своего положения на местности с течением времени.

При выборе опорных точек будем стремиться к тому, чтобы они располагались возможно ближе к определяемому объекту, а при решении задачи по трем опорным точкам — не были бы расположены на одной прямой.

При решении задачи по двум опорным точкам, последние будем выбирать так, чтобы они располагались вдоль линии полета носителя.

Съем координат опорных точек с карты

Развитие автоматизированных приборов, предназначенных для съема и последующего ввода в ЭВМ графической информации [66] (графоввод, графический дисплей, координатограф и т. д.), позволяет частично автоматизировать процесс съема координат опорных точек с карты. Использование этих приборов способствует сокращению времени и уменьшению количества погрешностей, допускаемых фотограмметристом при обычном способе съема координат опорных точек с помощью измерителя или координатомера.

При наличии автоматизированных приборов, грубо ориентируем топографическую карту так, чтобы северная рамка карты была направлена в сторону оси y_k измерительного прибора (рис. 61). В центре листа карты выберем точку H , лежащую на пересечении линий километровой сетки, и по оцифровке километровой сетки определим координаты X_H, Y_H этой точки в системе координат Гаусса. Кроме того, снимем значение знаменателя масштаба карты M_k и абсолютные высоты опорных точек $A_{оп.т.i}$.

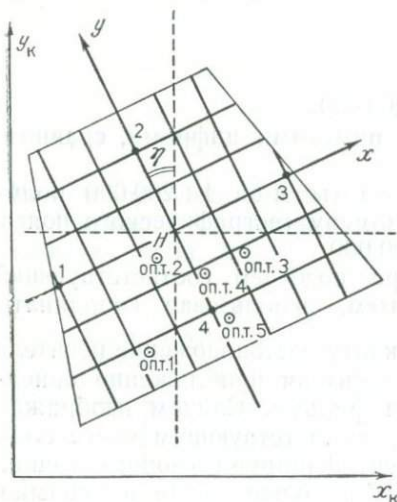


Рис. 61. Расположение карты в измерительном приборе

На карте, грубо ориентированной относительно системы координат измерительного прибора, измерим координаты точки H , координаты четырех ориентирных точек, расположенных по краям карты на пересечении линий километровой сетки, и координаты каждой опорной точки.

В том случае, когда опорные точки расположены на нескольких листах карт, то на каждом листе выберем свою начальную точку H , считаем ее координаты, знаменатель масштаба и абсолютные высоты опорных точек, а также измерим координаты ориентирных и опорных точек.

В соответствии с построениями рис. 61 определим угол разворота километровой сетки карты относительно системы координат измерительного прибора

$$\cos \eta = \frac{1}{2} \left[\frac{x_{к.3} - x_{к.1}}{l_{к.1-3}} + \frac{y_{к.2} - y_{к.4}}{l_{к.2-4}} \right],$$

$$\sin \eta = \frac{1}{2} \left[\frac{y_{к.3} - y_{к.1}}{l_{к.1-3}} + \frac{x_{к.4} - x_{к.2}}{l_{к.2-4}} \right],$$

где

$$l_{к.1-3} = \left| \sqrt{(x_{к.3} - x_{к.1})^2 + (y_{к.3} - y_{к.1})^2} \right|,$$

$$l_{к.2-4} = \left| \sqrt{(x_{к.4} - x_{к.2})^2 + (y_{к.2} - y_{к.4})^2} \right|,$$

$x_{к.1}, y_{к.1}, \dots, x_{к.4}, y_{к.4}$ — измеренные координаты ориентирных точек на карте.

Перенесем начало координат измерительного прибора в точку H и повернем систему координат прибора на угол η так, чтобы ось y_k совместилась с осью y карты

$$x'_{к.i} = x_{к.i} - x_{к.H},$$

$$y'_{к.i} = y_{к.i} - y_{к.H},$$

$$x_i = x'_{к.i} \cdot \cos \eta + y'_{к.i} \cdot \sin \eta,$$

$$y_i = -x'_{к.i} \cdot \sin \eta + y'_{к.i} \cdot \cos \eta,$$

где $x_{к.H}, y_{к.H}$ — измеренные координаты точки H карты.

С целью исключения погрешностей, вызванных равномерной деформацией карты, выполним масштабные преобразования координат опорных точек

$$x_{оп.т.i} = x_i \cdot t_x,$$

$$y_{оп.т.i} = y_i \cdot t_y,$$

где

$$t_x = \frac{l'_{к.1-3}}{l_{к.1-3}},$$

$$t_y = \frac{l'_{к.2-4}}{l_{к.2-4}},$$

$$l'_{к.1-3} = \left[\frac{l_{к.1-3} + \frac{\Delta}{2}}{\Delta} \right]^* \cdot \Delta,$$

Таблица 41
РАСТОЯНИЯ
МЕЖДУ КИЛОМЕТРОВЫМИ
ЛИНИЯМИ НА КАРТЕ

M_k	Δ , (мм)
200 000	50
100 000	20
50 000	20
25 000	40

$$l_{k,2-4}' = \left[\frac{l_{k,2-4} + \frac{\Delta}{2}}{\Delta} \right] \cdot \Delta,$$

Δ — расстояние между километровыми линиями на карте.

Для получения значения Δ сравним знаменатель масштаба карты с данными табл. 40.

По известным координатам X_H, Y_H и знаменателю масштаба карты M_k вычислим истинные прямоугольные координаты опор-

ных точек в системе координат Гаусса

$$X_{г.i} = X_H + y_{оп.т.i} \cdot M_k,$$

$$Y_{г.i} = Y_H + x_{оп.т.i} \cdot M_k.$$

Определение плоских координат объекта по опорным точкам

Строго в той же последовательности, что и на карте, измерим координаты опорных точек на снимке. При этом примем необходимые меры к исключению возможных смещений снимка, которые могут иметь место при выполнении операций, следующих за операцией измерения координат объекта.

По формулам (VI.1) преобразуем измеренные координаты опорных точек на снимке в систему координат снимка. В результате получим координаты $x_{с.оп.т.i}$ и $y_{с.оп.т.i}$.

Заменив в формулах (VI.2) — (VI.5) $x_{с.об}$, $y_{с.об}$ и $R_{об}$, соответственно, на $x_{с.об.т.i}$, $y_{с.об.т.i}$, $R_{оп.т.i}$, вычислим фотограмметрические координаты опорных точек. При этом, как и прежде, примем $Y_S^0 = h = 0$.

Затем определим приближенные координаты $X'_{г.оп.т.i}$, $Y'_{г.оп.т.i}$ опорных точек в системе координат Гаусса. Для этого используем формулы (VI.6), заменив в них $X_{ф.об}$, $Y_{ф.об}$ на $X_{ф.оп.т.i}$, $Y_{ф.оп.т.i}$.

Зная истинные координаты $X_{г.i}$, $Y_{г.i}$ опорных точек, найдем величины невязок на каждой опорной точке

$$\left. \begin{aligned} l_{X,i} &= X'_{г.оп.т.i} - X_{г.i} \\ l_{Y,i} &= Y'_{г.оп.т.i} - Y_{г.i} \end{aligned} \right\} \quad (VI.7)$$

По невязкам на опорных точках составим уравнения поправок к неизвестным или приближенно известным навигационным параметрам и элементам ориентирования антенны и снимка

$$\begin{aligned}
 n_{X,i} &= x_{c.оп.т.i} \cdot \cos A \\
 n_{Y,i} &= x_{c.оп.т.i} \cdot \sin A \\
 p_{X,i} &= \sin A \\
 p_{Y,i} &= -\cos A \\
 m_{X,i} &= X_{\phi.M_Y}^* \cdot \cos A + Y_{\phi.M_Y}^* \cdot \sin A \\
 m_{Y,i} &= X_{\phi.M_Y}^* \cdot \sin A - Y_{\phi.M_Y}^* \cdot \cos A
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} n_{X,i} \\ n_{Y,i} \\ p_{X,i} \\ p_{Y,i} \\ m_{X,i} \\ m_{Y,i} \end{aligned}} \right\} \text{(VI.9)}$$

где

$$\begin{aligned}
 X_{\phi.H}^* &= \pm \frac{h-H}{R_r} \cdot \sin \psi \cdot \sec^2 \vartheta + \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta, \\
 Y_{\phi.H}^* &= \pm \frac{h-H}{R_r} \cdot \cos \psi \cdot \sec^2 \vartheta - \sin \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta, \\
 X_{\phi.\vartheta}^* &= \pm \frac{(h-H)^2}{R_r} \cdot \sin \psi \cdot \sec^2 \vartheta \cdot \operatorname{tg} \vartheta - (h-H) \cdot \cos \psi \cdot \sec^2 \vartheta, \\
 Y_{\phi.\vartheta}^* &= \pm \frac{(h-H)^2}{R_r} \cdot \cos \psi \cdot \sec^2 \vartheta \cdot \operatorname{tg} \vartheta + (h-H) \cdot \sin \psi \cdot \sec^2 \vartheta, \\
 X_{\phi.R_0}^* &= \pm \sin \psi \cdot \frac{R_{оп.т.i}}{R_r}, \\
 Y_{\phi.R_0}^* &= \pm \cos \psi \cdot \frac{R_{оп.т.i}}{R_r}, \\
 X_{\phi.M_Y}^* &= \pm \sin \psi \cdot \frac{R_{оп.т.i}}{R_r} \cdot y_{c.оп.т.i}, \\
 Y_{\phi.M_Y}^* &= \pm \cos \psi \cdot \frac{R_{оп.т.i}}{R_r} \cdot y_{c.оп.т.i}, \\
 R_r &= \left| \sqrt{R_{оп.т.i}^2 - (h-H)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} \right|.
 \end{aligned}$$

При наличии серии калибровочных меток необходимость в вычислении поправок к элементам R_0 и M_Y отпадает, поэтому в уравнениях (VI.9) коэффициенты $k_{X,i}$, $k_{Y,i}$, $m_{X,i}$, $m_{Y,i}$ примем равными нулю.

От уравнений поправок перейдем к нормальным уравнениям. Решая нормальные уравнения методом итераций, определим значения поправок к приближенным значениям навигационных параметров, элементам ориентирования антенны и снимка и постоянным параметрам РЛС.

В процессе решения нормальных уравнений после каждого приближения подставим поправки $(X_{r,s})$, $(Y_{r,s})$, ..., (M_Y) в уравнения (VI.9) и вычислим суммарную систематическую невязку C и среднюю квадратическую невязку M

$$\left. \begin{aligned}
 C &= \sum_1^i V_x + \sum_1^i V_y \\
 M &= \sqrt{\frac{\sum_1^i (V_x^2 + V_y^2)}{2i}}
 \end{aligned} \right\} \quad (VI.10)$$

Вычисления продолжим до тех пор, пока разности C и M из « n » и « $n + 1$ » приближений не будут меньше по абсолютному значению установленных допусков

$$|C_{n+1} - C_n| \leq \delta_1,$$

$$|M_{n+1} - M_n| \leq \delta_2.$$

Полученные величины поправок суммируем с приближенными значениями навигационных параметров, элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС и, таким образом, найдем первое приближение этих параметров

$$\left. \begin{aligned}
 X_{r.s}^I &= X_{r.s}^0 + (X_{r.s}^I)^I \\
 Y_{r.s.n}^I &= Y_{r.s.n}^0 + (Y_{r.s}^I)^I \\
 H &= H^0 + (H)^I \\
 A &= A^0 + (A)^I \\
 \psi &= \psi_{const} + (\psi)^I \\
 \vartheta &= \vartheta_{const} + (\vartheta)^I \\
 R_0 &= R_0^0 + (R_0)^I \\
 M_M &= M_M^0 + (M_x)^I \\
 Y_M &= Y_S^0 + (Y_S)^I \\
 M_y &= M_y^0 + (M_y)^I
 \end{aligned} \right\} \quad (VI.11)$$

По координатам $X_{r.s}^I, Y_{r.s}^I$ нанесем на карту точку, соответствующую положению носителя в момент формирования центра условного кадра, и определим ее абсолютную высоту A_S . Для каждой опорной точки вычислим превышения

$$h_i = A_{оп.т.i} - A_S. \quad (VI.12)$$

Затем в формулы (VI.5) вместо $Y_S = h = 0$ подставим Y_S^I и соответствующие значения h_i . Процесс вычисления исправленных значений навигационных параметров, элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС продол-

жим, пользуясь формулами (VI.5) — (VI.12), заменяя в них $\overset{n}{X}_{г.с.}$, $\overset{n}{Y}_{г.с.}$, ..., $\overset{n}{M}_y$ соответственно на $\overset{n+1}{X}_{г.с.}$, $\overset{n+1}{Y}_{г.с.}$, ..., $\overset{n+1}{M}_y$ до тех пор, пока разность остаточных суммарных систематических невязок и разность средних квадратических невязок на опорных точках, полученных в двух последних приближениях, не будут меньше установленных допусков

$$|D_{n+1} - D_n| \leq \delta'_1,$$

$$|E_{n+1} - E_n| \leq \delta'_2,$$

$$D = \sum_1^i l_{X.i} + \sum_1^i l_{Y.i},$$

где

$$E = \sqrt{\frac{\sum_1^i (l_{X.i}^2 + l_{Y.i}^2)}{2i}}.$$

Исправленные значения навигационных параметров, элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС позволяют вычислить по формулам (VI.5) и (VI.6) геодезические координаты объекта местности.

Для этого вначале вычислим приближенные геодезические координаты $\overset{0}{X}_{г.об.}$, $\overset{0}{Y}_{г.об.}$ объекта, приняв в формулах (VI.5) $h = 0$. Затем перенесем на топографическую карту точку с координатами $\overset{0}{X}_{г.об.}$, $\overset{0}{Y}_{г.об.}$ и определим ее абсолютную высоту $A_{об.}$. Вычислив превышение

$$h_{об} = A_{об} - A_s,$$

определим исправленные за рельеф геодезические координаты объекта в системе координат Гаусса.

В холмистых и горных районах организуем итерационный процесс вычисления исправленных за рельеф геодезических координат объекта, в котором после каждой итерации будем определять новое значение $A_{об.}$. Итерационный процесс продолжим до тех пор, пока разность превышений из предыдущего и последующего приближений не будет превышать установленного в § 15 допуска:

$$|h_{об}^{n+1} - h_{об}^n| \leq 50 \text{ м.}$$

С целью проверки правильности определения координат объекта сравним его координаты $X_{г.об.}$, $Y_{г.об.}$, вычисленные по опорным точкам, с его же координатами $\overset{H}{X}_{г.об.}$, $\overset{H}{Y}_{г.об.}$, полученными по навигационным данным,

$$\left[(X_{г.об} - \overset{H}{X}_{г.об})^2 + (Y_{г.об} - \overset{H}{Y}_{г.об})^2 \right]^{1/2} \leq \delta_s,$$

где δ_s — допуск, равный утроенной средней квадратической погрешности определения координат носителя.

Дополнительным контролем правильности определения координат объекта может служить сходимость итерационного процесса. Наличие погрешностей вызовет расхождение итерационного процесса, следствием чего явится бесконечно большое количество приближений или переполнение разрядной сетки ЭВМ.

Рассмотренный метод определения координат объектов может быть использован при наличии на снимке пяти опорных точек, а в случае серии калибровочных меток — четырех опорных точек. Если количество опорных точек на снимке меньше необходимого, найти исправленные значения всех навигационных параметров, элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС не представляется возможным. Поэтому те элементы, которые оказывают наименьшее влияние на точность определения координат объектов, будем считать известными. Такими известными элементами будут:

а) при наличии четырех опорных точек

— боковое уклонение носителя,

— наклонная дальность R_0 ;

б) при наличии трех опорных точек

— боковое уклонение носителя,

— наклонная дальность R_0 ,

— знаменатель масштаба записи изображения вдоль оси

ординат,

— угол наклона антенны по тангажу;

в) при наличии двух опорных точек

— все элементы ориентирования антенны и снимка и постоянные параметры РЛС, за исключением навигационных параметров $X_{г.с}$, $Y_{г.с}$, H и A ;

г) при наличии одной опорной точки

— все навигационные параметры, элементы ориентирования антенны и снимка и постоянные параметры РЛС, за исключением $X_{г.с}$, $Y_{г.с}$.

В этих случаях коэффициенты при известных параметрах в уравнениях поправок (VI.8) примем равными нулю.

§ 25. Аналитический метод определения координат объектов по одиночному РЛ снимку при съемке с больших высот

Особенности метода

Основным отличием данного метода от рассмотренного ранее является то, что в нем учитываются погрешности определения координат, обусловленные влиянием кривизны Земли и

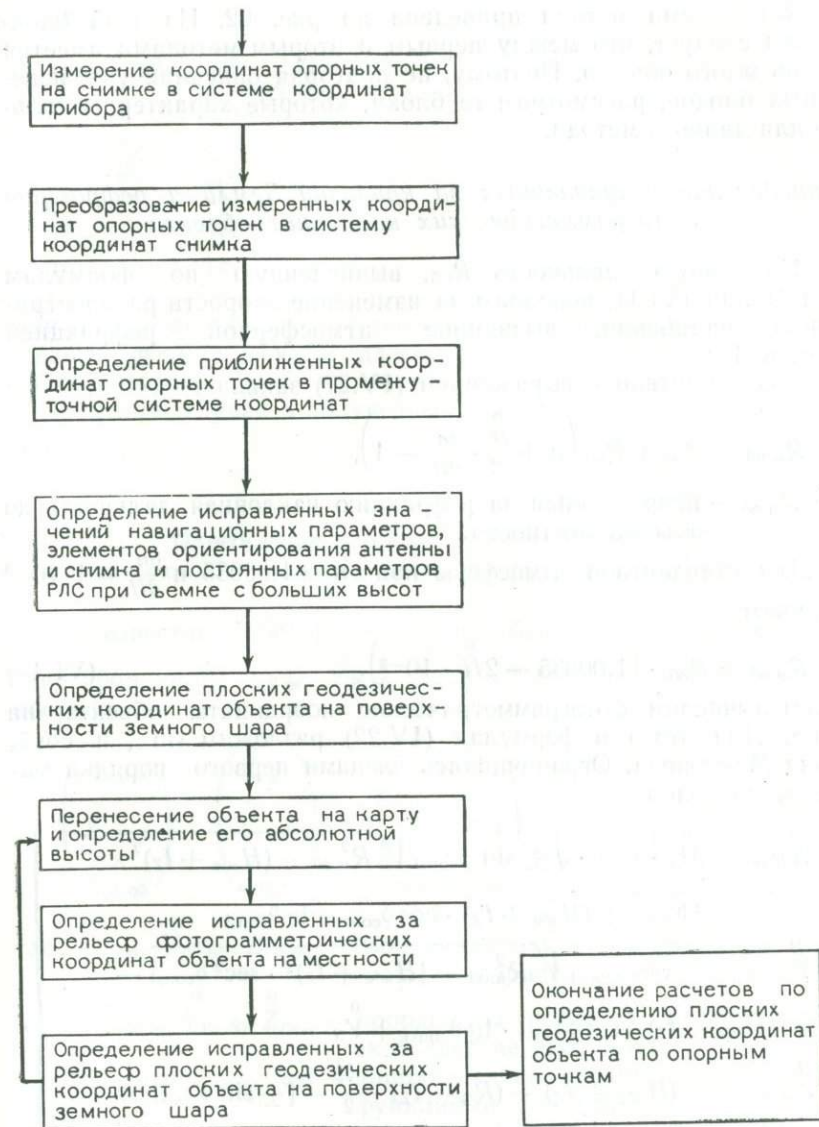
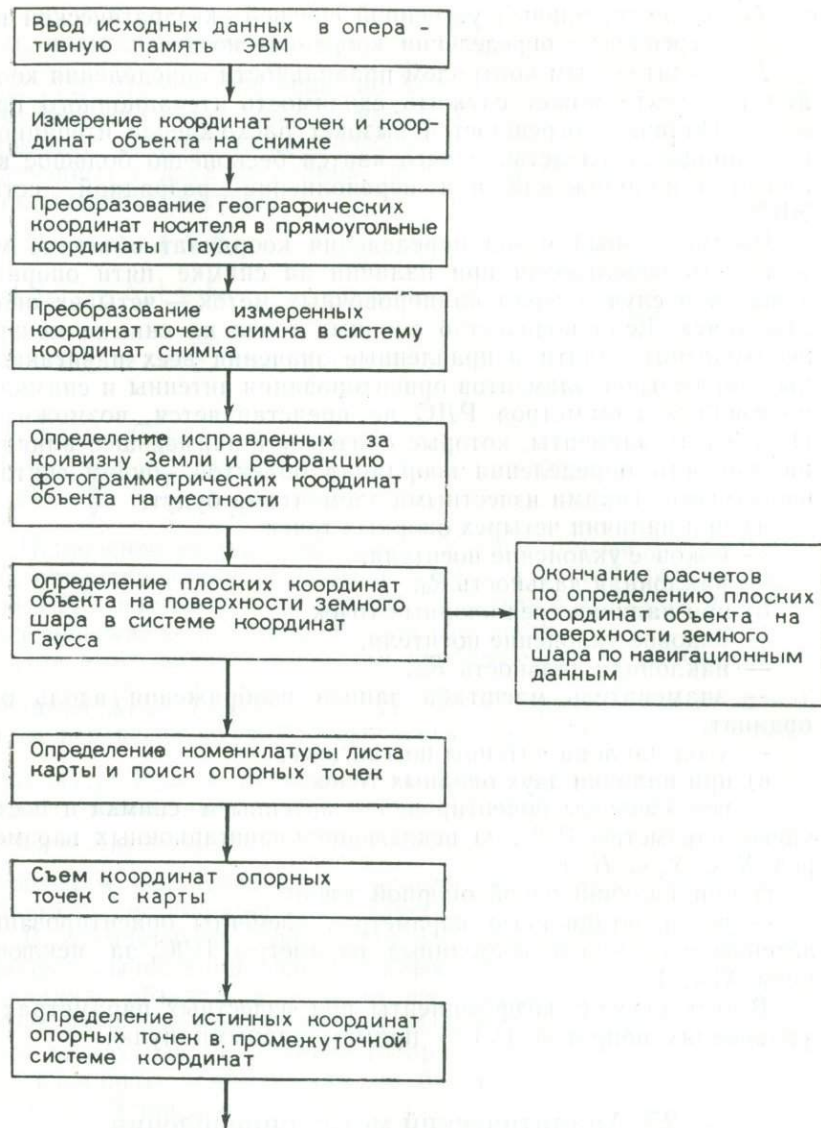


Рис. 62. Блок-схема аналитического метода определения координат объектов при съемке с больших высот

атмосферной рефракции радиоволн. С этой целью для решения задачи используются полученные в § 17, 18 формулы связи координат точек местности и координат точек РЛ снимка, а также известные [68], [98] формулы связи между системой координат Гаусса, географической, геоцентрической и промежуточной системами координат. В качестве промежуточной си-

стемы координат принята такая система, начало которой расположено в точке, имеющей координаты $\varphi_s^0, \lambda_s^0, H^0$, ось Z_{Π} перпендикулярна к поверхности эллипсоида, ось Y_{Π} направлена на север, ось X_{Π} дополняет систему до правой.

Блок-схема метода приведена на рис. 62. Из этой блок-схемы следует, что между первым и вторым методами имеется очень много общего. Поэтому, не повторяя описания уже известных блоков, рассмотрим те блоки, которые характерны только для данного метода.

Определение исправленных за кривизну Земли и рефракцию фотограмметрических координат объекта

Наклонную дальность $R_{об}$, вычисленную по формулам (VI.3) или (VI.4), исправим за изменение скорости распространения радиоволн, вызванное атмосферной рефракцией (см. § 17).

В соответствии с выражением (IV.27) запишем

$$R_{н.об} = R_{об} + R_{об} \left(n + \frac{0}{2} \cdot \frac{\partial n}{\partial H} - 1 \right),$$

где $R_{н.об}$ — исправленная за рефракцию наклонная дальность до объекта местности.

Для стандартной атмосферы при $n = 1,00035$ и $\frac{\partial n}{\partial H} = 4 \cdot 10^{-8}$ получим

$$R_{н.об} = R_{об} \cdot (1,00035 - 2H \cdot 10^{-8}). \quad (VI.13)$$

Затем вычислим фотограмметрические координаты объекта на шаре. Для этого в формулах (IV.22) разложим $\sin \xi_x$ и $\cos \xi_x$ в ряд Маклорена. Ограничиваясь членами первого порядка малости, получаем

$$\left. \begin{aligned} X_{R.об} &= M_x \cdot x_{с.об} \cdot q \pm \sin \psi_{const} \sqrt{R_{н.об}^2 - (H_{абс} + t_z)^2} \times \\ &\times \sec^2 \vartheta_{const} + (H_{абс} + t_z) \cdot \cos \psi_{const} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_{const} \\ Y_{R.об} &= \pm \cos \psi_{const} \sqrt{R_{н.об}^2 - (H_{абс} + t_z)^2} \cdot \sec^2 \vartheta_{const} - \\ &- (H_{абс} + t_z) \cdot \sin \psi_{const} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_{const} + Y_s \\ Z_{R.об} &= -(H_{абс} + t_z) - (R_3 - t_z) \cdot \frac{\xi_x^2}{2} - [\pm \sin \psi_{const} \times \\ &\times \sqrt{R_{н.об}^2 - (H_{абс} + t_z)^2} \cdot \sec^2 \vartheta_{const} + (H_{абс} + t_z) \times \\ &\times \cos \psi_{const} \operatorname{tg} \vartheta_{const}] \xi_x \end{aligned} \right\} \quad (VI.14)$$

где

$$q = \frac{R_3 - t_z}{R_3 + H_{абс}},$$

$$t_z = \frac{R_{н.об}^2 - H_{абс}^2 - A_{об}(2R_3 + A_{об})}{2(R_3 + H_{абс})},$$

$$\xi_x = \frac{M_x \cdot x_{с.об}}{R_3 + H_{абс}},$$

$$H_{абс} = H + A_s,$$

$$R_3 = 6371116 \text{ м.}$$

При этом, как показывают расчеты, погрешности из-за преобразования формул (IV.22) даже при углах $\xi_x \leq 3^\circ$ не превысят единиц метров.

В данном случае в полученных формулах примем $A_{об} = A_s = Y_S = 0$.

Определение плоских координат объекта на поверхности Земного шара по навигационным данным

По известным [68] формулам преобразуем фотограмметрические координаты $X_{R.об}^H, Y_{R.об}^H, Z_{R.об}^H$ объекта в геоцентрические координаты

$$\begin{pmatrix} X_{гц.об}^H \\ Y_{гц.об}^H \\ Z_{гц.об}^H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{гц.с}^H \\ Y_{гц.с}^H \\ Z_{гц.с}^H \end{pmatrix} + r \begin{pmatrix} a_{11}a_{12}a_{13} \\ a_{21}a_{22}a_{23} \\ a_{31}a_{32}a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{R.об}^H \\ Y_{R.об}^H \\ Z_{R.об}^H \end{pmatrix}, \quad (VI.15)$$

где $X_{гц.об}^H, Y_{гц.об}^H, Z_{гц.об}^H$ — координаты объекта в геоцентрической системе координат,

$X_{гц.с}^H, Y_{гц.с}^H, Z_{гц.с}^H$ — координаты носителя в геоцентрической системе координат,

a_{11}, \dots, a_{33} — направляющие косинусы, являющиеся функциями углов φ_S, λ_S, A ,

r — масштабный коэффициент, используемый для редуцирования плоских фотограмметрических координат на поверхность шара.

В нашем случае масштабный коэффициент r равен единице, так как фотограмметрические координаты $X_{R.об}^H, Y_{R.об}^H, Z_{R.об}^H$ уже редуцированы на поверхность шара (см. формулы VI.14).

Для вычисления направляющих косинусов воспользуемся [68] следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned}
 a_{11} &= -\cos^0 \lambda_S \sin^0 \varphi_S \cos^0 A - \sin^0 \lambda_S \sin^0 A \\
 a_{12} &= -\cos^0 \lambda_S \sin^0 \varphi_S \sin^0 A + \sin^0 \lambda_S \cdot \cos^0 A \\
 a_{13} &= \cos^0 \lambda_S \cdot \cos^0 \varphi_S \\
 a_{21} &= -\sin^0 \lambda_S \cdot \sin^0 \varphi_S \cdot \cos^0 A + \cos^0 \lambda_S \cdot \sin^0 A \\
 a_{22} &= -\sin^0 \lambda_S \cdot \sin^0 \varphi_S \cdot \sin^0 A - \cos^0 \lambda_S \cdot \cos^0 A \\
 a_{23} &= \sin^0 \lambda_S \cdot \cos^0 \varphi_S \\
 a_{31} &= \cos^0 \varphi_S \cdot \cos^0 A \\
 a_{32} &= \cos^0 \varphi_S \cdot \sin^0 A \\
 a_{33} &= \sin^0 \varphi_S
 \end{aligned} \right\} \quad (VI.16)$$

Координаты носителя в геоцентрической системе координат найдем по известным из геодезии формулам

$$\left. \begin{aligned}
 X_{гц.с}^H &= (N_S + H_{абс}) \cdot \cos^0 \varphi_S \cdot \cos^0 \lambda_S \\
 Y_{гц.с}^H &= (N_S + H_{абс}) \cdot \cos^0 \varphi_S \cdot \sin^0 \lambda_S \\
 Z_{гц.с}^H &= [N_S (1 - e^2) + H_{абс}] \cdot \sin^0 \varphi_S
 \end{aligned} \right\}, \quad (VI.17)$$

где

$$N_S = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \psi_S)^{\frac{1}{2}}}$$

В данном случае в формулах (VI.17) вместо $H_{абс}$ используем значение H .

От геоцентрических координат объекта перейдем к географическим координатам

$$\left. \begin{aligned}
 - \text{при } X_{гц.об}^H \geq 0 \quad \lambda_{об}^H &= \arcsin \frac{Y_{гц.об}^H}{R_{гц}} \\
 - \text{при } X_{гц.об}^H < 0, \quad Y_{гц.об}^H < 0 \quad \lambda_{об}^H &= \arcsin \left| \frac{Y_{гц.об}^H}{R_{гц}} \right| - 180^\circ \\
 - \text{при } X_{гц.об}^H < 0, \quad Y_{гц.об}^H \geq 0 \quad \lambda_{об}^H &= 180^\circ - \arcsin \left| \frac{Y_{гц.об}^H}{R_{гц}} \right|
 \end{aligned} \right\} \quad (VI.18)$$

где

$$R_{\text{гц}} = \left[X_{\text{гц.об}}^2 + Y_{\text{гц.об}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Широту $\varphi_{\text{об}}^H$ вычислим путем итераций. Сначала найдем первое приближение широты $\varphi_{\text{об.1}}^H$

$$\varphi_{\text{об.1}}^H = \arcsin \frac{Z_{\text{гц.с}}^H + t_1}{\left[X_{\text{гц.с}}^2 + Y_{\text{гц.с}}^2 + \left(Z_{\text{гц.с}}^H + t_1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (\text{VI.19})$$

где

$$t_1 = e^2 Z_{\text{гц.с}}^H.$$

Затем второе приближение широты $\varphi_{\text{об.2}}^H$

$$\varphi_{\text{об.2}}^H = \arcsin \frac{Z_{\text{гц.с}}^H + t_2}{\left[X_{\text{гц.с}}^2 + Y_{\text{гц.с}}^2 + \left(Z_{\text{гц.с}}^H + t_2 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}},$$

где

$$t_2 = \frac{a \cdot e^2 \cdot \sin \varphi_{\text{об.1}}^H}{\left(1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi_{\text{об.1}}^H \right)^{\frac{1}{2}}}.$$

Вычисления продолжим до тех пор, пока

$$\left| \varphi_{\text{об.}i+1}^H - \varphi_{\text{об.}i}^H \right| \leq 2 \cdot 10^{-5}.$$

Полученные географические координаты объекта преобразуем в прямоугольные координаты Гаусса $X_{\text{г.об}}^H, Y_{\text{г.об}}^H$. Для этого воспользуемся формулами, приведенными в § 25, заменив в них $\varphi_{\text{с}}, \lambda_{\text{с}}$ на $\varphi_{\text{об}}, \lambda_{\text{об}}$.

*Определение истинных координат
опорных точек в промежуточной системе координат*

По известным из геодезии формулам [98] преобразуем истинные прямоугольные координаты опорных точек $X_{\text{г.}i}, Y_{\text{г.}i}$ (см. § 24) в географические координаты $\varphi_{\text{оп.т.}i}, \lambda_{\text{оп.т.}i}$

$$\varphi_{\text{оп.т.}i} = \varphi_0 - \frac{t_0 \cdot Y_{r,i}^2}{2 \cdot M_0 N_0} \left\{ 1 - \frac{Y_{r,i}^2}{12N_0^2} [5 + 3t_0^2 (1 - 3\gamma_0^2) + \gamma_0^2] \right\}, \quad (\text{VI.20})$$

$$\lambda_{\text{оп.т.}i} = \lambda_{\text{ос}} + \frac{Y_{r,i}}{N_0 \cos \varphi_0} \left[1 - \frac{Y_{r,i}^2}{6 \cdot N_0^2} (1 + 2t_0^2 + \gamma_0^2) \right].$$

Величину φ_0 найдем по итерационной формуле

$$\varphi_0^{i+1} = \frac{X_{r,i} + 16036,5 \cdot \sin^i 2\varphi_0 - 16,83 \cdot \sin^i 4\varphi_0}{6367558,5},$$

принимая $\varphi_0 = \varphi_0^{i=1}$ до тех пор, пока

$$\left| \varphi_0^{i+2} - \varphi_0^{i+1} \right| \leq 2 \cdot 10^{-6}.$$

Здесь

$$M_0 = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi_0)^{\frac{3}{2}}},$$

$$N_0 = \frac{a}{(1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi_0)^{\frac{1}{2}}},$$

$$t_0 = \text{tg } \varphi_0,$$

$$\gamma_0^2 = e'^2 \cdot \cos^2 \varphi_0,$$

$$Y_{r,i} = Y_{r,i} - 500000 - 10^6 \cdot N_3$$

$N_3 = \left[\frac{Y_{r,i}}{10^6} \right]^*$ — целая часть, $\lambda_{\text{ос}} = 6^\circ N_3 - 3^\circ$ при $N_3 \leq 30$, $\lambda_{\text{ос}} = 6^\circ (N_3 - 61) + 3^\circ$ при $N_3 > 30$.

Затем, в соответствии с формулами (VI.17), определим истинные геоцентрические координаты каждой опорной точки $X_{\text{гц.}i}$, $Y_{\text{гц.}i}$, $Z_{\text{гц.}i}$

$$X_{\text{гц.}i} = (N_{\text{оп.т.}i} + A_{\text{оп.т.}i}) \cdot \cos \varphi_{\text{оп.т.}i} \cdot \cos \lambda_{\text{оп.т.}i},$$

$$Y_{\text{гц.}i} = (N_{\text{оп.т.}i} + A_{\text{оп.т.}i}) \cdot \cos \varphi_{\text{оп.т.}i} \cdot \sin \lambda_{\text{оп.т.}i},$$

$$Z_{\text{гц.}i} = [N_{\text{оп.т.}i} (1 - e^2) + A_{\text{оп.т.}i}] \cdot \sin \varphi_{\text{оп.т.}i},$$

где

$$N_{\text{оп.т.}i} = \frac{a}{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi_{\text{оп.т.}i})^{\frac{1}{2}}}.$$

После этого вычислим истинные координаты опорных точек в промежуточной системе координат [68]

$$\begin{pmatrix} X_{pi} \\ Y_{pi} \\ Z_{pi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}a_{21}a_{31} \\ a_{12}a_{22}a_{32} \\ a_{13}a_{23}a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{гц,i} - X_{гц,S}^H \\ Y_{гц,i} - Y_{гц,S}^H \\ Z_{гц,i} - Z_{гц,S}^H \end{pmatrix}, \quad (VI.21)$$

где $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33}$ — направляющие косинусы, вычисляемые по формулам (VI.16) для $A = 90^\circ$ (угол между направлением на север и осью $X_{п}$ промежуточной системы координат).

*Определение приближенных координат
опорных точек в промежуточной системе координат*

Заменим в формулах (VI.1) — (VI.4), (VI.13) и (VI.14) $x_{с.об.}$, $y_{с.об.}$, $R_{и.об.}$, $A_{об}$ соответственно на x с опорной точкой i , y с опорной точкой i , $R_{и.оп.т.i}$, $A_{оп.т.i}$ и вычислим исправленные за кривизну Земли и рефракцию фотограмметрические координаты опорных точек. При этом, как и прежде, примем, что $A_S = Y_S = 0$.

По известным формулам [98] преобразования координат на плоскости вычислим приближенные координаты опорных точек в промежуточной системе координат, учитывая при этом, что обе системы координат, фотограмметрическая и промежуточная, являются правыми:

$$\left. \begin{aligned} X_{п.оп.т.i} &= X_{п,S}^0 + X_{R.оп.т.i} \cdot \sin A^0 - Y_{R.оп.т.i} \cdot \cos A^0 \\ Y_{п.оп.т.i} &= Y_{п,S}^0 + X_{R.оп.т.i} \cdot \cos A^0 + Y_{R.оп.т.i} \cdot \sin A^0 \\ Z_{п.оп.т.i} &= Z_{п,S}^0 + Z_{R.оп.т.i} \end{aligned} \right\}, \quad (VI.22)$$

где $X_{п,S}^0, Y_{п,S}^0, Z_{п,S}^0$ — координаты начала фотограмметрической системы координат относительно промежуточной системы координат.

В данном случае $X_{п,S}^0, Y_{п,S}^0, Z_{п,S}^0$ примем равными нулю, т. е. будем считать, что начала этих систем совпадают.

Определение исправленных значений навигационных параметров, элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС

Найдем разности между приближенными и истинными координатами опорных точек в промежуточной системе координат

$$l_{X,i} = X_{п.оп.т,i} - X_{п,i},$$

$$l_{Y,i} = Y_{п.оп.т,i} - Y_{п,i}$$

и составим уравнения поправок ко всем неизвестным или приближенно известным навигационным параметрам, элементам ориентирования антенны и снимка и постоянным параметрам РЛС

$$\left. \begin{aligned} & a_{X,1}(X_{п,с}) + b_{X,1}(Y_{п,с}) + c_{X,1}(H_{абс}) + d_{X,1}(A) + i_{X,1}(\psi) + \\ & + j_{X,1}(\vartheta) + k_{X,1}(R_0) + n_{X,1}(M_x) + P_{X,1}(Y_s) + \\ & + m_{X,1}(M_y) + l_{X,1} = \vartheta_{X,1} \\ & a_{Y,1}(X_{п,с}) + b_{Y,1}(Y_{п,с}) + l_{Y,1}(H_{абс}) + d_{Y,1}(A) + i_{Y,1}(\psi) + \\ & + j_{Y,1}(\vartheta) + k_{Y,1}(R_0) + n_{Y,1}(M_x) + P_{Y,1}(Y_s) + \\ & + m_{Y,1}(M_y) + l_{Y,1} = \vartheta_{Y,1} \\ & \dots \dots \dots \\ & a_{X,i}(X_{п,с}) + b_{X,i}(Y_{п,с}) + c_{X,i}(H_{абс}) + d_{X,i}(A) + i_{X,i}(\psi) + \\ & + j_{X,i}(\vartheta) + k_{X,i}(R_0) + n_{X,i}(M_x) + P_{X,i}(Y_s) + m_{X,i}(M_y) + \\ & + l_{X,i} = \vartheta_{X,i} \\ & a_{Y,i}(X_{п,с}) + b_{Y,i}(Y_{п,с}) + c_{Y,i}(H_{абс}) + d_{Y,i}(A) + i_{Y,i}(\psi) + \\ & + j_{Y,i}(\vartheta) + k_{Y,i}(R_0) + n_{Y,i}(M_x) + P_{Y,i}(Y_s) + \\ & + m_{Y,i}(M_y) + l_{Y,i} = \vartheta_{Y,i} \end{aligned} \right\}$$

(VI.23)

Значения коэффициентов при поправках получим путем дифференцирования уравнений связи системы координат снимка с промежуточной системой координат

$$\left. \begin{aligned} a_{X,i} &= 1 \\ a_{Y,i} &= 0 \\ b_{X,i} &= 0 \\ b_{Y,i} &= 1 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
c_{X,i} &= \dot{X}_{R,H}^* \sin A - \dot{Y}_{R,H}^* \cos A \\
c_{Y,i} &= \dot{X}_{R,H}^* \cos A + \dot{Y}_{R,H}^* \sin A \\
d_{X,i} &= Y_{\text{п.оп.т.}i} - Y_{\text{п.с}} \\
d_{Y,i} &= X_{\text{п.с}} - X_{\text{п.оп.т.}i} \\
i_{X,i} &= (Y_{R,\text{оп.т.}i} - Y_s) \cdot \sin A + (X_{R,\text{оп.т.}i} - M_x x_{c,\text{оп.т.}i} q) \cdot \cos A \\
i_{Y,i} &= (Y_{R,\text{оп.т.}i} - Y_s) \cdot \cos A - (X_{R,\text{оп.т.}i} - M_x x_{c,\text{оп.т.}i} q) \cdot \sin A \\
j_{X,i} &= \dot{X}_{R,v}^* \sin A - \dot{Y}_{R,v}^* \cos A \\
j_{Y,i} &= \dot{X}_{R,v}^* \cos A + \dot{Y}_{R,v}^* \sin A \\
k_{X,i} &= \dot{X}_{R,R_0}^* \sin A - \dot{Y}_{R,R_0}^* \cos A \\
k_{Y,i} &= \dot{X}_{R,R_0}^* \cos A + \dot{Y}_{R,R_0}^* \sin A \\
n_{X,i} &= x_{c,\text{оп.т.}i} \cdot q \cdot \sin A \\
n_{Y,i} &= x_{c,\text{оп.т.}i} \cdot q \cdot \cos A \\
p_{X,i} &= -\cos A \\
p_{Y,i} &= \sin A \\
m_{X,i} &= \dot{X}_{R,M_y}^* \sin A - \dot{Y}_{R,M_y}^* \cos A \\
m_{Y,i} &= \dot{X}_{R,M_y}^* \cos A + \dot{Y}_{R,M_y}^* \sin A
\end{aligned}
\tag{VI.24}$$

где

$$\begin{aligned}
\dot{X}_{R,H}^* &= \mp \frac{H_{a6c} + t_z}{R_r} \cdot \sin \psi \cdot \sec^2 \vartheta + \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta, \\
\dot{Y}_{R,H}^* &= \mp \frac{H_{a6c} + t_z}{R_r} \cdot \cos \psi \cdot \sec^2 \vartheta - \sin \psi \cdot \operatorname{tg} \vartheta, \\
\dot{X}_{R,\vartheta}^* &= \mp \frac{(H_{a6c} + t_z)^2}{R_r} \cdot \sin \psi \cdot \sec^2 \vartheta \cdot \operatorname{tg} \vartheta + (H_{a6c} + t_z) \cdot \sec^2 \vartheta \times \\
&\times \cos \psi, \\
\dot{Y}_{R,\vartheta}^* &= \mp \frac{(H_{a6c} + t_z)^2}{R_r} \cdot \cos \psi \cdot \sec^2 \vartheta \cdot \operatorname{tg} \vartheta - (H_{a6c} + t_z) \times \\
&\times \sec^2 \vartheta \cdot \sin \psi, \\
\dot{X}_{R,R_0}^* &= \pm \sin \psi \frac{R_{\text{н.оп.т.}i}}{R_r} (1,00035 - 2\overset{0}{H} \cdot 10^{-8}),
\end{aligned}$$

$$Y_{R.R_0}^* = \pm \cos \psi \frac{R_{н.оп.т.i}}{R_r} (1,00035 - 2H \cdot 10^{-8}),$$

$$X_{R.M_y}^* = \pm \sin \psi \frac{R_{н.оп.т.i}}{R_r} \cdot y_{с.оп.т.i} (1,00035 - 2H \cdot 10^{-8}),$$

$$Y_{R.M_y}^* = \pm \cos \psi \frac{R_{н.оп.т.i}}{R_r} \cdot y_{с.оп.т.i} (1,00035 - 2H \cdot 10^{-8}),$$

$$R_r = \left| \sqrt{R_{н.оп.т.i}^2 - (H_{абс} + t_z)^2 \cdot \sec^2 \vartheta} \right|.$$

При наличии серии калибровочных меток коэффициенты $k_{X,i}$, $k_{Y,i}$, $m_{X,i}$, $m_{Y,i}$ в уравнениях (VI.23) примем равными нулю.

Последующий процесс определения исправленных значений навигационных параметров элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС аналогичен процессу, рассмотренному на стр. 193. Исключение составляет аппликата $Z_{п.с}$, исправленное значение которой будет равно

$$Z_{п.с}^i = (H_{абс})^i.$$

Кроме того, пропадает необходимость в определении абсолютной высоты A_s проекции носителя на местности.

Определение плоских геодезических координат объекта на поверхности Земного шара

Заменяя в формулах (VI.14) приближенные значения элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС на исправленные и приняв $A_{об} = 0$, вычислим исправленные за кривизну Земли и рефракцию фотограмметрические координаты $X_{R.об}^0$, $Y_{R.об}^0$, $Z_{R.об}^0$ объекта. Затем в соответствии с формулами (VI.16) и (VI.21) преобразуем фотограмметрические координаты объекта в промежуточную систему координат. Для этого вместо величин $X_{п.с}^0$, $Y_{п.с}^0$, $Z_{п.с}^0$, $X_{R.оп.т.i}^0$, $Y_{R.оп.т.i}^0$, $Z_{R.оп.т.i}^0$ A подставим соответственно величины $X_{п.с}^{n+1}$, $Y_{п.с}^{n+1}$, $Z_{п.с}^{n+1}$, $X_{R.об}^0$, $Y_{R.об}^0$, $Z_{R.об}^0$, A .

Полученные координаты $X_{п.об}^0$, $Y_{п.об}^0$, $Z_{п.об}^0$ объекта в промежуточной системе координат преобразуем в геоцентрические координаты

$$\begin{pmatrix} 0 \\ X_{гц.об} \\ 0 \\ Y_{гц.об} \\ 0 \\ Z_{гц.об} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H \\ X_{гц.с} \\ H \\ Y_{гц.с} \\ H \\ Z_{гц.с} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11}a_{12}a_{13} \\ a_{21}a_{22}a_{23} \\ a_{31}a_{32}a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ X_{п.об} \\ 0 \\ Y_{п.об} \\ 0 \\ Z_{п.об} \end{pmatrix}.$$

В свою очередь геоцентрические координаты объекта в соответствии с формулами (VI.18) и (VI.19) преобразуем в географические координаты, а последние — в прямоугольные координаты $X_{г.об}^0$, $Y_{г.об}^0$ Гаусса. По координатам $X_{г.об}^0$, $Y_{г.об}^0$ определим на топографической карте абсолютную высоту $A_{об}$ объекта. Подставим найденное значение $A_{об}$ в формулы (VI.14) и вычислим фотограмметрические координаты объекта, исправленные за рельеф местности. После этого снова преобразуем фотограмметрические координаты объекта в промежуточную систему координат. От промежуточных координат перейдем к геоцентрическим координатам, затем к географическим и, наконец, к прямоугольным координатам Гаусса. Как и прежде в холмистых и горных районах процесс вычисления исправленных за рельеф прямоугольных геодезических координат объекта, продолжим до тех пор, пока разность абсолютных высот объекта из предыдущего и последующего приближений не будет меньше установленного ранее допуска (см. § 15)

$$\left| A_{об}^{i+1} - A_{об}^i \right| \leq 100 \text{ м.}$$

При ограниченном количестве опорных точек рассмотренный метод можно использовать так же, как и метод, предназначенный для обработки РЛ снимков, полученных с малых высот.

§ 26. Особые случаи определения координат объектов

До начала операций по определению координат объекта обычно неизвестно имеются ли на снимке и карте опорные точки или нет. Поэтому в зависимости от высоты съемки для определения координат объекта используется первый или второй метод. В соответствии с этими методами выполняются все операции, включая поиск опорных точек. При поиске опорных точек может оказаться, что на снимке, содержащем изображение объекта (будем называть его начальным снимком), их нет. В этом случае задача по определению координат объекта может быть решена путем использования опорных точек на соседних снимках, определения для этих снимков исправленных значений навигацион-

ных параметров, элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС и корректирования по ним приближенных параметров начального снимка.

Последовательность выполнения указанных операций приведена в виде блок-схемы на рис. 63. Из сопоставления рис. 57, 62 и 63 следует, что к стандартным блокам первого и второго методов добавляются два процесса: процесс поиска опорных точек на соседних снимках и процесс вычисления исправленных значений навигационных параметров, элементов ориентирования и постоянных параметров РЛС начального снимка.

Убедившись в отсутствии опорных точек на начальном снимке, по географическим координатам носителя соседнего снимка, предшествующего начальному, вычислим номенклатуру листа карты. По номенклатуре найдем соответствующий лист карты. Затем преобразуем географические координаты в прямоугольные и по ним определим местоположение носителя на карте. После этого произведем поиск опорных точек. При отсутствии опорных точек данную операцию будем повторять для последующих снимков до тех пор, пока не будет найден снимок с опорными точками. На этом снимке измерим координаты опорных точек и с помощью первого или второго метода вычислим исправленные значения навигационных параметров элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС.

После этого, а также в том случае, когда на предшествующих снимках не будут обнаружены опорные точки, осуществим поиск опорных точек на снимках, последующих за начальным. Измерим координаты опорных точек и вычислим исправленные значения навигационных параметров, элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС найденного снимка.

В зависимости от количества соседних снимков с опорными точками процесс вычисления исправленных параметров начального снимка будет различным.

При отсутствии на снимках опорных точек вычислить исправленные параметры начального снимка не представляется возможным. Поэтому в качестве окончательных используются координаты объекта, вычисленные по навигационным данным начального снимка.

При наличии одного соседнего снимка с опорными точками исправленные параметры начального снимка можно вычислить по следующей формуле:

$$\left. \begin{aligned} T_i &= T_i^0 + \Delta_{m,i} \\ \Delta_{m,i} &= T_{c.k,i} - T_{c.k,i}^0 \end{aligned} \right\}, \quad (VI.25)$$

где T_i — исправленное значение i -го параметра начального снимка,

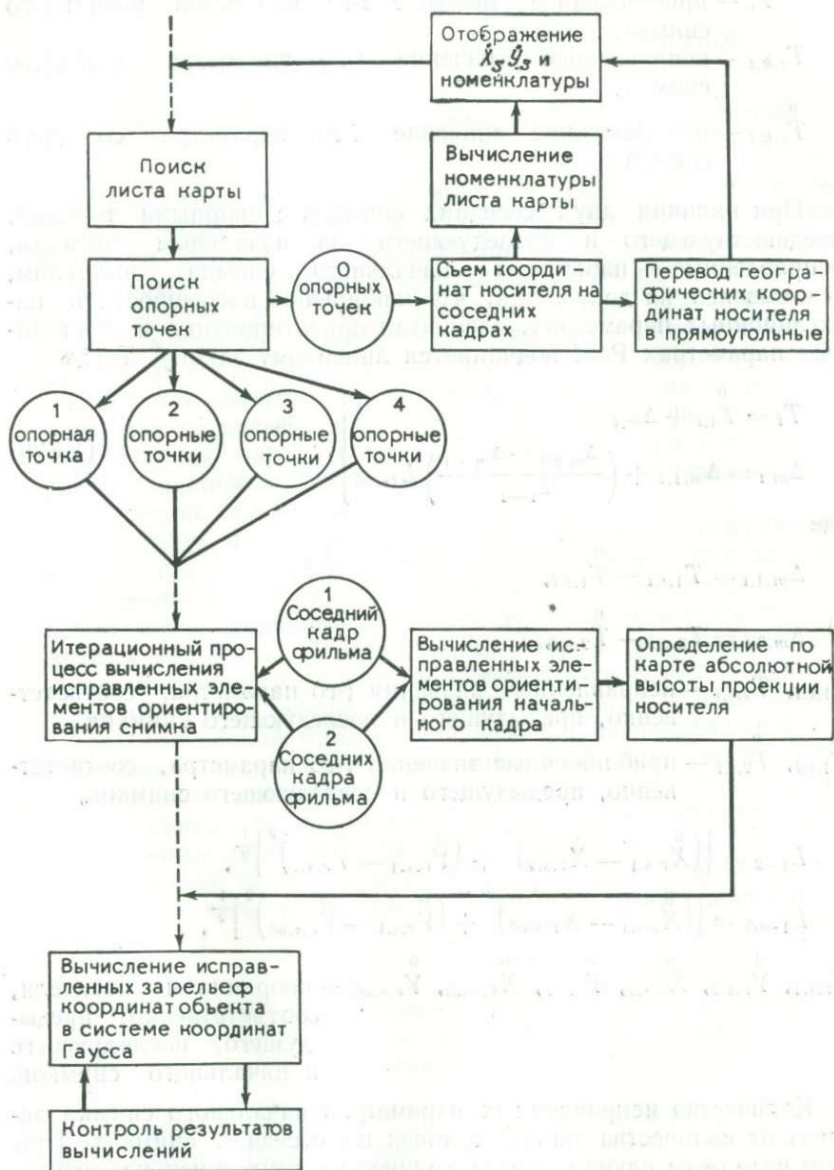


Рис. 63. Блок-схема метода определения координат объектов при отсутствии на снимке опорных точек

T_i^0 — приближенное значение i -го параметра начального снимка,
 $T_{c.k.i}$ — исправленное значение i -го параметра соседнего снимка,
 $T_{c.k.i}^0$ — приближенное значение i -го параметра соседнего снимка.

При наличии двух соседних снимков с опорными точками, предшествующего и последующего за начальным снимком, исправленные параметры начального снимка вычислим, основываясь на допущении, что накопление погрешности в навигационных параметрах, элементах ориентирования и постоянных параметрах РЛС подчиняется линейному закону. Тогда

$$\left. \begin{aligned} T_i &= T_{1.i}^0 + \Delta_{m.i} \\ \Delta_{m.i} &= \Delta_{m.1.i} + \left(\frac{\Delta_{m.2.i} - \Delta_{m.1.i}}{L_{1-2}} \right) L_{1-06} \end{aligned} \right\}, \quad (\text{VI.26})$$

где

$$\Delta_{m.1.i} = T_{1.c.i} - T_{1.c.i}^0,$$

$$\Delta_{m.2.i} = T_{2.c.i} - T_{2.c.i}^0,$$

$T_{1.c.i}$, $T_{2.c.i}$ — исправленные значения i -го параметра, соответственно, предыдущего и последующего снимков,

$T_{1.c.i}^0$, $T_{2.c.i}^0$ — приближенные значения i -го параметра, соответственно, предыдущего и последующего снимков,

$$L_{1-2} = \left[(X_{r.s.1}^0 - X_{r.s.2}^0)^2 + (Y_{r.s.1}^0 - Y_{r.s.2}^0)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$L_{1-06} = \left[(X_{r.s.1}^0 - X_{r.s.06}^0)^2 + (Y_{r.s.1}^0 - Y_{r.s.06}^0)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

$X_{r.s.1}^0$, $Y_{r.s.2}^0$, $X_{r.s.2}^0$, $Y_{r.s.2}^0$, $X_{r.s.06}^0$, $Y_{r.s.06}^0$ — координаты носителя, соответственно, предыдущего, последующего и начального снимков.

Количество исправленных параметров начального снимка зависит от количества опорных точек на соседних снимках. При этом возможны случаи, когда количество этих точек на предыдущем и последующем снимках различно. В подобных случаях параметры, определенные для двух соседних снимков, подставим в формулы (VI.26), а те параметры, которые определены только для одного снимка, — в формулы (VI.25). После этого в соответствии с выбранным методом вычислим координаты объекта.

§ 27. Аналитический метод определения координат объектов по стереоскопической паре РЛ снимков

Получение стереоскопического изображения объекта

В настоящее время известны [142], [158] два способа получения стереоскопического РЛ изображения объекта местности. В первом способе РЛ снимка одного и того же объекта осуществляется при пролетах носителя с противоположных сторон (рис. 64) объекта. Во втором способе съемка одного и того же объекта местности осуществляется при пролетах носителя с одной стороны объекта, но на разных высотах (рис. 65). При использовании как первого, так и второго способа, из-за различного смещения за рельеф, два изображения объекта разделены радиолокационным параллаксом, вследствие чего при одновременном рассматривании изображений удается получить стереоскопическое изображение объекта.

Каждому способу получения стереоскопического изображения объекта присущи свои положительные и отрицательные черты. В то время как первый способ является наиболее точным, особенно когда наклонные дальности до объекта местности пересекаются под углом, близким к 45° [141], он же обладает весьма существенным недостатком, заключающимся в том, что в сильно пересеченной и горной местности не всегда удается получить стереоскопический эффект из-за наличия радиолокационной тени на скатах местности. Второй способ является менее точным, однако он лишен недостатка первого способа, так как в данном случае съемка производится с одной стороны объекта и радиолокационные тени не разрушают стереоэффекта.

Вопрос об использовании того или иного способа решается отдельно в зависимости от конкретных условий съемки и местности.

Зависимость между координатами объекта местности и координатами его изображений на паре радиолокационных снимков

На рис. 64 и 65 представлены два положения носителя S_1 и S_2 , соответствующие моменту съемки точки M местности. Точка O является началом фотограмметрической системы координат. Положение точки S_1 относительно начала фотограмметрической системы координат определяет вектор \vec{a} или координаты X_s, Y_s, Z_s . Положение точки S_2 относительно точки S_1 определяет вектор \vec{B} или координаты X_{s2}, Y_{s2}, Z_{s2} . Положение точки M мест-

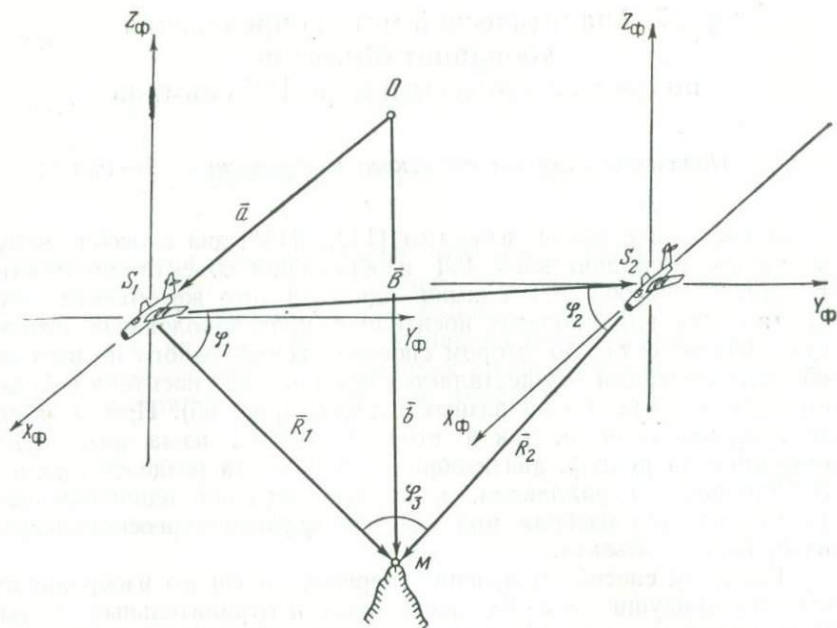


Рис. 64. Радиолокационная съемка с противоположных сторон объекта местности

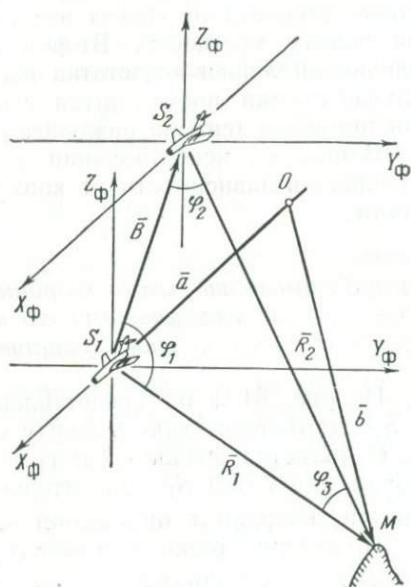


Рис. 65. Радиолокационная съемка одной стороны объекта местности

ности относительно точки O определяет вектор \bar{b} или координаты X, Y, Z . Положение той же точки M местности относительно точки S_1 , определяет вектор \bar{R}_1 , или координаты X_M, Y_M, Z_M , а относительно точки S_2 — вектор \bar{R}_2 или координаты X_{M2}, Y_{M2}, Z_{M2} . При этом предполагается, что системы координат в точках S_1 и S_2 параллельны друг другу и одинаково ориентированы в пространстве.

Так как векторы \bar{B}, \bar{R}_1 и \bar{R}_2 находятся в одной базисной плоскости и, следовательно, компланарны, можно записать

$$\bar{R}_1 = \bar{B} + \bar{R}_2.$$

Представим полученное уравнение в прямоугольных координатах

$$\left. \begin{aligned} X_{M1} &= X_{s2} + X_{M2} \\ Y_{M1} &= Y_{s2} + Y_{M2} \\ Z_{M1} &= Z_{s2} + Z_{M2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{VI.27})$$

Выражения для X_{M1}, Y_{M1} и X_{M2}, Y_{M2} найдем аналогично выводу формул (III.10) и (III.11) одиночного снимка

$$\left. \begin{aligned} X_{M1} &= \pm \sin \psi_1 \cdot \sqrt{R_1^2 - Z_{M1}^2 \sec^2 \vartheta_1} - Z_{M1} \cos \psi_1 \operatorname{tg} \vartheta_1 \\ Y_{M1} &= \pm \cos \psi_1 \cdot \sqrt{R_1^2 - Z_{M1}^2 \sec^2 \vartheta_1} + Z_{M1} \sin \psi_1 \operatorname{tg} \vartheta_1 \\ X_{M2} &= \pm \sin \psi_2 \cdot \sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \sec^2 \vartheta_2} - Z_{M2} \cos \psi_2 \operatorname{tg} \vartheta_2 \\ Y_{M2} &= \pm \cos \psi_2 \cdot \sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \sec^2 \vartheta_2} + Z_{M2} \sin \psi_2 \operatorname{tg} \vartheta_2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{VI.28})$$

где R_1, R_2 — соответственно, модули вектора \bar{R}_1 и \bar{R}_2 ,
 ψ_1, ϑ_1 — угловые элементы ориентирования антенны в левой (или нижней) точке съемки S_1 ,
 ψ_2, ϑ_2 — угловые элементы ориентирования антенны в правой (или верхней) точке съемки S_2 .

Заменим X_{M1}, Y_{M1} и X_{M2}, Y_{M2} в формулах (VI.27) их значениями из формул (VI.28) и, кроме того, решим полученные уравнения относительно Z_{M2} . В результате несложных преобразований, заключающихся в возведении в квадрат и суммирования правых и левых частей формул (VI.27), получим

$$\left. \begin{aligned} X_{M1} &= X_{s2} \pm \sin \psi_2 \sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \sec^2 \vartheta_2} - Z_{M2} \cos \psi_2 \operatorname{tg} \vartheta_2 \\ Y_{M1} &= Y_{s2} \pm \cos \psi_2 \sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \sec^2 \vartheta_2} + Z_{M2} \sin \psi_2 \operatorname{tg} \vartheta_2 \\ Z_{M1} &= Z_{s2} + Z_{M2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{VI.29})$$

Здесь

$$Z_{M2} = \frac{(B^2 + R_2^2 - R_1^2) [Z_{s2} - \operatorname{tg} \vartheta_2 (X_{s2} \cos \psi_2 - Y_{s2} \sin \psi_2)] +}{2 \{ [Z_{s2} - \operatorname{tg} \vartheta_2 (X_{s2} \cos \psi_2 - Y_{s2} \sin \psi_2)]^2 +$$

$$+ (X_{s2} \sin \psi_2 + Y_{s2} \cos \psi_2) \cdot \sqrt{4R_2^2 \{ Z_{s2} - \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot (X_{s2} \cos \psi_2 - Y_{s2} \sin \psi_2) \}^2 +$$

$$+ (X_{s2} \sin \psi_2 + Y_{s2} \cos \psi_2)^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2 \} +$$

$$+ (X_{s2} \sin \psi_2 + Y_{s2} \cos \psi_2)^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2 \} - (B^2 + R_2^2 - R_1^2) \cdot \sec^2 \vartheta_2}$$

$B = \left| \sqrt{X_{s2}^2 + Y_{s2}^2 + Z_{s2}^2} \right|$ — модуль вектора \bar{B} или базис съемки.

Найденные выражения устанавливают зависимость между координатами объекта местности и координатами его изображений на паре снимков в текущей фотограмметрической системе координат с началом в левой (или нижней) точке S_1 съемки. Для перехода к фотограмметрической системе координат с началом в точке O обратимся к рис. 64 и 65. Из построений этих рисунков следует:

$$\bar{R}_1 = \bar{b} - \bar{a}$$

или в координатной форме

$$\left. \begin{aligned} X_{M1} &= X - X_s \\ Y_{M1} &= Y - Y_s \\ Z_{M1} &= Z - Z_s \end{aligned} \right\} \quad (\text{VI.30})$$

Подставив выражения (VI.29) в формулы (VI.30), получим искомые зависимости между координатами объекта местности и координатами его изображений на паре РЛ снимков

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + X_{s2} \pm \sin \psi_2 \cdot \sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \sec^2 \vartheta_2 - Z_{M2} \cos \psi_2 \operatorname{tg} \vartheta_2} \\ Y &= Y_s + Y_{s2} \pm \cos \psi_2 \cdot \sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \sec^2 \vartheta_2 + Z_{M2} \sin \psi_2 \operatorname{tg} \vartheta_2} \\ Z &= Z_s + Z_{s2} + Z_{M2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{VI.31})$$

Характерной особенностью полученных выражений является то, что координаты точек местности зависят от угловых элементов ориентирования антенны только в правой (или верхней) точке съемки и не зависят от угловых элементов ориентирования антенны в левой (или нижней) точке.

Определение составляющих базиса и угловых элементов ориентирования антенны

Любая пара наклонных дальностей, принадлежащих одной и той же точке местности, и базис съемки образуют треугольник, у которого известны две стороны (см. рис. 64 и 65). Третья

сторона, базис съемки B , обычно не известна. Кроме того, неизвестны углы ψ_2 и ϑ_2 , определяющие условие пересечения наклонных дальностей R_1 и R_2 . В том случае, если снимки ориентированы правильно, т. е. правильно определены значения B , ψ_2 и ϑ_2 , сумма углов треугольника S_1S_2M должна быть равна 180° . Данное условие можно выразить суммой углов, заключенных между векторами \bar{B} и \bar{B}_1 , $-\bar{B}$ и \bar{B}_2 , $-\bar{B}_1$ и $-\bar{R}_2$,

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - 180^\circ = 0. \quad (\text{VI.32})$$

Запишем условие (VI.32) в координатной форме, сохраняя ранее принятые обозначения

$$\begin{aligned} & \arccos\left(\frac{X_{s2}X_{M1} + Y_{s2}Y_{M1} + Z_{s2}Z_{M1}}{B \cdot R_1}\right) + \\ & + \arccos\left(-\frac{X_{s2}X_{M1} + Y_{s2}Y_{M2} + Z_{s2}Z_{M2}}{B \cdot R_2}\right) + \\ & + \arccos\left(\frac{X_{M2}X_{M1} + Y_{M2}Y_{M1} + Z_{M2}Z_{M1}}{R_1 \cdot R_2}\right) - 180^\circ = 0. \quad (\text{VI.33}) \end{aligned}$$

В формуле (VI.32) заменим X_{M1} , Y_{M1} , Z_{M1} их значениями из уравнений (VI.27)

$$\begin{aligned} & \arccos\left(\frac{B}{R_1} + \frac{X_{s2}X_{M2} + Y_{s2}Y_{M2} + Z_{s2}Z_{M2}}{B \cdot R_1}\right) + \\ & + \arccos\left(-\frac{X_{s2}X_{M2} + Y_{s2}Y_{M2} + Z_{s2}Z_{M2}}{B \cdot R_2}\right) + \\ & + \arccos\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{X_{s2}X_{M2} + Y_{s2}Y_{M2} + Z_{s2}Z_{M2}}{R_1 \cdot R_2}\right) - 180^\circ = 0. \quad (\text{VI.34}) \end{aligned}$$

Подставив в выражение (VI.34) значения X_{M2} , Y_{M2} , Z_{M2} из формул (VI.28) и (VI.29), получим уравнение с пятью неизвестными X_{s2} , Y_{s2} , Z_{s2} , ψ_2 , ϑ_2 . Одна точка стереопары позволяет составить одно такое уравнение. Поэтому для определения составляющих базиса и элементов ориентирования антенны необходимо выбрать на стереопаре не менее пяти точек, измерить ординаты этих точек, вычислить соответствующие им наклонные дальности, составить и решить систему уравнений (VI.34).

Однако уравнение (VI.34) нелинейно, и решить его обычными способами затруднительно. Поэтому допустим, что нам известны приближенные значения X_{s2}^0 , Y_{s2}^0 , Z_{s2}^0 , ψ_2^0 , ϑ_2^0 .

Приближенные значения составляющих базиса X_{s2}^0 , Y_{s2}^0 , Z_{s2}^0 можно определить следующим образом.

На рис. 66 показаны в плане два положения носителя S_1 и S_2 , соответствующие моментам съемки одного и того же объекта

Здесь a_i, b_i, c_i, d_i, i_i — частные производные от функции (VI.34) по переменным $X_{s2}, Y_{s2}, Z_{s2}, \psi_2, \theta_2$,

$$i_i = \arccos \left(\frac{\overset{0}{B}}{\overset{0}{R_1}} + \frac{\overset{0}{X_{s2}} \overset{0}{X_{M2}} + \overset{0}{Y_{s2}} \overset{0}{Y_{M2}} + \overset{0}{Z_{s2}} \overset{0}{Z_{M2}}}{\overset{0}{B} \cdot \overset{0}{R_1}} \right) +$$

$$+ \arccos \left(- \frac{\overset{0}{X_{s2}} \overset{0}{X_{M2}} + \overset{0}{Y_{s2}} \overset{0}{Y_{M2}} + \overset{0}{Z_{s2}} \overset{0}{Z_{M2}}}{\overset{0}{B} \cdot \overset{0}{R_2}} \right) +$$

$$+ \arccos \left(\frac{\overset{0}{R_2}}{\overset{0}{R_1}} + \frac{\overset{0}{X_{s2}} \overset{0}{X_{M2}} + \overset{0}{Y_{s2}} \overset{0}{Y_{M2}} + \overset{0}{Z_{s2}} \overset{0}{Z_{M2}}}{\overset{0}{R_1} \cdot \overset{0}{R_2}} \right) - 180^\circ,$$

т. е. является функцией (VI.17), вычисленной по приближенным значениям неизвестных.

Определим значения коэффициентов a, b, c, d, i . Согласно формулам (VI.32) и (VI.34)

$$a = \frac{\partial \varphi_1}{\partial X_{s2}} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial X_{s2}} + \frac{\partial \varphi_3}{\partial X_{s2}},$$

где

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial X_{s2}} = - \left[\frac{\overset{\cdot}{B}(x)}{\overset{0}{R_1}} + \frac{X_{M2} + X_{s2} \cdot \overset{\cdot}{X}_{M2(x)} + Y_{s2} \cdot \overset{\cdot}{Y}_{M2} + Z_{s2} \cdot \overset{\cdot}{Z}_{M2(x)}}{\overset{0}{B} \cdot \overset{0}{R_1}} - \right.$$

$$\left. - \frac{(X_{s2} \cdot X_{M2} + Y_{s2} \cdot Y_{M2} + Z_{s2} \cdot Z_{M2}) \cdot \overset{\cdot}{B}(x)}{\overset{0}{B}^2 \cdot \overset{0}{R_1}} \right] \times$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\overset{0}{B}}{\overset{0}{R_1}} + \frac{X_{s2} \cdot X_{M2} + Y_{s2} \cdot Y_{M2} + Z_{s2} \cdot Z_{M2}}{\overset{0}{B} \cdot \overset{0}{R_1}} \right)^2}},$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial X_{s2}} = \left[\frac{X_{M2} + X_{s2} \cdot \overset{\cdot}{X}_{M2(x)} + Y_{s2} \cdot \overset{\cdot}{Y}_{M2(x)} + Z_{s2} \cdot \overset{\cdot}{Z}_{M2(x)}}{\overset{0}{B} \cdot \overset{0}{R_2}} - \right.$$

$$\left. - \frac{(X_{s2} \cdot X_{M2} + Y_{s2} \cdot Y_{M2} + Z_{s2} \cdot Z_{M2}) \overset{\cdot}{B}(x)}{\overset{0}{B}^2 \cdot \overset{0}{R_2}} \right] \times$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{X_{s2} \cdot X_{M2} + Y_{s2} \cdot Y_{M2} + Z_{s2} \cdot Z_{M2}}{\overset{0}{B} \cdot \overset{0}{R_2}} \right)^2}},$$

$$\frac{\partial \varphi_3}{\partial X_{s2}} = - \left[\frac{X_{M2} + X_{s2} \cdot \overset{\cdot}{X}_{M2(x)} + Y_{s2} \cdot \overset{\cdot}{Y}_{M2(x)} + Z_{s2} \cdot \overset{\cdot}{Z}_{M2(x)}}{\overset{0}{R_1} \cdot \overset{0}{R_2}} \right] \times$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\overset{0}{R_2}}{\overset{0}{R_1}} + \frac{X_{s2} \cdot X_{M2} + Y_{s2} \cdot Y_{M2} + Z_{s2} \cdot Z_{M2}}{\overset{0}{R_1} \cdot \overset{0}{R_2}} \right)^2}},$$

(VI.36)

Учитывая выражения (VI.36) и обозначая

$$X_{s2} \cdot X_{M2} + Y_{s2} \cdot Y_{M2} + Z_{s2} \cdot Z_{M2} = F,$$

получаем

$$a = (X_{M2} + X_{s2} \cdot \dot{X}_{M2(X)} + Y_{s2} \cdot \dot{Y}_{M2(X)} + Z_{s2} \cdot \dot{Z}_{M2(X)}) \times \\ \times \left[\frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_2^2 - F^2}} - \frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_1^2 - (B^2 + F)^2}} - \frac{1}{\sqrt{R_1^2 \cdot R_2^2 - (R_2^2 + F)^2}} \right] + \\ + \frac{F \cdot \dot{B}(X)}{B} \left[\frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_1^2 - (B^2 + F)^2}} - \frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_2^2 - F^2}} \right] - \\ - \frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_1^2 - (B^2 + F)^2}}.$$

Здесь

$$\dot{X}_{M2(X)} = \mp \sin \psi_2 \frac{Z_{M2} \cdot \sec^2 \vartheta_2}{\sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2}} \cdot \dot{Z}_{M2(X)} - \cos \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot \dot{Z}_{M2(X)},$$

$$\dot{Y}_{M2(X)} = \mp \cos \psi_2 \frac{Z_{M2} \cdot \sec^2 \vartheta_2}{\sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2}} \cdot \dot{Z}_{M2(X)} + \sin \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot \dot{Z}_{M2(X)},$$

$$\dot{Z}_{M2(X)} = \frac{\sin \psi_2 [2Z_{M2} (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B]^2 + \Gamma^3 [4 \cdot R_2^2 \times \\ \times (\Gamma \cdot \sin \psi_2 \cdot \sec^2 \vartheta_2 - B \cdot \cos \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2) - 2\Pi \cdot X_{s2} \cdot \sec^2 \vartheta_2] - \\ - \Gamma (2 \cdot B \cdot X_{s2} - \Pi \cdot \cos \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2) \times \\ \times [2 \cdot Z_{M2} \cdot (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B] - 4 \cdot Z_{M2} \cdot \Gamma \times \\ \times (\Gamma \cdot \sin \psi_2 \cdot \sec^2 \vartheta_2 - B \cdot \cos \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2) \times \\ \times [2 \cdot Z_{M2} \cdot (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B],$$

$$\dot{B}(X) = \frac{X_{s2}}{B},$$

$$\Pi = B^2 + R_2^2 - R_1^2,$$

$$B = Z_{s2} - \operatorname{tg} \vartheta_2 (X_{s2} \cdot \cos \psi_2 - Y_{s2} \cdot \sin \psi_2),$$

$$\Gamma = X_{s2} \cdot \sin \psi_2 + Y_{s2} \cdot \cos \psi_2.$$

Аналогично найдем и другие коэффициенты. В результате будем иметь

$$b = \left(Y_{M_2} + X_{s_2} \dot{X}_{M_2(y)} + Y_{s_2} \dot{Y}_{M_2(y)} + Z_{s_2} \dot{Z}_{M_2(y)} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_2^2 - F^2}} - \frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_1^2 - (B^2 + F)^2}} - \frac{1}{\sqrt{R_1^2 \cdot R_2^2 - (R_2^2 + F)^2}} \right] + \frac{F \cdot \dot{B}_{(y)}}{B} \left[\frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_1^2 - (B^2 + F)^2}} - \frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_2^2 - F^2}} \right] - \frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_1^2 - (B^2 + F)^2}}$$

Здесь

$$\dot{X}_{M_2(y)} = \pm \sin \psi_2 \frac{Z_{M_2} \cdot \sec^2 \vartheta_2}{\sqrt{R_2^2 - Z_{M_2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2}} \cdot \dot{Z}_{M_2(y)} - \cos \psi_2 \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot \dot{Z}_{M_2(y)},$$

$$\dot{Y}_{M_2(y)} = \pm \cos \psi_2 \frac{Z_{M_2} \cdot \sec^2 \vartheta_2}{\sqrt{R_2^2 - Z_{M_2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2}} \cdot \dot{Z}_{M_2(y)} + \sin \psi_2 \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot \dot{Z}_{M_2(y)},$$

$$\dot{Z}_{M_2(y)} = \frac{\cos \psi_2 [2Z_{M_2} (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B]^2 +$$

$$+ \Gamma^3 [4R_2^2 (B \cdot \sin \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 + \Gamma \cdot \cos \psi_2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) -$$

$$- 2\Pi \cdot Y_{s_2} \cdot \sec^2 \vartheta_2] - \Gamma (2B \cdot Y_{s_2} + \Pi \sin \psi_2 \operatorname{tg} \vartheta_2) \times$$

$$+ \Pi B \times$$

$$\times [2 \cdot Z_{M_2} (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B] - 4 \cdot Z_{M_2} \cdot \Gamma \times$$

$$\times (B^2 +$$

$$\times (B \cdot \sin \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 + \Gamma \cdot \cos \psi_2 \times$$

$$+ \Gamma^2 \times$$

$$\times \sec^2 \vartheta_2) [2 \cdot Z_{M_2} (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B]$$

$$\times \sec^2 \vartheta_2),$$

$$\dot{B}_{(y)} = \frac{Y_{s_2}}{B},$$

$$\begin{aligned}
 c = & \left(Z_{M_2} + X_{s_2} \cdot \dot{X}_{M_2(z)} + Y_{s_2} \cdot \dot{Y}_{M_2(z)} + Z_{s_2} \cdot \dot{Z}_{M_2(z)} \right) \times \\
 & \times \left[\frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_2^2 - F^2}} - \frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_1^2 - (B^2 + F)^2}} - \frac{1}{\sqrt{R_1^2 \cdot R_2^2 - (R_2^2 + F)^2}} \right] + \\
 & + \frac{F \cdot \dot{B}_{(z)}}{B} \left[\frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_1^2 - (B^2 + F)^2}} - \frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_2^2 - F^2}} \right] - \\
 & - \frac{B \cdot \dot{B}_{(z)}}{\sqrt{B^2 \cdot R_1^2 - (B^2 + F)^2}}.
 \end{aligned}$$

Здесь

$$\dot{X}_{M_2(z)} = \mp \sin \psi_2 \frac{Z_{M_2} \cdot \sec^2 \vartheta_2}{\sqrt{R_2^2 - Z_{M_2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2}} \cdot \dot{Z}_{M_2(z)} - \cos \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot \dot{Z}_{M_2(z)},$$

$$\dot{Y}_{M_2(z)} = \mp \cos \psi_2 \frac{Z_{M_2} \cdot \sec^2 \vartheta_2}{\sqrt{R_2^2 - Z_{M_2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2}} \cdot \dot{Z}_{M_2(z)} + \sin \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot \dot{Z}_{M_2(z)},$$

$$\begin{aligned}
 \dot{Z}_{M_2(z)} = & \frac{(2B \cdot Z_{s_2} + \Pi) [2Z_{M_2} (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B] +}{2 [2 \cdot Z_{M_2} (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B] \times} \\
 & + \frac{(4R_2^2 \cdot B - 2\Pi Z_{s_2} \cdot \sec^2 \vartheta_2) \cdot \Gamma^2 - 4Z_{M_2} \cdot B [2Z_{M_2} (B^2 +} \\
 & \times (B^2 + \\
 & + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B]}{+ \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2)},
 \end{aligned}$$

$$\dot{B}_{(z)} = \frac{Z_{s_2}}{B},$$

$$\begin{aligned}
 d = & \left(X_{s_2} \cdot \dot{X}_{M_2(\psi)} + Y_{s_2} \cdot \dot{Y}_{M_2(\psi)} + Z_{s_2} \cdot \dot{Z}_{M_2(\psi)} \right) \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_2^2 - F^2}} - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_1^2 - (B^2 + F)^2}} - \frac{1}{\sqrt{R_1^2 \cdot R_2^2 - (R_2^2 + F)^2}} \right].
 \end{aligned}$$

Здесь

$$\dot{X}_{M_2(\psi)} = \pm \cos \psi_2 \cdot \sqrt{R_2^2 - Z_{M_2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2} \mp$$

$$\mp \sin \psi_2 \frac{Z_{M_2} \cdot \sec^2 \vartheta_2}{\sqrt{R_2^2 - Z_{M_2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2}} \cdot \dot{Z}_{M_2(\psi)} + Z_{M_2} \cdot \sin \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 -$$

$$- \cos \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot \dot{Z}_{M_2(\psi)},$$

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{M2(\psi)} &= \mp \sin \psi_2 \sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2} \mp \\ &\mp \cos \psi_2 \cdot \frac{Z_{M2} \cdot \sec^2 \vartheta_2}{\sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2}} \dot{Z}_{M2(\psi)} + Z_{M2} \cdot \cos \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 + \\ &+ \sin \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot \dot{Z}_{M2(\psi)}, \\ \dot{Z}_{M2(\psi)} &= \frac{(X_{s2} \cdot \cos \psi_2 - Y_{s2} \cdot \sin \psi_2) [2Z_{M2} \cdot (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \\ &+ \Pi \cdot B]^2 + 4R_2^2 \cdot \Gamma^4 [B \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 + (X_{s2} \cdot \cos \psi_2 - Y_{s2} \cdot \sin \psi_2) \times \\ &\times \sec^2 \vartheta_2] - \Pi \cdot \Gamma^2 [2Z_{M2} \cdot (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B] \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 - \\ &- 4Z_{M2} \cdot \Gamma^2 [B \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 + (X_{s2} \cdot \cos \psi_2 - \\ &- Y_{s2} \cdot \sin \psi_2) \cdot \sec^2 \vartheta_2] [2 \cdot Z_{M2} (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B]}{2\Gamma [2 \cdot Z_{M2} (B^2 + \\ &+ \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \\ &\times \sec^2 \vartheta_2] - \Pi \cdot \Gamma^2 [2Z_{M2} \cdot (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B] \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 - \\ &- 4Z_{M2} \cdot \Gamma^2 [B \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 + (X_{s2} \cdot \cos \psi_2 - \\ &\times (B^2 + \Gamma^2 \times \\ &- Y_{s2} \cdot \sin \psi_2) \cdot \sec^2 \vartheta_2] [2 \cdot Z_{M2} (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B]}{\times \sec^2 \vartheta_2}, \\ i &= (X_{s2} \cdot \dot{X}_{M2(\vartheta)} + Y_{s2} \cdot \dot{Y}_{M2(\vartheta)} + Z_{s2} \cdot \dot{Z}_{M2(\vartheta)}) \left[\frac{1}{\sqrt{B^2 \cdot R_2^2 - F_2}} - \right. \\ &\left. - \frac{1}{\sqrt{B^2 R_1^2 - (B^2 + F)^2}} - \frac{1}{\sqrt{R_1^2 \cdot R_2^2 - (R_2^2 + F)^2}} \right]. \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} \dot{X}_{M2(\vartheta)} &= \mp \sin \psi_2 \frac{Z_{M2} \cdot \sec^2 \vartheta_2 (\dot{Z}_{M2(\vartheta)} + Z_{M2} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2)}{\sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2}} - \\ &- \cos \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot \dot{Z}_{M2(\vartheta)} - \cos \psi_2 \cdot \sec^2 \vartheta_2 \cdot Z_{M2}, \\ \dot{Y}_{M2(\vartheta)} &= \mp \cos \psi_2 \frac{Z_{M2} \cdot \sec^2 \vartheta_2 (\dot{Z}_{M2(\vartheta)} + Z_{M2} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2)}{\sqrt{R_2^2 - Z_{M2}^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2}} + \\ &+ \sin \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 \cdot \dot{Z}_{M2(\vartheta)} + \sin \psi_2 \cdot \sec^2 \vartheta_2 \cdot Z_{M2}, \\ \dot{Z}_{M2(\vartheta)} &= \sec^2 \vartheta_2 \frac{[(\Pi + 4Z_{M2} \cdot B) (X_{s2} \cdot \cos \psi_2 - Y_{s2} \cdot \sin \psi_2) - \\ &- 2 [2Z_{M2} (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -4Z_{M2} \cdot \Gamma^2 \operatorname{tg} \vartheta_2] \cdot [2Z_{M2} (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2) + \Pi \cdot B] - \\
 & \qquad \qquad \qquad + \Pi \cdot B] \times \\
 & -\Gamma^2 [4R_2^2 \cdot B (X_{S2} \cdot \cos \psi_2 - Y_{S2} \cdot \sin \psi_2) - (4R_2^2 \cdot \Gamma^2 + \Pi^2) \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2] \\
 & \qquad \qquad \qquad \times (B^2 + \Gamma^2 \cdot \sec^2 \vartheta_2)
 \end{aligned}$$

Используя уравнения поправок, составим и решим нормальные уравнения. Решение нормальных уравнений будем выполнять методом итераций до тех пор, пока разности поправок к составляющим базиса и угловым элементам ориентирования антенны, полученные в двух последних приближениях, будут равны или меньше допустимых значений.

Определение пространственных геодезических координат объекта

Определение прямоугольных геодезических координат объекта выполним с использованием уже известных формул (VI. 6) геодезического ориентирования одиночного снимка. Для определения абсолютной высоты объекта воспользуемся построениями рис. 67, из которых следует

$$A_{об} = Z_{об} - Z_{оп. т} + A_{оп. т},$$

где $Z_{об}$, $Z_{оп. т}$ — аппликаты объекта и опорной точки.

В соответствии с выражением для Z из уравнений (VI.31) заменим в полученной формуле значения $Z_{об}$ и $Z_{оп. т}$. В результате замены получим

$$A_{об} = Z_{M2. об} - Z_{M2. оп. т} + A_{оп. т}. \quad (VI.37)$$

Выполнение операции по нахождению составляющих базиса и угловых элементов ориентирования антенны позволяет получить исправленные значения X_{S2} , Y_{S2} , Z_{S2} , ψ_2 , ϑ_2 . В то же время

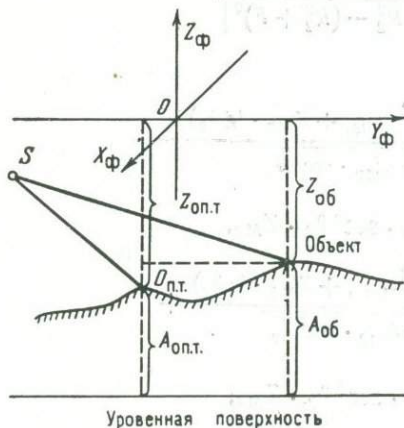


Рис. 67. Связь между абсолютной высотой объекта и абсолютной высотой опорной точки

для решения уравнений (VI.6), (VI.31) и (VI.37) необходимо знать не только эти элементы, но также навигационные параметры, элементы ориентирования антенны и снимка и постоянные параметры РЛС $X_{г.с}$, $Y_{г.с}$, A , M_x , Y_S , Z_S в левой или нижней точке съемки и абсолютную высоту опорной точки.

Координаты Y_S и Z_S являются составной частью элементов базиса, и их значения, усредненные для всей площади снимка, присутствуют в найденных величинах X_{S2} , Y_{S2} , Z_{S2} . Поэтому при решении уравнений (VI.31) значения Y_S , Z_S можно принять равными нулю.

Любая опорная точка позволяет составить два уравнения плоских координат и одно уравнение аппликат. Следовательно, для определения всех неизвестных элементов достаточно иметь две опорные точки. При этом для одной из них должны быть известны координаты X_r, Y_r и абсолютная высота $A_{оп.т.}$, а для другой достаточно иметь только координаты X_r, Y_r .

Считая, что приближенные значения навигационных параметров, элементов ориентирования антенны и снимка и постоянных параметров РЛС известны, определим по формулам (VI.31) и (VI.6) приближенные геодезические координаты $X_{г.оп.т.}, Y_{г.оп.т.}$ опорных точек.

Затем, пользуясь рассмотренным итерационным методом, вычисляем исправленные значения параметров $X_{г.с.}, Y_{г.с.}, A$ и M_x . После этого, подставив в формулы (VI.31) и (VI.6) координаты объекта, приведенные к системе координат левого (или нижнего) снимка, а также найденные значения $X_{г.с.}, Y_{г.с.}, A$ и M_x , получим искомые геодезические координаты объекта местности.

Абсолютную высоту объекта вычислим в соответствии с уравнением (VI.37) по известной абсолютной высоте одной из опорных точек.

1. *Аковецкий В. И.* Обзор состояния радиолокационной аэросъемки за рубежом.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1968, вып. 4, с. 142—148.
2. *Аковецкий В. И.* К вопросу о переходе от координат радиолокационного изображения к геодезическим координатам.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1968, вып. 5, с. 105—112.
3. *Аковецкий В. И.* Нефотграфическая аэросъемка.— Итоги науки и техники, 1976, вып. 12, с. 7—84.
4. *Аксенов М. А.* Экспериментальное исследование рассеяния электромагнитных волн на периодически неровных поверхностях.— Радиотехника и электроника, 1960, № 5, с. 782.
5. *Аллен Д. Л.* Перспективы развития фазированных антенных решеток.— Зарубежная радиоэлектроника, 1966, № 7, с. 98—106.
6. *Александров С. Г., Федоров Р. Е.* Советские спутники и космические корабли. М., изд-во АН СССР, 1961.
7. *Альперт Я. Л.* Распространение радиоволн и ионосфера. М., Советское радио, 1960.
8. *Антенные* решетки. Обзор под ред. Л. С. Бененсона. М., Советское радио, 1966.
9. А. с. 403952 [СССР]. Способ определения координат объектов на аэроснимке/ Авт. изобрет. В. И. Аковецкий, В. А. Карнулин, Ю. Н. Корнеев, В. Н. Поляков.— Заявл. 30.IV.72, № 1779496/18—10. Оpubл. в Б. И., 1973, № 43.
10. *Аэрометоды геологических исследований/ С. И. Стрельников, Б. П. Нявро, Н. А. Гусев и др.—* В кн.: Лаборатория аэрометодов. М., 1971, с. 674—681.
11. *Бабаев А. Б.* Экспериментальные исследования характеристик отражения от неровных земных поверхностей.— Труды Московского энергетического института, вып. 10, 1972.
12. *Бакулев П. А.* Радиолокация движущихся целей. М., Советское радио, 1964.
13. *Бартон Д. К., Михельсон М.* Радиолокационная техника семидесятих годов.— Зарубежная радиоэлектроника, 1967, № 8, с. 3—11.
14. *Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П.* Теория оптических систем. М., Машиностроение, 1973.
15. *Бобир Н. Я.* Фотограмметрия. М., Недра, 1965.
16. *Богомолов Л. А.* Дешифрирование аэроснимков. М., Недра, 1976.
17. *Бортовая* радиолокационная система с передачей на Землю.— Электроника, № 40, 1962, с. 12—13.
18. *Браун В. М.* Радиолокационная станция с синтезированной апертурой.— Зарубежная радиоэлектроника, 1967, № 12, с. 3—27.
19. *Брусо Г., Спиз Е.* Сверхнаправленность и сверхвысокое усилие антенны.— Зарубежная радиоэлектроника. 1967, № 12, с. 4—20.

20. *Буренин Н. И.* Радиолокационные станции с синтезированной антенной. М., Советское радио, 1972.
21. *Вениш.* Расчет отражения радиолокационных сигналов от Земли по топографической карте местности.— Зарубежная радиоэлектроника, 1972, № 4, с. 19—29.
22. *Вильямс Р. Е.* Частично-когерентная обработка сигнала при помощи оптических устройств.— Зарубежная радиоэлектроника, 1966, № 12, с. 18—33.
23. *Волосов Д. С., Цивкин М. В.* Теория и расчет светооптических систем. М., Искусство, 1960.
24. *Вудворт Ф. И.* Теория вероятности и теория информации с применением в радиолокации. М., Советское радио, 1955.
25. *Гольдман Л. М.* Вопросы дешифрирования аэроснимков на XI фотограмметрическом конгрессе.— Аэрометоды, 1970, вып. 4, с. 27.—30.
26. *Гольцман Ф. М.* Основы теории интерференционного приема регулярных волн. М., Наука, 1964.
27. *Гоуфер В. Г.* Оптическая обработка сигналов импульсно-доплеровских радиолокационных станций.— Зарубежная радиоэлектроника, 1963, № 4, с. 63—72.
28. *Глушков В. М.* Введение в кибернетику. Киев, Техника, 1964.
29. *Грин К. А., Моллер Р. Т.* Влияние нормального распределения случайных фазовых ошибок на диаграмму направленности антенны решеток с синтезированным раскрытием.— Зарубежная радиоэлектроника, 1963, № 2, с. 21—33.
30. *Гринберг.* Разведывательная радиолокационная станция с высоким разрешением для спутников.— Зарубежная радиоэлектроника, 1968, № 9, с. 3—26.
31. *Дальберджер Л. Х.* Самолетная радиолокационная станция бокового обзора с высокой разрешающей способностью.— Электроника, вып. 12, 1963, с. 8—10.
32. *Девеле Д. А.* Анализ характеристики радиолокационной картографической системы с синтезированной антенной.— Зарубежная радиоэлектроника, 1965, № 5, с. 30—41.
33. *Девеле Д. А.* Влияние случайных фазовых ошибок на угловую разрешающую способность радиолокационных систем с синтезированным раскрытием.— Зарубежная радиоэлектроника. 1965, № 1, с. 18—31.
34. *Джерелс Е., Персонс А.* Применение интерферометра в радиолокации.— Зарубежная радиоэлектроника. 1962, № 8, с. 3—14.
35. *Джозеф Р. Д.* Предсказание характеристики перцептрона.— Кибернетический сборник, 1962, № 4; с. 5—25.
36. *Дифранко Д. В., Рубин В. Д.* Анализ искажений при обработке радиолокационного сигнала.— Зарубежная радиоэлектроника, 1963, № 9, с. 35—50.
37. *Дифранко Д. В., Рубин В. Д.* Пространственная разрешающая способность РЛС с многоэлементными антеннами.— Зарубежная радиоэлектроника, 1966, № 12, с. 3—17.
38. *Долуханов М. П.* Распространение радиоволн. М., Связь, 1972.
39. *Дрейн С. Д., Мак-Илвина Д. Ф.* Применение концепции пространствен-

- ных частот к проблеме радиоэлектронного картографирования земной поверхности.— Зарубежная радиоэлектроника, 1966, № 4, с. 32—47.
40. Дравович С. Применение теории сигналов к антеннам.— Зарубежная радиоэлектроника, 1965, № 12, с. 3—16.
41. Дулевич В. Е. Теоретические основы радиолокации. М., Советское радио, 1964.
42. Ещенко С. Е., Ланде Б. Ш. К вопросу о радиолокационном изображении морской поверхности.— Радиотехника и электроника, 1972, вып. 8, 1590—1597.
43. Журкин И. Г., Корнеев Ю. Н. Соотношение координат точек местности и координат точек изображения в радиолокационных станциях бокового обзора с вдольфокальной антенной.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1974, вып. 6, с. 93—101.
44. Журкин И. Г., Корнеев Ю. Н. Измерительные свойства радиолокационных снимков.— Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1975, вып. 6, с. 93—101.
45. Зубкович С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М., Советское радио, 1968.
46. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. М., Советское радио, 1966.
47. Катрона Д., Холл Г. Сравнение различных способов достижения высокой разрешающей способности.— Зарубежная радиоэлектроника, 1963, № 2, с. 3—7.
48. Келл Р. и Росс Р. Эффективная площадь рассеяния — В кн.: Справочник по радиолокации. Под ред. Сколнина. М., 1967, с. 356—397.
49. Козлов В. В., Сафонов Д. С. Возможности использования радиолокационной аэросъемки при геологических исследованиях.— Бюлл. научно-технической информации. Сер. Методика съемки, 1966, № 1, с. 40—42.
50. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. Перевод с английского под редакцией Ю. И. Островского. М., Мир, 1973.
51. Комаров В. Б. Основные направления развития аэрометодов в СССР.— Аэрометоды, 1966, вып. 3, с. 21—24.
52. Комаров В. Б., Старостин В. А., Няро Б. П. Радиолокационная аэросъемка и ее значение в комплексе аэро- и космических методов геологических исследований.— В сб. Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология, 1973, с. 111—119.
53. Комар В. Г., Бернштейн Н. Д. Важнейшие задачи развития узкоплечного кинематографа.— Техника кино и телевидения, 1965, № 5, с. 9—17.
54. Кондратенков Г. С. Когерентные оптические системы. М., Советское радио, 1972.
55. Корнеев Ю. Н. Аналитический метод фотограмметрической обработки одиночного радиолокационного снимка.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1975, вып. № 2, с. 115—124.
56. Климатические характеристики облачности (за период МГГ и МГС, северное полушарие, вып. № 2). М., 1965, с. 119.
57. Кравец В. Я., Аковецкий В. И., Донсков Г. Н. Некоторые вопросы дешифрирования радиолокационных изображений в картографических целях.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1974, вып. № 6, с. 57—65.

58. *Крони Д., Уоллис П. Р.* Система подавления боковых лепестков диаграммы направленности антенны первичного радиолокатора.— Зарубежная радиоэлектроника, 1966, № 5, с. 15—17.
59. *Крупенио Н. И.* Радиолокационные исследования Луны. М., Наука, 1971.
60. *Ландсман С.* Достижения в разработке радиолокационных антенн.— Зарубежная радиоэлектроника, 1965, № 12, с. 130—139.
61. *Левинз Д.* Радарграмметрия, глава 3, часть 2. Пособие по фотограмметрии, перевод с английского под общей ред. В. И. Кораблева, М., Недра, 1971.
62. *Левин Б. В.* Теоретические основы статистической радиотехники, т. I. М., Советское радио, 1966.
63. *Лейт, Ингалс.* Обработка сигналов РЛС с синтезированием апертуры методом голографии.— Зарубежная радиоэлектроника, 1968, № 2, с. 3—12.
64. *Лейт.* Методы оптической обработки сигналов с одновременным сжатием импульсов и сужением луча антенны.— Зарубежная радиоэлектроника, 1970, № 2, с. 25—36.
65. *Листков К. М., Трофимов К. Н.* Радио и радиолокационная техника и их применение. Воениздат. М., 1960.
66. *Литвак И. И., Ломов Б. Ф., Соловейчик И. Е.* Основы построения аппаратуры отображения в автоматизированных системах. М., Советское радио, 1975.
67. *Лихтерман В. А., Лоцилов В. С.* Анализ радиолокационных аэроснимков морских льдов с помощью оптического фильтра.— Научные труды Ленинградского горного института. 1971, вып. 4, с. 3—5.
68. *Лобанов А. Н.* Аналитическая фотограмметрия. М., Недра, 1972.
69. *Мак-Корд Х. Л.* Эквивалентность трех подходов к выводу формул для диаграммы направленности синтезированных антенных решеток и к определению способов анализа и обработки принимаемых сигналов.— Зарубежная радиоэлектроника, 1963, № 2, с. 34—40.
70. *Марешаль А., Франсон М.* Структура оптического изображения., М, Мир, 1964.
71. *Михайлов В. Я.* Аэрофотография и общие основы фотографии. М., Геозедиздат, 1959.
72. *Мишель.* Отражение радиолокационных эхо-сигналов от морской поверхности (модели и экспериментальные результаты).— Зарубежная радиоэлектроника, 1972, № 7, с. 13—26.
73. *Моффат Д.* Номограмма для определения высот возвышенности по радиолокационным картам.— Зарубежная радиоэлектроника, 1960, № 5, с. 58—66.
74. *Мур, Томан.* Использование радиолокационной станции для исследования земной поверхности.— Зарубежная радиоэлектроника, 1972, № 2, с. 3—21.
75. *Мур Р.* Отражение от земной поверхности.— В кн.: Справочник по радиолокации. Под редакцией М. Сколника. Том I. М., 1976, с. 266—319.
76. *Неронский Л. Б.* О точности оценки эффективной площади рассеяния протяженных целей в когерентных и некогерентных РЛС бокового обзора.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая, 1975, вып. 11, с. 10—22.

77. *Неронский Л. Б., Салганик П. О.* Статистические характеристики различения протяженных объектов радиолокаторами землеобзора.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая, 1975, вып. 1, с. 16—25.
78. *Неронский Л. Б.* Оценка разрешающей способности РЛС с синтезированной антенной по переходным функциям и интервалу корреляции выходного сигнала.— Радиотехника и электроника, 1975, № 2, с. 271—279.
79. *Неронский Л. Б.* Прохождение сигнала и шума через приемное устройство с нелинейной амплитудной характеристикой.— Изв. вузов. Радиотехника, 1964, № 6, с. 703—712.
80. *Неронский Л. Б.* Сравнение методов измерения разрешающей способности картографических РЛС.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая, 1976, вып. 4, с. 50—55.
81. *Одинцов В. А.* Радионавигация летательных аппаратов. М., Машиностроение, 1968.
82. *Пен В. А.* Точность воспроизведения при обработке радиолокационных сигналов.— Зарубежная радиоэлектроника, 1963, № 4, с. 23—43.
83. *Порцелло.* Фазовые ошибки РЛС с синтезированными апертурами, вносимые турбулентностями атмосферы.— Зарубежная радиоэлектроника, 1972, № 10, с. 167—168.
84. *Радиолокационные устройства.* Под редакцией Григорин-Рябова. М., Советское радио, 1970.
85. *Радиолокационная станция с высокой разрешающей способностью для наблюдения за полем боя/ Д. Катрона, В. Е. Вивиан, Е. Н. Лейт, Г. Челл.* — Зарубежная радиоэлектроника, 1961, № 12, с. 56—78.
86. *Радиолокационные станции бокового обзора/ А. П. Реутов, В. А. Михайлов, Г. С. Кондратенков, Б. В. Бойко.* М., Советское радио, 1970.
87. *Ревилон Г.* Новые принципы создания РЛС. Синтезированные антенны, их применение в РЛС бокового обзора.— Зарубежная радиоэлектроника, 1966, № 6, с. 3—13.
88. *Розенблатт Ф.* Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга. М., Издательство иностранной лит-ры, 1965.
89. *РЛС бокового обзора с многократным наложением снимков.* ТИИЭР, 1972, № 10, с. 167—168.
90. *Салганик П. О.* К расчету разрешающей способности РЛС по пространственным координатам.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая, 1974, вып. 1, с. 3—19.
91. *Связь параметров волнения с пространственным спектром аэрофотоснимков и радиолокационных изображений поверхности моря/ И. М. Бондаренко, А. А. Загородников, В. С. Лоцилов, К. Б. Чельшев.*— Океанология, 1972, № 6, с. 1099—1107.
92. *Сколник М.* Отражение радиолокационного сигнала от морской поверхности.— В кн.: Справочник по радиолокации под ред. М. М. Сколника. М., 1976, с. 320—355.
93. *Современная радиолокация.* Пер. с английского под ред. Ю. Б. Кобзарева. М., Советское радио, 1969.
94. *Старк, Тюттер, Саяр.* Оптическая обработка сигналов РЛС с использованием дифракции Френеля.— Зарубежная радиоэлектроника, 1973, № 6, с. 36—59.

95. *Стрельников С. И.* Некоторые вопросы методики использования материалов радиолокационной аэро съемки при геологических исследованиях.— Советская геология, № 3, 1972, с. 56—77.
96. *Тейлер Г. Л.* Метод получения радиолокационного изображения поверхности планет при помощи разнесенной системы с непрерывным излучением.— Зарубежная радиоэлектроника, 1967, № 9, с. 19—31.
97. *Транк.* Радиолокационные характеристики нерелеевских отражений от морской поверхности.— Зарубежная радиоэлектроника, 1973, № 2, с. 3—19.
98. *Фотоотриангуляция* с применением электронной цифровой вычислительной машины/ *А. Н. Лобанов, Р. П. Овсянников, В. П. Дубиновский и др. М., Недра, 1967.*
99. *Харгер Р. О.* Оптимизация функции неопределенности формы зондирующего сигнала и диаграммы направленности антенны в РЛС бокового обзора с синтезированным раскрывом.— Зарубежная радиоэлектроника, 1966, № 6, с. 14—35.
100. *Хеймиллер Р.* Теория и расчет диаграммы направленности синтезированных антенных решеток.— Зарубежная радиоэлектроника, 1963, № 2, с. 8—20.
101. *Черный Ф. Б.* Распространение радиоволн. М., Советское радио, 1972.
102. *Шашлов Б. А.* Теория фотографического процесса. М., Книга, 1971.
103. *Ширман Я. Д., Голиков В. Н.* Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерение их параметров. М., Советское радио, 1964.
104. *Шифрин Я. С., Корниенко Л. Г.* Влияние неоднородностей атмосферы на коэффициент направленного действия.— Радиотехника и электроника, 1967, № 2, с. 237—243.
105. *W. R. Ambrose.* A radar image correlation viewer.— Photogramm. Eng. 33, 1967, № 2, p. 211—214.
106. *A new photographing copying film,* — Product Eng., r. IV, v. 36, 1965. № 1, p. 44—48.
107. *Arm M., Lambert L., Weissman I.* Optical correlation technique for radar pulse compensation.— Proc. IEEE, r. VII, v. 52, 1964, № 7, p. 847—853.
108. *Bair G. L., Carlson G. E.* Height measurement with stereoradar.— Photogramm. Eng. and Remote sensing, v. 41, 1975, № 2, p. 167—176.
109. *Bakalawicz M.* Possibilites d'utilisation de photographies Acriennes et d'enregistrements sonner et radar — scanner dans l'edute d'un massif Karstique. — Ann. speleol, v. 28, 1973, № 1, s. 131—134.
110. *Barber E.* How fiber optics imprave the resolution of radar mapping system.— Electronics Eng. v. 8, 1964, № 5, p. 30—33.
111. *Barr David I., Miles Robert D.* SLAR imagery and site selection.— Photogramm. Eng., v. 36, 1970, № 11, p. 1155—1170.
112. *Blanchet G.* les applications militaires de la photographie aerienne.— Photographic aerienne. Paris, 1965, p. 137—144.
113. *Bosmane R. and oth.* Transformation of points from side looking radar images into the map system — Bildmessing and Iustbildwesen, v. 40, 1972. № 4, p. 183—188.
114. *Camera takes projects pictures in light seconds.*— Sci. mews Letters, v. 86, 1964, № 7, p. 104—106.

115. *Camerron H. L.* Ice — cover surveys in the Duff of St. Lawrence by radar.— Photogramm. Eng., v. 30, 1964, № 5, p. 833—841.
116. *Cathey W. T.* Three — dimensional wavefront reconstruction using a phase hologram. — L. Opt. Soc. America, v. 55, 1965, № 4, p. 457.
117. *Campbell I. R.* Back Scattering characteristics of Jand and Sea of X — Band.— Proc. Nat. Cont. on Aeronautical Electronics, 1958, № 5, p. 107—116.
118. *Care Arlando.* Tactical Image Interpretation Facility.— Photogramm. Eng., v. XXXIII, 1967, № 1, p. 92—99.
119. *Cecil Brownlow.* Viet Operations Sprir New A — 6 Interest. — Aviation week and space Technology, v. 86, 1967, № 17, p. 67—69.
120. *Chang D.* Degradation effects of arbitrary phase errors on high — resolution radar performance.— Proc. I, v. VIII, 1964, № 8, p. 1375—1378.
121. *Chevellier Raymond, Duy Max.* Les travaux de la commission VII. Phofointerpretation.— Bull. soc. trans. photogramm., 1969, № 33, p. 50—52.
122. *Clark Malcolm M.* Comparison of SLAR imagu and smollscab, low — sum aerial photographs.— Bull. Geol. Soc. Amer., v. 82, 1971, № 6, p. 1735—1742.
123. *Cliftord I. Crandall* Advanced Radar Map compilation Equipment.— Photogramm. Eng. v. XXIX, 1963, № 6, p. 947 — 955.
124. *Cliftord I., Cramdall.* Radar mapping in Panama.— Photogramm. Eng., v. 35, 1969, № 7, p. 641—646.
125. *Dalke George W. Me loy Rager M.* Regional slopes with nonstereo radar.— Photogramm. Eng. v. 35, 1969, №, 5 p. 446—452.
126. *Davies D. H.* Radar — a new mapping device.— Ingenieur (Ned), v. 82, 1970, № 33, p. 71—80.
127. *Deane R. A.* Side — Looking Radar Systems and Their Potential Application to Earth — Resouces Surveys. — European space Researchorganisa-tion, Neuilly, France, 1973.
128. *Dellwig I. F. and oth.* Technique for producing a pseudo three dimensional effect with monoscopic radar imagery.— Photogramm. Eng., 1970, № 36, p. 977—988.
129. *Dellwig I. F. and oth.* The Potential of Radar in geol. explora-tion.— Proceed 5-th symp. rem. sens. environment, Michigan, 1968.
130. *Dellwig Ionis F., Mc. Canley Lames.* Disenssion of the paper: «com-parison of SLAR images and smoll — seale, low — sum aerial «photographs» by M. M. Clark — Authors reply.— Bull. Geol. Soc. Amer., v. 84, 1973, № 1, p. 357—362.
131. *Derenyi E. E.* SLAR geometric test — Photogramm. Eng., v. 40, 1974, № 5, 594—604.
132. *Dickey F. M. et al.* Moisture dependency of radar backsatter from irrigated and non — irrigated field at 400 MHz and 13, 3bH₂. IEEE trans. on CE, v. 12, 1967, № 1, p. 19—22.
133. *Donald U.* Wise Radar Geology and Pseudo — Geology on an Appala-chion Piedmont Cros. Section.— Photogramm. Eng., v. 33, 1967, № 7, p. 752—761.

134. *Fenston Ken.* New tools for Keeping on eye on the forest: radar, infrared and 30 photos.—*Camad Puldp. and Paper Jnd*, v. 22, 1969, № 10, p. 68—70.
135. *Forrest R. B., Hattaway D. P.* LR—1 portable linedrawing rectifier.—*Int. Arch. Photogramm.* v. 17, 1969, № 5, p. 88—92.
136. *Freedman I.* Resolution in Radar system—*Proc. IRE*, v. 39, 1951, p. 813—818.
137. *Geier Franz.* Beitrag Zur Geometric des Radarbildes. «Bildmess und Luftbildw.», v. 39, 1971, № 1, p. 54—55.
138. *George W. Dalke and oth.* Regional slopes with Non — stereo Radar.—*Photogramm. Eng.*, 1967, № 7, 36—38.
139. *George I., Lapradge and oth.* Elevation from Radar Imagery.—*Photogramm. Eng.*, 1969, № 4, p. 366—371.
140. *George I., Lapradge.* An analytical and experimental study of stereo for radar.—*Photogramm. Eng.*, v. 29, 1963, № 2, p. 294—300.
141. *George H., Rosemfield.* Stereo Radar Teehniguls.—*Photogramm. Eng.*, v. 34, 1968, № 6, p. 586—594.
142. *Graham L. C.* Flight planning for stereoradar mapping.—*Proc. Amer. Soc. Photogram.* 41 st. 1975, p. 513—527.
143. *Grandall C. I.* Advanced radar map. comilation equipment.—*Photogramm. Eng.*, v. 29, 1963, № 6, p. 36—44.
144. *Hansen R. C., Acoustics.* Optics and electromagnetics.—*Microwave I.*, v. 8, 1965, № 3, p. 16—18.
145. *Harold C. Macdonald and oth.* Geologic Evaluation by Radar of NASA Sedimentary Test Site.—*IEEE. Transactions on Geosence Electronics.* 1967, № 3, p. 72—78.
146. *Harger R. O.* An analsis of recorder motion errors in optical procesing.—*Appl. Optics*, 1965, № 4, p. 383—385.
147. *Hattaway D. P.* LR-2 new portable line rectifier.—*American Society of Photogrammetry*, 1970, № 3, p. 1—6.
148. *Hocjer W. C.* Optical processing of simulated LIF pulse—Doppler signals.—*IRE Trans.*, 1962, № 2, p. 174—178.
149. *Hoffman Pamela R.* Interpretation of radar slope photographs.—*Photogramm. Eng.*, v. 20, 1954, p. 406—411.
150. *Hoffman Pamela R.* Photogrammetric applications on radar slope interpretation.—*Photogramm. Eng.*, v. 24, 1958, p. 756—764.
151. *Hoffman Pamela R.* Prograss and problemsin Radar photo interpretation.—*Photogramm. Eng.* v. 26, 1960, p. 612—618.
152. *Holmes W. S.* Antomatic Photointerpretation and Target Locotion.—*Proceedings of The IEEE*, v. 54, 1966, № 12, p. 44—56.
153. *Lowinal of the Soe for Motion Picture Bc Television Enigneers.* v. 69, 1960, № 1, (10 crat).
154. *Katz I.* Wavelength Dependence of Radar Reflectivity of the Earth and the Moon.—*Journal of geophysical Research*, v. 71, 1966, № 2, p. 361—366.
155. *Kozma A., Leith E. N., Massey N. G.* Tilted — Plane Optical Processor.—*Applied Optics*, v. 11, 1972, № 8, p. 1766 — 1777.
156. *Kiefer Kalph W. Scherz. James P.* Applications of airborne remote sensing technology.—*ISurv. and Mapp Div. proc. Amer. soc. Civ. Eng.*, v. 96, 1970, № 1, p. 57—80.

157. *Kock Winston E.* Holography can help radar find new performance horizons.—*Electronics*, v. 43, 1970, p. 80—85, 87, 88.
158. *La Prade G. L.* Subjective considerations for stereo radar.—*American society of Photogrammetry*, 1970, № 3, p. 10—12.
159. *Larson Richard Wand oth.* A microwave hologram radar system.—*IEEE Trans. Aerospace and Electrons Syst.*, v. 8, 1972, № 2, 208—211.
160. *Leberl F. Varschlage.* Zur instrumentellen Entzerrung von alfidun-genimit Scitwärts —Radar (SLAR) and Infrarot —Linicnabstast Systemen (IRLS). *Bildmess und Luftbildw.*, v. 39, 1971, № 2, p. 85—90.
161. *Leonardo Earl S.* Capabilities and limitation of remote sensors.—*Photogramm Eng.*, v. 30, 1964, № 6, p. 1005—1010.
162. *Leonardo Earl S.* An application of photogrammetry to radar research.—*Photogramm. Eng.*, v. 25, 1959, p. 376—380.
163. *Leonardo Earl S.* Comparison of imaging geometry for radar and camera photographs.—*Photogramm. Eng.*, v. 25, 1963, p. 287—293.
164. *Levine D.* *Radargrammetry.* New York — Toronto — London. Mc. Grans — Hill Book Co. Inc. 1960.
165. *Lewis Anthony I., Macdonald Harold C.* Interpretive and mosaiking problems of SLAR imagery.—*Remote Sens Environ.*, v. 1, 1970, № 4, p. 231—236.
166. *Lewis Anthony I., Waite William P.* Radar Shadow frequency.—*Photogramm Eng.*, v. 39, 1973, № 2, p. 189—196.
167. *Lewis Anthony I., Macdonald Harold C.* Mapping of mangrove and perpendicularoriented shell. reefs in Southeastern Panama with side —lloking radar. —*Phatogrammetria*, v. 28, 1972, № 6, 187—199.
168. *Loor D. P.* De Possibilities and uses of radar and ther mal infrared systems.—*Photogrammetria*, v. 24, 1964, № 2, p. 143—148.
169. *Lyon R. I. P and oth.* Pseudo radar.—*Photogramm. Eng.*, v. 36, 1970, № 12, p. 1257—1261.
170. *Mason.* Army wants surveillance, armament gear for air arm.—*Electronics*, v. 36, 1963, № 48, p. 10—11.
171. *Mike Isuzse.* A legifelmeres legujeb! modszerei.—*Dead es kartogr.*, v. 21, 1969, № 6, p. 440—444.
172. *Moore R. K.* Heights from simultaneous radar and infrared.—*Photogramm. Eng.*, v. 35, 1969, № 7, p. 649—651.
173. *Moore R. K., Thomann G. C.* Imaging Radar for geoscience Use.—*IEE Trans. Geosce. Electron*, v. 9, 1971, № 3, 155—164.
174. *Moore R. K.* Radar Remote Sensing in Giology.—*Bioscience* 1967, № 6, p. 384—390.
175. *Moore R. K., Waite W. P.* Octave bandwidth microwaife spectral response.—*Photogramm. Eng.*, v. 39, 1973, № 10, p. 1051—1053.
176. *Moore T. H., Krittman I. M.* Sensing characteristics of an electrostatine recording camera.—*IEEE Trans on Electron Devices*, 1964, № 4, p. 183—190.
177. *Morain S. A., Simonell D. S. K* —band Radar in vegetation map-ping.—*Photogramm. Eng.*, v. 33, 1967, № 7, p. 730.

178. *Norvelle F. R.* As-11A Radar Programm.—Photogramm. Eng., v, 38, 1972, № 1, p. 77—82.
179. *Newton A. R.* Pseudostereoscopy with radar imagery.—Photogramm. Eng., v, 39, 1973, № 10.
180. *Olnic Marinco.* Novi postupci aeroprospekcije i njehove moguenosti primjene u geoloskim instrazivanjima.—Dead list. v. 23, 1969, № 7—12, p, 184—194.
181. *Paolantonio anthony.* Difference meas urements in automatic photointerpretation of surveillace Maps.—Inform. Display, v. 6, 1969, № 2, p. 41—44.
182. *Power R. E.* Side—Looking Radar Provides a new tool for Topographic and Geological Surveys.—Westinghouse Eng., v. 32, 1972, № 6, p. 176—181.
183. *Penn W. A.* Signal Fidelity in Radar Prossessing.—IRE Trans on Military Electronics, 1962, № 2, p. 204—218.
184. *Pursglove D.* Electronics expands Vision of sky spies.—Electronic Design, v. 21, 1965, № 13, № 21, p. 26—29.
185. *Richard A. Bradie* SLAR Imageny for sea Ice Studies.—Photogramm. Eng., v. 33, 1967, № 7, p. 36—42.
186. *Renner Karl.* Beitrag Zur Thloric und den verfahren der Photogrammetrischen Auswertung.—Osterr. Z. Vermessungswesen, v. 57, 1969, № 4, 123—131.
187. *Rid Harold T., Miles Robert D.* Multinsor analysis fo soils mapping.—Highway Res. Board Spec. Rept, 1969, № 102, p. 22—37.
188. *Ruck G. T.* Radar Crossection Handbook, v. 2, London, 1970, p. 948.
189. *R. Harold T. Miles Robert D.* automatic interpretation of Eterran features.—Photogramm. Eng., 1969, v. 35, № 2, p. 153—154.
190. *Rosenfeld,* Azriel avtomatic Imagery Interpretation.—Photogrammetri. Eng., v. 31, 1965, № 2, p. 240—242.
191. *Robert F. Holmes.* Engineering Materials and Side Looking Radar.—Photogramm. Eng. v. 33, 1967, № 7, p. 767—770.
192. *Security* has been lifted on radar mapping systems.—Electrical Eng., 1960, № 6, p. 13—18.
193. *Sherwin C. W.* and oth Some Early Developments in Synthetic aperture Radar Sistem.—IRE Trans on Military Electronics, 1962, № 2, p. 111—115.
194. *Side-Look* Radar: geologists, new oil—hunting.—Oil and Gas Journal, v. 68, 1970, № 50, p. 134—135.
195. *Side-Looking.* Radar Takes Aerial Photos.—Avedtion Week, 1960, № 16, p. 94—98.
196. *Side-Look* radar mapping survey.—Mining I, 1970, 274, № 70, p. 14—17.
197. *Side Looking* radar used in civilmapping.—Aviat —Week and space Technol, v. 90, 1969, № 24, p. 95—97.
198. *Signal.* v. 23, 1968, № 3, p. 96, 7—16.
199. *Simonett Daved S.* Remote sensingwith imaging radar, a review.—Geoforum, 1970, № 2, 61—74.
200. *Steiner D.* Automation in Photo interpretation.—Geoforum, 1970, № 2, 75—88.
201. *Stillwell James E.* Radar network adjustment.—Photodramm Eng., v. 29, 1963, № 6, p. 955—959.

202. Taylor R. C. Terrain Return measurements at X, K, u and Ka Bands.— IRE Nat. Conv. Record, part 1, v. 111, 1959, pp. 19—26.
203. *T - I reveals* startling X — band radar.— Missiles and Rockets, v. 6, 1960, № 14, p. 24—26.
204. Vermeer I. Interpretatione vanradaren infra—roodbeelden.— Ingenieur (Ned), v. 82, 1970, № 33, p. 87—91.
205. Verstappen H. Th. Commison VII — Photo interpretation Report 1960—1964.— Photogrammetria, v. 19, 1962—1964, № 14, p. 137—143.
206. Viksne—Andris, Liston Thomas C. SappCecil D. S. L. R. reconnais. sance of Panama.— Photogramm. Eng. v. 36, 1970, № 3, 253—259.
207. Wheelec M. S., Badertschec K. A. Radar mapping in heavy rain with arthogonal radar modes at x- and k_A -band. — Proc. Nat. aerospace Electron. Conf. Dayton. Ohio, New York, 1970, № 4, p. 72—80.
208. Waksberg A. and ohi. Study of a CO₂ laser radar imaging system. — Can. Aeronant and Space I, v. 17, 1971, № 10, 423—424.
209. Wasielewski Lames E. Coluccio Tkamas L. Dicaprio G Robert Holography, radar data and interpreter performance.— Photogramm. Eng. v. 39, 1973, № 6, p. 617—620.
210. Znidam R. A. Van Vn conventional aerial imagery and its geographical application.— K. N. A. D. geogr. tidsehr, v. 3, 1969, № 2, p. 132—139.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматизация дешифрирования 140
 Амплитудная характеристика 44
 Аналитические методы определения координат 172, 176
 Анаморфотная оптическая система 58
 Антенный коммутатор 13
 Аппаратурная функция 18, 92
 Аэровизуальное дешифрирование снимков 138
 Базис съемки 213, 215
 Боковое уклонение носителя 113
 Визуальное восприятие 141
 Голографическая РЛС 23
 Горизонтальная дальность 16
 Градационная характеристика РЛИ 48
 Групповые цели 26
 Демаскирующие признаки 162
 Дешифровочные признаки косвенные 167
 — — прямые 162
 Деформации радиолокационного изображения 113
 Дешифрирование аэровизуальное 138
 — камеральное 138
 — комбинированное 139
 — полевое 138
 — радиолокационных снимков 137
 Дешифровочный признак: размер объекта 165
 — тон изображения 163
 — форма объекта 163
 Диаграмма направленности антенны 39
 Динамический диапазон 38, 41, 46, 74
 Дистанционные методы изучения среды 5
 Длительность зондирующего импульса 17
 Задержка зондирующего импульса 16
 Знаменатель масштаба изображения 113
 Зона обзора 19
 Зондирующий сигнал 13
 Зрения контрастная чувствительность 141
 — острота 141
 — поле (лупы) 145
 Измерительные свойства РЛИ 112
 Информационная емкость РЛИ 137
 Импульсная реакция системы 92
 Индикаторы кругового обзора 8
 Инструментальный метод дешифрирования 139
 Интервал яркости 160
 Интерпретация изображений 137
 Информационная емкость РЛИ 137
 Информационные возможности метода 141
 Источники геометрических искажений 113
 — деформации 113
 Калибровочные метки дальности 119, 180
 Камеральное дешифрирование снимков 138
 Комбинированное — — 139
 Колибратор дистанции 16
 Контраст визуальный 142
 — тоновый (фотографический) 142
 Контрастная чувствительность зрения 142
 Коэффициент контрастности 43, 46, 159
 — прозрачности 43, 44, 46
 Коэффициент передачи ФРУ 77—79
 — тракта обработки 81
 — рассеяния 28

- светорассеяния 159
- спектрального отражения 159
- спектральной прозрачности атмосферы 159
- яркости дымки 159
- Кратность увеличения лупы 145
- Линейное разрешение 18
- Линейный приемник 49
- Логарифмический приемник 49
- Лупы поле зрения 145
 - сложные 145
 - увеличительные 145
 - фокусное расстояние 145
- Масштаб изображения геометрический 148
 - — деталиметрический 155
 - — фотометрический 158
 - вдоль полета 149
 - поперек полета 149
 - преобразование РЛИ 110
- Математическая модель одиночного снимка 106
- Метки дальности 16, 119, 177
- Метод дешифрирования инструментальный 139, 140
 - — непосредственный 139
- Микрофотограмма РЛИ 52
- Мощность передатчика 39
- Наклонная дальность 182
- Направляющие косинусы 101
- Нелинейное преобразование 42
- Нелинейность строчной развертки 114
- Непосредственный метод дешифрирования 139
- Несинхронность протяжки вторичной пленки 123
 - — первичной пленки 123
- Несфокусированная обработка 72
- Область применения радиолокационных средств 9
- Обнаружение 137
- Обработка несфокусированная 72
 - фокусированная 72
- Объекты радиолокационной съемки 24
- Определение координат по навигационным данным 177
 - — по опорным точкам 190
 - номенклатуры листа карты 184
- Опознавание 137
- Оптическая обработка информации 23, 24
- Отражение диффузное 27
 - зеркальное 27
 - от морской поверхности 33
- Отраженный сигнал 15
- Отражающая способность цели 25
- Острота зрения 141
 - монокулярного зрения 141
- Параметры полета 106
- Перцептрон 140
- Плотность почернения 43
- Погодные условия аэросъемки 5, 6
- Погрешности, вызванные рельефом местности 128
 - — кривизной земли 130, 131, 133
 - стабилизации антенны 114
- Показатель рассеяния 28
- Поле зрения лупы 145
- Последетекторное сглаживание 40
- Поляризация антенны вертикальная 19, 31
 - — горизонтальная 19, 31
- Поляризация передающей и приемной антенн 31
- Преимущества радиолокационной съемки 5, 6
- Приборы для дешифрирования негативов 153
- Приемник автоматической регулировки усиления (АРУ) 49
- Приемник линейный 42, 49
 - логарифмический 44, 48, 49
- Принцип действия РЛС БО 12, 13
 - построения РСА 20, 54—57
- Просмотровые столы 154
- Прохождение сигнала через приемник РЛС 40
- Радиолокаторы бокового обзора 12
- Радиолокационные цели 25
- Радиолокационная фотogramметрия 5

- Разрешение вдоль линии пути 17
— по дальности 17
— поперек линии пути 17
- Разрешающая способность 90
— — системы 19
- Распределенные цели 26
- Сенситометрическая кривая 42
- Синтезированная антенна 20
— — нефокусирующая 23
— — фокусирующая 23
- Система координат изображения 98
— — системы 98
- Синхронизатор 16
- Сложные линзы 145
- Смещение за рельеф 165, 166
- Средняя квадратическая нестабильность параметров 113
- Средняя ЭПР 38
- Стереоскопы 147, 150
- Стереоскопическое зрение 146
- Стереоскопическое рассматривание снимков 146
- Съем координат 188
- Тепловой шум 74
- Технические параметры РЛС БО 17
- Тональная структура изображения 166, 167
- Точечные цели 26
- Угловые отражатели 26
- Удельная эффективная площадь рассеяния 27
- Уравнение радиолокационной дальности 39
- Фазируемая решетка 24
- Фильтрация радиосигналов 40
- Фокусирующая обработка 72
- Фокусное расстояние линзы 145
- Фотограмметрическая система координат 98
- Фотографическая широта 44, 159
- Фоторегистрирующее устройство 15, 77—79
- Цели групповые 26
— радиолокационные 25
— распределенные 26
— точечные 26
- Цифровые вычислители 67, 73
- Частотная характеристика системы 93
- Широта фотографическая 44, 159
- Шумфактор приемника 41
- Экспозиция на фотопленке 42
- Элементы ориентирования антенны 99
— — снимка 98
- Эффективная площадь рассеяния 25
- Энергетический потенциал 19
- Яркостный интервал 158, 160
- Яркость изображения 16, 158
— объектов 16, 158

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Глава I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	5
§ 1. Введение	5
§ 2. Исторический путь развития радиолокационной съемки	7
§ 3. Области применения радиолокационных средств	9
Глава II. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ	12
§ 4. Принцип построения РЛС обзора земной поверхности	12
§ 5. Характеристики объектов радиолокационной съемки	24
§ 6. Прохождение радиолокационных сигналов через тракт некогерент- ной РЛС БО	38
§ 7. Обработка сигналов в РСА	54
§ 8. Прохождение радиолокационных сигналов через тракт РСА	73
§ 9. Разрешающая способность РЛС землеобзора	90
Глава III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДИНОЧНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СНИМКА	98
§ 10. Математическая модель снимка, получаемого РЛС БО	98
§ 11. Математическая модель снимка, получаемого РСА	106
Глава IV. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ	112
§ 12. Критерии оценки измерительных свойств радиолокационного изображения	112
§ 13. Деформации изображения, получаемого РЛС БО	113
§ 14. Деформации изображения, получаемого РСА	121
§ 15. Влияние рельефа местности	128
§ 16. Влияние кривизны Земли	130
§ 17. Влияние атмосферной рефракции радиоволн	134
Глава V. ДЕШИФРИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	137
§ 18. Методы и способы дешифрирования радиолокационных снимков	137
§ 19. Информационные возможности непосредственного метода каме- рального дешифрирования	141
§ 20. Изобразительные свойства радиолокационного изображения	148
§ 21. Дешифровочные признаки радиолокационных изображений	162
§ 22. Методика камерального дешифрирования радиолокационных изо- бражений	168

Глаза VI. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ МЕСТНОСТИ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ СНИМКАМ	172
§ 23. Общие сведения	172
§ 24. Аналитический метод определения координат объектов по оди- ночному РЛ снимку при съемке с малых высот	176
§ 25. Аналитический метод определения координат объектов по оди- ночному РЛ снимку при съемке с больших высот	195
§ 26. Особые случаи определения координат объектов	207
§ 27. Аналитический метод определения координат объектов по сте- реоскопической паре РЛ снимков	211
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	224
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	235

ИБ № 1200

ВИКТОР ИВАНОВИЧ АХОВЕЦКИЙ, GERMAN НИКОЛАЕВИЧ ДОНСКОЕ,
ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОРНЕЕВ, ЛЕОН БОГУСЛАВОВИЧ НЕРОНСКИЙ

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

Редактор издательства Н. Т. КУПРИНА. Переплет художника В. М. ЛУКЬЯНОВА.
Художественный редактор В. В. ЕВДОКИМОВ. График-иллюстратор А. М. ЯКУБОВ.
Технический редактор А. Г. ИВАНОВА. Корректор И. Н. ТАРАНЕВА

Сдано в набор 18.07.78. Подписано в печать 05.04.79. Т 06077. Формат 60×90/16.
Бумага № 1. Гарнитура литер. Печать высокая. Печ. л. 15,0. Уч.-изд. л. 14,90. Тираж
1700 экз. Заказ 8-285/6424-15. Цена 2 р. 60 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Книжная фабрика «Коммунист» республиканского производственного объединения
«Полиграфкнига» Госкомиздата УССР, 310012, Харьков-12, Энгельса, 11.

3011



МОСКВА ИЗДАТЕЛЬСТВО "НЕДРА"