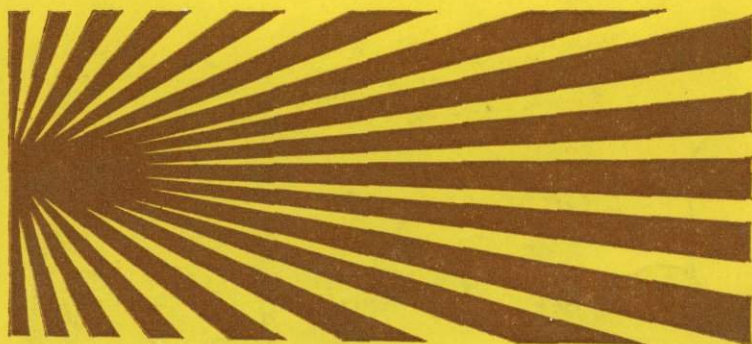


Д. БЕРГЕР

**ПРИМЕНЕНИЕ
ЛАЗЕРНОЙ
ТЕХНИКИ
В ГЕОДЕЗИИ
И ГЕОФИЗИКЕ**



Jon Berger

APPLICATION
OF LASER
TECHNIQUES
TO GEODESY
AND GEOPHYSICS

Institute of Geophysics and Planetary Physics
University of California at San Diego, La Jolla,
California

1973

Д. Бергер

528
543

ПРИМЕНЕНИЕ
ЛАЗЕРНОЙ
ТЕХНИКИ
В ГЕОДЕЗИИ
И ГЕОФИЗИКЕ

Перевод с английского А. В. Кондрашкова
и Д. Д. Дзямана

2311



МОСКВА «НЕДРА» 1977



Бергер Д. Применение лазерной техники в геодезии и геофизике. М., «Недра», 1977, 60 с.

В книге рассмотрены принципы действия, устройство и технические характеристики высокоточных лазерных дальномерных устройств и тензометров. Приводятся результаты экспериментов, выполненных при помощи этих устройств (измерения расстояний между пунктами земной поверхности и расстояний до Луны и искусственных спутников Земли; исследование тектоники разлома Сан-Андреас в Калифорнии; изучение вековых деформаций земной коры и деформаций, обусловленных земными приливами и землетрясениями).

Описаны конструктивные особенности лазерного интерферометра для абсолютных определений ускорения силы тяжести и гетеродинного лазерного интерферометра для измерения скорости вращения Земли.

Книга рассчитана на инженеров геодезистов, геофизиков и астрономов.

Табл. 1, ил. 23, список лит. — 60 назв.

Прошло уже десятилетие с тех пор, когда лазер стал доступен ученым не только как объект исследования, но и как средство для исследования. Использование лазера стали многочисленными и разнообразными [1] и постоянно появляются новые его применения. По мере совершенствования и усложнения самих устройств возможности лазера подвергаются изменениям (становятся шире). В настоящее время можно получить лазерные лучи со средней мощностью 60 кВт и пиковой мощностью 10^9 Вт, с дискретным спектром, простирающимся от субмиллиметров до 1523 \AA и перестраиваемым от 3410 до 3500 \AA . Лазеры с точной длиной волны и долговременной стабильностью лучшей, чем 10^{-11} , в настоящее время далеко превосходят возможности международного эталона длины (длину волны специальной линии криптона) и вероятно, что длина волны лазера вскоре станет эталоном длины [2]. Кроме того, разработаны методы, позволяющие независимо измерять длину волны и частоту и, таким образом, получать скорость света [3]. В прошлом не было прямой возможности связать эталоны длины и времени (частоты). Однако в настоящее время стало возможным иметь только один эталон, связанный со временем и длиной высокоточным значением скорости света [4].

В геофизике лазеры использованы как для улучшения существующих приборов, так и для разработки совершенно новых инструментов. Лидар — разновидность лазерного локатора, был разработан для исследования структуры атмосферы [5], а родственный способ лазерной раман-спектроскопии был использован для исследования состава атмосферы [6].

Здесь будут рассмотрены два типа приборов и устройств — лазерные тензометры и лазерные дальнометры, — каждый из которых является результатом применения лазерной техники к уже имевшимся приборам и устройствам, значительно улучшившим их возможности. Поскольку эти устройства только недавно разработаны и в некоторых случаях еще не были использованы в полевых условиях, то данные, имеющие геофизический интерес, являются еще скудными. Внимание поэтому будет сконцентрировано на описаниях различных инструментальных систем, характеристике их возможностей и ограничений. Однако в разделе 5 будут приведены результаты, полученные уже к настоящему времени, а также ука-

заны перспективы на ближайшее будущее. В конце будет описано применение лазеров в двух новых типах инструментов: приборе, спроектированном для абсолютных измерений ускорения силы тяжести g , и приборе, способном измерять скорость вращения Земли.

1.1. Лазерные тензометры и лазерные дальномерные устройства

В противоположность лазерным тензометрам (laser strain meters), которые измеряют только изменения расстояний, лазерные дальномерные устройства (laser ranging devices) измеряют само расстояние. Лазерный дальномер работает обычно в горизонтальном направлении сквозь атмосферу на расстояниях в несколько десятков километров. При измерениях в вертикальном направлении он употребляется как весьма чувствительный альтиметр для измерений высот самолета и искусственного спутника над поверхностью Земли. Совсем недавно были выполнены весьма впечатляющие измерения расстояния от Земли до Луны (около 400 тыс. км) с использованием отражателей, доставленных астронавтами с космического корабля «Аполлон» и советской ракетой. Менее чувствительные и менее сложные модели нашли широкое применение в инженерной и геодезической практике, но геофизики заинтересованы в первую очередь в лазерных дальномерных, которые могут обеспечивать относительную точность порядка нескольких миллионных долей или более высокую.

Ограничение точности, достижимой при измерениях лазерным дальномером, обуславливается неопределенностью показателя преломления атмосферы на пути распространения волн. Для точностей порядка 10^{-7} или более высоких успешные измерения были сделаны в вакууме при помощи интерференционного тензометра. Лазерные тензометры способны обеспечить точность 10^{-12} при расстояниях, ограниченных только практическими соображениями (цена земли, наличие участка и т. п.), — порядка 1 км. Однако вследствие значительной протяженности вакуумирующего устройства лазерные тензометры в лучшем случае представляют собой полупортативные установки. Конечно, в безвоздушной среде, такой, как на Луне, эта аппаратура может быть использована для измерения значительно больших расстояний.

Исследования деформаций при помощи лазерного дальномера выполняют путем измерения длины линии в разное время. На специальной станции измерения могут выполняться через каждые 6 месяцев или около этого. При помощи лазерных тензометров осуществляют непрерывные измерения изменений длины ΔL без измерения самого расстояния L . Точность тензометров, их чувствительность и в некоторых случаях стабильность далеко превосходят соответствующие характеристики лазерных дальномеров. Обычно обнаруживаются деформации порядка 10^{-10} (в противоположность разрешающей способности 10^{-6} — 10^{-7} для дальномеров). Однако

вследствие значительных размеров лазерные тензометры не транспортабельны в такой степени, как лазерные дальнометры, и по этой причине используются скорее для непрерывных измерений в одном месте и в течение продолжительного времени (несколько месяцев или лет), чем для единичных измерений в разных местах. Вообще говоря, эти два класса приборов не конкурируют между собой, а дополняют друг друга. Лазерные дальнометры используют для геодезических работ на больших территориях, в местностях, где движения земной коры приводят к деформациям порядка 10^{-6} в год или более значительным. Лазерные тензометры, устанавливаемые в нескольких, специально выбранных местах, дают очень точные и непрерывные записи изменений земных напряжений вплоть до 10^{-10} в год. В действительности лазерный тензометр можно представлять себе как широкополосный горизонтальный сейсмометр с непрерывной калибровкой и очень большим динамическим диапазоном, реакция (отклик) которого линейна и одинакова вплоть до нулевых частот.

1.2. Лазеры

Для приборов, описываемых в этой работе, применяются два особых типа лазеров. Один тип, используемый в дальнометрах, где применяется модулированный световой пучок, и в интерференционных тензометрах, имеет непрерывное и довольно низкой мощности выходное излучение и представляет собой обычно газовый He-Ne лазер. Другой тип, используемый для измерения времени распространения, как в случае эксперимента по измерению расстояния до Луны, — импульсный лазер очень большой мощности и с короткой длительностью импульса.

1.2.1. He-Ne лазер. Основу He-Ne лазера образует кювета с плазмой (газоразрядная трубка), помещенная в оптический открытый резонатор. Плазма в кювете представляет собой смесь гелия и неона, через которую проходит электрический разряд. Как показано на рис. 1, атомы гелия возбуждаются разрядом до метастабильного состояния 1S , соответствующего уровню энергии 20,61 эВ. Почти совпадающим с ним по энергии является состояние неона $3S_2$ с энергией 20,66 эВ. Вызванные тепловым движением столкновения атомов гелия в состоянии 1S и атомов неона, находящихся в основном состоянии, переводят последние в возбужденное состояние, соответствующее уровню $3S_2$. Это приводит к инверсной населенности состояния $3S_2$ над состояниями $3p_4$ и $2p_4$ неона. Система, таким образом, оказывается усиливающей и излучает на длинах волн переходов 33912 и 6328 Å. Это усиление достигается стимулированным излучением, где один фотон, соответствующий, скажем, длине волны 6328 Å, вызывает переход между состояниями $3S_2$ и $2p_4$, который затем производит другой фотон той же частоты и фазы.

Оптический резонатор, в который заключена кювета с плазмой, состоит из двух хорошо отражающих зеркал, установленных

на некотором расстоянии друг от друга. Его передаточная функция дана М. Борном и Э. Вольфом [7]

$$T(\nu) = (1 + F \sin^2 \varphi)^{-1}, \quad (1)$$

где

$$\varphi = \frac{2\pi \eta l \nu^2 \cos \theta}{c},$$

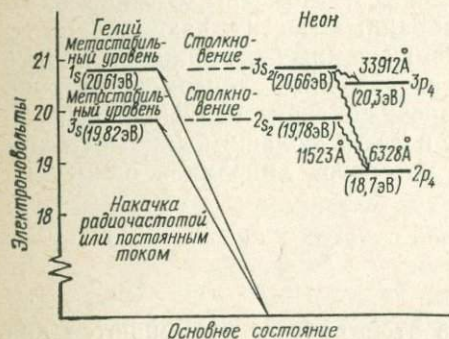


Рис. 1. Уровни энергии He-Ne лазера

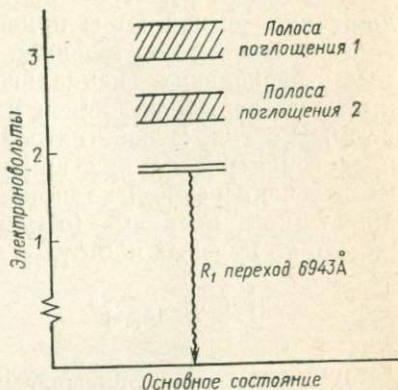


Рис. 2. Уровни энергии рубинового лазера

c — скорость света; η — показатель преломления вещества между зеркалами; F — функция отражающей способности зеркала (для зеркал с одинаковым коэффициентом отражения R , $F = 4R / (1 - R)^2$); l — расстояние между зеркалами; θ — угол между направлением распространения и нормалью к поверхности зеркала; ν — частота световых колебаний.

Резонансная частота оптического резонатора определяется в основном его длиной l . Ширина линии $\Delta\nu_c$ дается выражением

$$\Delta\nu_c = c / \pi \eta l F^{1/2}. \quad (2)$$

Интервал между соседними модами

$$\Delta\nu = c / 2\eta l \quad (3)$$

и, следовательно, добротность резонатора равна

$$Q_c = \pi \nu \eta l F^{1/2} / c. \quad (4)$$

Для 15-см резонатора с достаточно хорошо отражающими зеркалами

$$Q_c = 5 \cdot 10^7. \quad (5)$$

Точная частота выходного излучения лазера есть функция параметров резонатора и атомной системы. Как будет показано в п. 4.3, ширина линии атомной системы намного превышает ширину

линии оптического резонатора. Действительно, если резонатор намного длиннее 15 см, то ширина линии атомной системы значительно превышает интервал между модами резонатора и, следовательно, несколько аксиальных мод могут резонировать одновременно. Это означает, что выходящий луч не будет монохроматическим, а будет состоять из колебаний нескольких различных частот. Для интерферометрических целей работа на единственной частоте обязательна и потому длины резонаторов должны быть невелики. Заметим, что так как резонатор обеспечивает узкую полосу пропускания, точная частота лазерного излучения определяется главным образом расстоянием между двумя зеркалами и, следовательно, есть функция механической системы. Это обстоятельство будет рассмотрено позднее в п. 4.3.

1.2.2. Рубиновый лазер. Вторым тип лазера используется для измерения времени распространения, как это имеет место в лунном эксперименте. Здесь требуется очень короткая вспышка с большой энергией излучения и потому обычно используется гигантский импульс рубинового лазера, получаемый переключением добротности. В этом устройстве активное вещество лазера находится в твердом состоянии. Стержень из рубина (Al_2O_3 с Cr_2O_3) накачивается оптически при помощи импульсной ксеноновой лампы. Рубин имеет две широкие полосы поглощения, которые приблизительно соответствуют спектральным полосам света, даваемого импульсной ксеноновой лампой. Следовательно, ионы с основного уровня возбуждаются до полос поглощения (рис. 2). Они переходят самопроизвольно на уровни энергии вблизи 2 эВ. Так как время релаксации от двух полос поглощения к этим уровням энергии мало по сравнению с тем, которое требуется для перехода с этих уровней энергии в основное состояние, то образуется инверсная населенность. Переход с этих уровней на основной уровень сопровождается излучением фотонов красного света. Стимулированное излучение достигается тем же путем, что и в He-Ne лазере, — обычно использованием оптического резонатора с высокой добротностью на лазерной частоте. Разряд через импульсную лампу длится миллисекунду или около этого и лазерное действие будет начинаться через 0,5 мс после начала разряда и продолжаться до его окончания. Выходное излучение лазера, который не переключается, обычно будет состоять из пиков со случайными амплитудами и длительностями (доли микросекунды каждый).

Q-переключаемый лазер имеет затвор, добавляемый к оптической цепи, который переключает добротность оптического резонатора так, что во время разряда импульсной лампы лазерное действие может происходить только в течение очень короткого времени. Это позволяет доводить заселенность уровня энергии 2 до оптимального значения прежде чем оптический резонатор отпрется. Энергия излучается лазером в виде импульса очень большой амплитуды и малой длительности. Лазеры, успешно использованные в лунном эксперименте обсерваторией Мак-Доналд, имеют длительность $2 \cdot 10^{-8}$ с и энергию 7 Дж. В настоящее время такие лазе-

ры с импульсами длительностью порядка 0,1 мс и мощностью, достаточной для приема сигналов, отражаемых от отражателей на Луне, поступают в продажу.

2. НАЗЕМНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДАЛЬНОМЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

2.1. Основные соображения

Для того чтобы лазерные дальномерные устройства были полезны для наземных геофизических измерений, они должны обладать разрешающей способностью порядка миллиметра. Однако, так как скорость света составляет $3 \cdot 10^{10}$ см/с, то для измерений, основанных на чистом определении времени распространения, необходимо получить разрешение порядка 3 пс. Такое разрешение может быть достигнуто при помощи модуляции светового пучка с высокой частотой и измерения сдвига фазы, вызванного распространением модулированного сигнала в атмосфере. Предпочтительнее пользоваться оптической несущей, а не микроволновой, так как последняя подвержена большим флуктуациям показателя преломления, вызванным наличием водяных паров.

В прошлом с успехом использовались источники света, отличные от лазеров [8], однако введение в эти устройства лазеров значительно увеличило их дальность действия и эффективность. Плотность мощности излучения (мощность на единицу ширины полосы), достижимая с лазером, связанная с его узкой полосой, обеспечивает значительный световой поток через атмосферу от удаленных пунктов с оптикой приемлемых размеров. Гелий-неоновый лазер с выходной мощностью в 100 мкВт имеет эквивалентную спектральную яркость десятикиловаттной осветительной лампы (в предположении, что вся излучаемая лампой энергия сконцентрирована в однородной полосе в видимой части спектра). Далее, вследствие узкой полосы излучения лазера можно использовать интерференционные фильтры, позволяющие значительно улучшить отношение сигнала к шуму.

2.2. Электрооптические модуляторы света

Общим для большинства лазерных дальномерных устройств является наличие электрооптического модулятора света (ЭОМС). Обычно это устройство представляет собой электрооптический кристалл, который вносит фазовый сдвиг в поляризованный луч, проходящий через этот кристалл. Упомянутый сдвиг пропорционален напряженности электрического поля, прикладываемого к устройству. Рассмотрим световой луч, распространяющийся в на-

правлении x_3 и падающий на одно из таких устройств. Показатель преломления в направлениях x_1 и x_2 в общем случае является различным. Кроме того, показатель пропорционален напряженности электрического поля, т. е. $\eta_{x_1} = \eta_1$ становится равным $\eta_1 + \Delta\eta_1$ при наличии поля. Можно показать [9], что

$$\Delta\eta_1 = -\eta_1^3 \Omega_{11} E_1/2 \quad \text{и} \quad \Delta\eta_2 = -\eta_2^3 \Omega_{21} E_1/2, \quad (6)$$

где Ω_{ij} — линейные электрооптические коэффициенты; E_1 — напряженность электрического поля, прикладываемого к модулятору в направлении x_1 .

Световой луч, падающий в направлении x_3 , имеет компоненты электрического поля, определяемые выражениями

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= A_1 \exp i [\omega t - 2\pi\eta_1 x_3/\lambda] \\ E_2 &= A_2 \exp i [\omega t - 2\pi\eta_2 x_3/\lambda] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Общий фазовый сдвиг луча после прохождения кристалла толщиной L будет равен

$$-\frac{2\pi L}{\lambda} [\eta_1 - (\eta_1 + \Delta\eta_1)] = -\frac{\pi\eta_1^3 \Omega_{11} E_1 L}{\lambda} = \varepsilon_1 \quad (8)$$

и

$$-\frac{2\pi L}{\lambda} [\eta_2 - (\eta_2 + \Delta\eta_2)] = -\frac{\pi\eta_2^3 \Omega_{21} E_1 L}{\lambda} = \varepsilon_2, \quad (9)$$

где ε — индекс модуляции.

Если линейно поляризованный свет падает на модулятор и

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = (2N + 1)\pi/4, \quad (10)$$

где $N=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, то выходящий луч будет поляризован по кругу.

Если

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = N \frac{\pi}{2}, \quad (11)$$

то выходящий луч будет по-прежнему линейно поляризованным, но его плоскость поляризации будет повернута по отношению к плоскости поляризации падающего луча на 90° . Следовательно, при помощи двух поляроидов и ЭОМС можно легко сконструировать амплитудный модулятор.

2.3. Инструментальное описание лазерных дальномерных устройств

Принципиальная схема одноволнового дальномерного устройства, предназначенного для измерения расстояний до 100 км, показана на рис. 3. Свет от лазера (обычно He-Ne лазера, работающего на длине волны 0,6328 мкм, красная линия) проходит ЭОМС, где модулируется колебаниями микроволновой частоты f_T , и направляется в телескоп, коллимирующий луч. Отражатель, на-

ходящийся на расстоянии d , возвращает луч обратно к приемо-передатчику. Отраженный свет формируется телескопом (который может и не быть коллимирующим) и направляется на фотодетектор. Сигнал с выхода фотодетектора смешивается с сигналом частоты f_R , несколько меньшей, чем f_T , после чего фаза сигнала разностной частоты $(f_T - f_R)_R$, несущего информацию об измеряемом расстоянии, сравнивается с фазой опорного сигнала частоты $(f_T - f_R)_T$.

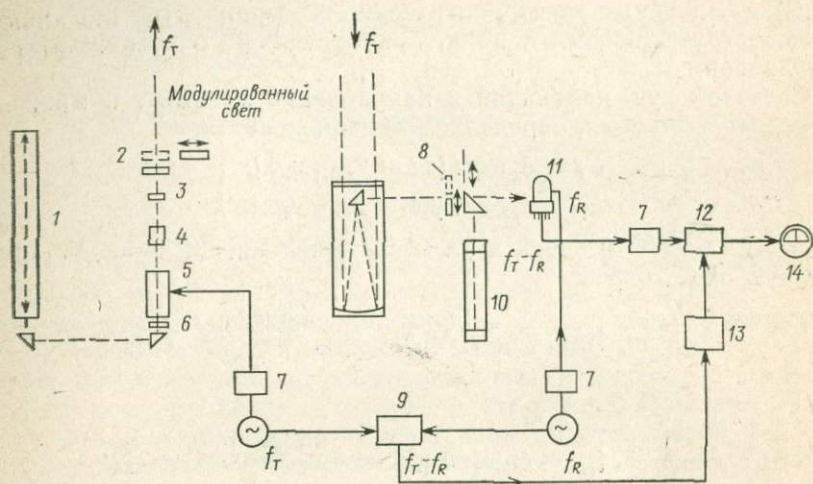


Рис. 3. Принципиальная схема лазерного дальнометрического устройства (по конструкции геодинметра модели 8 фирмы AGA).

1 — He-Ne лазер; 2 — цилиндрическая линза; 3 — расширитель луча; 4 — анализатор; 5 — модулятор; 6 — пластинка $\lambda/4$; 7 — усилитель; 8 — узкополосный фильтр; 9 — смеситель; 10 — телескоп; 11 — фотосуммулятор; 12 — фазовый детектор; 13 — фазовращатель; 14 — нуль-индикатор

Величина d измеряется однозначно в пределах расстояния, проходимого светом за один период модуляции. При частоте модуляции 30 МГц разность фаз в 180° между сигналами с частотами $(f_T - f_R)_T$ и $(f_T - f_R)_R$ соответствует изменению расстояния (туда и обратно) на величину

$$c/2f_T = 5 \text{ м}, \quad (12)$$

где c — скорость света.

Следовательно, отрезок длиной 2,5 м является основной единицей измерения расстояния. Если разность фаз измерить с точностью $4'$, то разрешение системы составит 1 мм.

Если расстояние не известно заранее с точностью до 2,5 м, то для однозначного определения d можно использовать измерения на других частотах модуляции.

Геоодит фирмы Spectra Physics, который работает на пяти различных частотах модуляции, близких к 50 МГц, имеет разрешение, равное 1 мм, при однозначном определении измеряемого расстояния до 30 км.

2.4. Точность лазерных дальномерных устройств

Основным ограничением точности дальномерных устройств, оптических или микроволновых, является влияние неопределенности показателя преломления воздуха на пути распространения колебаний [10]. Конечно, результат измерения является скорее оптической длиной пути, а не геометрической, и эти две величины не равны вследствие неоднородности и турбулентности атмосферы. Показатель преломления η зависит от температуры, давления и в меньшей степени от влажности воздуха e , т. е. $\eta = \eta(P, T, e)$.

При небольших отклонениях температуры и давления от стандартных условий (15°C, 1013 мбар, сухой воздух) для оптических длин волн

$$\mu = (\eta - 1) = 2,76 \cdot 10^{-4} (PT_0/P_0T) - 1,3 \cdot 10^{-6} (T_0/T)R, \quad (13)$$

где P — давление в мбарах; P_0 — стандартное давление (1013 мбар); T — температура в К; T_0 — стандартная температура (298 К); R — относительная влажность в %.

Для микроволнового диапазона [11]

$$\mu = 2,6 \cdot 10^{-4} (T_0/T) [(P/P_0) + 5 (T_0/T)R]. \quad (14)$$

Для оптических или микроволн

$$(\Delta\mu/\Delta P)_{T=298 \text{ К}} = 3 \cdot 10^{-7} / \text{мбар} \quad (15)$$

и

$$(\Delta\mu/\Delta T)_{P=1013 \text{ мбар}} = 8 \cdot 10^{-7} / \text{К},$$

однако зависимость μ от влажности воздуха для микроволн оказывается примерно в 100 раз более сильной, чем для оптических волн. Это является одним из принципиальных оснований для использования оптических колебаний в качестве несущих в дальномерных устройствах.

Поскольку парциальные ошибки дальномерных измерений равны, т. е.

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \simeq \Delta \mu, \quad (16)$$

то для того чтобы уменьшить их до 10^{-6} , необходимо знать среднее давление вдоль пути распространения до 3 мбар, а температуру с точностью примерно 1°C. Это означает, что точные измерения температуры и давления должны выполняться вдоль всего пути распространения колебаний в течение всего времени измерения расстояния. В большинстве случаев это настолько трудно, что делает применение этого метода для получения более высокой точности невыгодным. Однако самолет, облетающий путь распространения в процессе измерений, использовался для этой цели.

2.5. Двухволновые способы

Способ, предложенный Бендером и Оуенсом [12], использует дисперсионные свойства атмосферы для улучшения отношения

сигнал/шум дальномерных устройств. Для модулированных световых лучей обычно используется групповой, а не фазовый показатель преломления

$$\eta^G = c/U, \quad (17)$$

где U — групповая скорость света. Величина η^G связана с фазовым показателем преломления η соотношением

$$\eta^G = \eta - \frac{1}{\lambda} \frac{d\eta}{d\lambda}. \quad (18)$$

Если L — есть геометрическое расстояние между двумя точками, то $(L+s)$ — представляет собой оптический путь с дополнительным вкладом s за наличие воздуха

$$s = \int_0^L (\eta^G - 1) dl. \quad (19)$$

Предположим теперь, что измерения расстояния L выполняются на двух различных оптических длинах волн λ_1 и λ_2 . Тогда

$$\Delta s = \int_0^L \left(\frac{\eta_2^G - \eta_1^G}{\eta_1^G - 1} \right) (\eta_1^G - 1) dl. \quad (20)$$

Эриксон показал [13], что величина

$$A = \frac{\eta_2^G - \eta_1^G}{\eta_1^G - 1}$$

не зависит от плотности атмосферы и лишь незначительно зависит от влажности (содержания водяных паров). Величина A — отношение преломлений, может быть с высокой степенью точности представлена ее средним значением \bar{A} . В этом случае

$$\Delta s = \bar{A}s_1,$$

где s_1 — избыточная длина пути для длины волны λ_1 . Определив постоянную \bar{A} лабораторным путем, а Δs из полевых измерений, можно вычислить интеграл s и определить, следовательно, геометрическое расстояние. Для расстояния $L=15$ км, $\lambda_1=6328\text{Å}$ и $\lambda_2=3660\text{Å}$, s равно примерно 400 см, а Δs — примерно 40 см. Если частота модуляции равна 3 ГГц, а разность фаз измерена с точностью 1° , то точность измерений величины Δs составит $\Delta L/L = 10^{-7}$, если лабораторные измерения величины A и аппроксимация $A=\bar{A}$ выполнены с точностью более высокой, чем $1 \cdot 10^{-7}$. Таким образом, двухволновый метод открывает перспективу измерять расстояния в атмосфере с точностью $1 \cdot 10^{-7}$.

2.6. Инструментальное описание двухволновых лазерных дальномерных устройств

Это остроумное устройство использует лазерные лучи двух различных длин волн (6328\AA от He-Ne лазера и 4417\AA от He-Cd лазера) с целью определить средний групповой показатель преломления вдоль пути в атмосфере и, следовательно, исправить

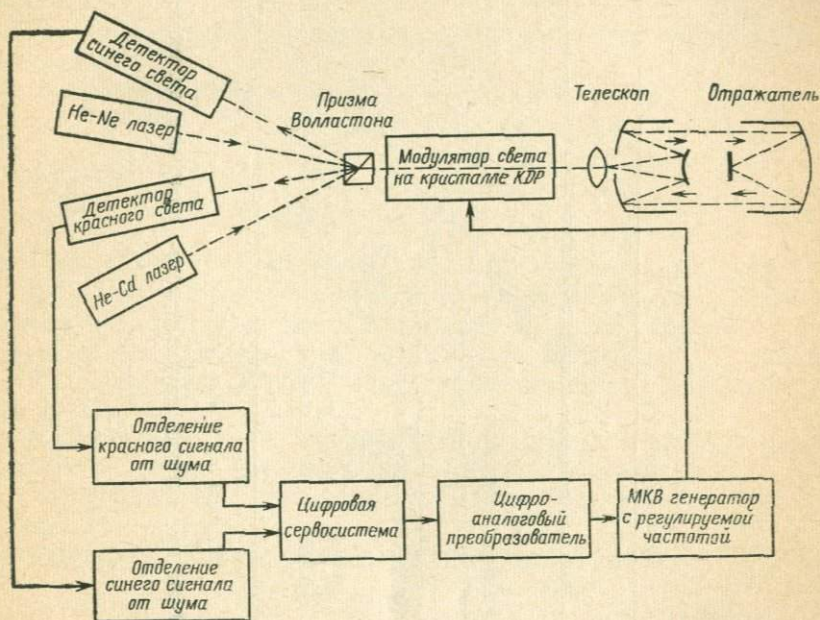


Рис. 4. Принципиальная схема двухволнового лазерного дальномерного устройства (по Эрншоу и Гернандесу [15]).

результат измерения так, как это было описано выше. Прибор был разработан в течение последних нескольких лет в лаборатории Национального управления океана и атмосферы (Боулдер) (the Boulder Labs of National Oceanic and Atmospheric Administration—NOAA) [14, 15]. Подобное устройство, использующее различные длины волн, было сконструировано также фирмой North American Rockwell [16].

Принципиальная схема прибора показана на рис. 4. Два лазерных луча соединяются и поляризуются в одной плоскости при помощи поляризационной призмы Волластона прежде чем попасть в ЭОМС, выполненный на кристалле KDP (дигидрофосфат калия). Фазы лучей модулируются микроволновой частотой 2,7 ГГц, затем коллимируются объективом с апертурой 20 см и посылаются на удаленный отражатель. После возвращения от отражателя свет собирается формирующим телескопом и анализируется призмой Волластона с целью выделения горизонтально поляризованной со-

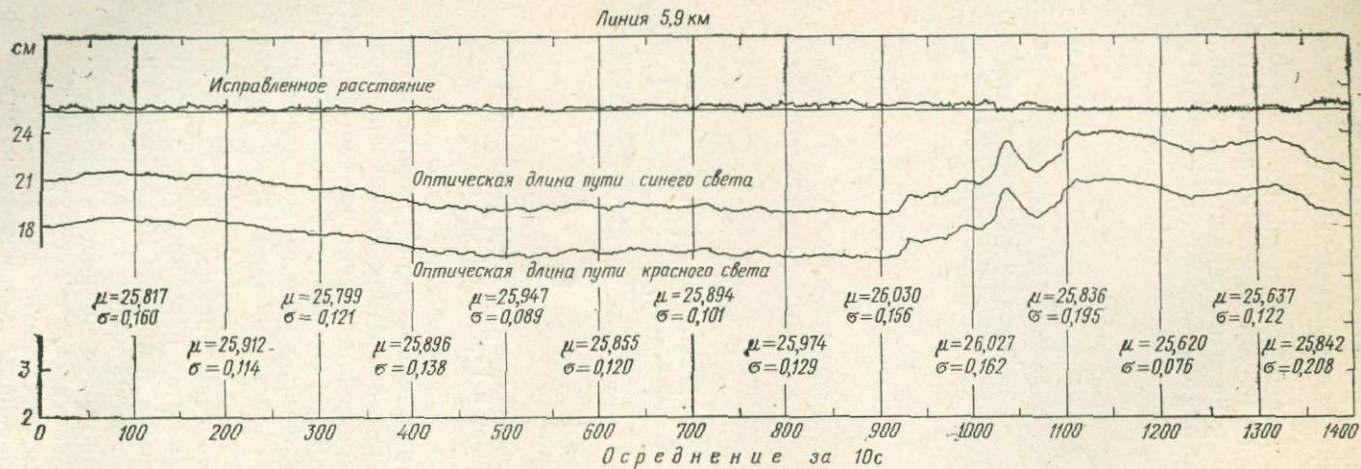


Рис. 5. Результаты измерения линии длиной 5,9 км при помощи двухволнового лазерного дальномерного устройства (по Эрншоу и Гернадесу [15])

ставляющей. Если ЭОМС управляется такой частотой, что модуляция компенсируется, то горизонтальной составляющей не будет — нулевое условие. Для управления микроволновой частотой ЭОМС используется способ нулевого детектирования. При этом горизонтально поляризованная составляющая света, приходящего с дистанции, всегда равняется нулю. Следовательно, длина волны модуляции оказывается жестко связанной с оптической длиной пути.

Весь этот процесс измерений повторяется для обоих лучей с частотой 500 Гц.

Кажущаяся длина пути для красного света равна

$$\eta_R^G L = (N_R \lambda / 2) - K_R, \quad (21)$$

а для синего

$$\eta_B^G L = (N_B \lambda / 2) - K_B, \quad (22)$$

где L — действительная длина; η_R^G , η_B^G — групповые показатели преломления для красного и синего лучей, а N_R , N_B — соответствующие количества длин волн модуляции, укладываемых в измеряемом расстоянии; λ — длина волны модуляции в вакууме; K_R , K_B — поправки за оптические компоненты для красного и синего лучей.

Величины K_R и K_B определяются экспериментально измерением прямой линии ABC целиком (AC) и по частям (AB и BC). Разность $AC - (AB + BC)$ является поправкой за оптические компоненты.

Исправленная длина вычисляется по формуле

$$L = \eta_B^G L - (\eta_B^G L - \eta_R^G L) / A_B \quad (23)$$

или

$$L = \eta_R^G L - (\eta_B^G L - \eta_R^G L) / A_R,$$

где

$$A_R = (\eta_B^G - \eta_R^G) / (\eta_R^G - 1)$$

и

$$A_B = (\eta_B^G - 1) / (\eta_B^G - \eta_R^G).$$

Вследствие чувствительности величины A к влажности воздуха необходимы, однако, измерения температуры и относительной влажности воздуха. При температуре 15°C и относительной влажности 50% и ошибках измерений, соответственно равных 3% и 5% , ошибка вычисленного расстояния составит $1 \cdot 10^{-7}$.

Некоторые результаты полевых измерений линий длиной $5,9$ км показаны на рис. 5. Для времени осреднения 10 с средние квадратические ошибки флуктуаций исправленного расстояния составили примерно $5 \cdot 10^{-7}$.

3. ЛАЗЕРНЫЕ ДАЛЬНОМЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ ДО ВНЕЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

3.1. Эксперимент по лазерному измерению расстояния до Луны

20 июля 1969 г. астронавты космического корабля «Аполлон 11» приземлились на поверхности Луны. Они привезли с собой систему отражателей, предназначенных для отражения лазерных лучей, проходящих с Земли. Установив прибор в 20 м от космического корабля, астронавт сориентировал систему так, чтобы ее оптическая поверхность оказалась примерно перпендикулярной к направлению на Землю.

Основное измерение, которое нужно было сделать с этой точки лунной поверхности, — просто измерить с весьма высокой точностью расстояние Земля — Луна. Измерения покрытий звезд и оптического параллакса позволили определить расстояние Земля—Луна с ошибкой порядка 3,5 км. Радиолокационные измерения, выполненные в последнем десятилетии, уменьшили эту ошибку до 1 км. Перед описываемым экспериментом группы исследователей в СССР и США добились получения сигналов в виде лазерных импульсов, отраженных от поверхности Луны без помощи отражателей. В результате советских работ расстояние Земля — Луна было уточнено до 30 м. Однако едва ли от этого метода можно ожидать существенного улучшения точности, так как неровности поверхности Луны размазывают возвращенный сигнал во времени. Кроме того, существуют трудности отделения влияний рельефа Луны от ошибок в лунной орбите.

3.1.1. Лунный отражатель. Решетка отражателей, посланная на Луну, была разработана с учетом нескольких критериев. Первое, конечно, это то, что она должна была увеличить мощность отраженного сигнала, направляя свет обратно к Земле более эффективно, чем это могла бы сделать поверхность Луны. Второе, — она должна была выдержать изменения температуры от дня к ночи на поверхности Луны, достигающие 300°. Третье, — она не должна была слишком хорошо фокусировать отраженный свет, иначе отраженный сигнал мог бы совсем не попасть в точку, откуда он был послан, — из-за смещения этой точки за те 2,5 с, которые свет шел до Луны и обратно. Влияние этого эффекта сводится к тому, что отраженный луч смещается примерно на 1,5 км от исходной точки. Следовательно, размер пятна отраженного света должен быть больше этой величины. Изучение этих критериев привело к выбору 45-см квадратной решетки, состоящей из 100 уголкового отражателей из плавленого кварца диаметром 4 см, которые должны были быть доставлены на Луну космическими кораблями «Аполлон 11» и «Аполлон 14». Отражатель, доставленный космическим кораблем «Аполлон 15», включал 300 уголкового отражателей того же размера, чтобы увеличить отраженный сигнал. Три отражате-

ля образуют треугольник со сторонами примерно 1000 км и позволяют точно измерить либрацию Луны.

3.1.2. *Эффективность системы.* Эксперимент был разработан для работы с телескопами небольшого размера на наземных станциях, но до настоящего времени большая часть результатов получена при помощи 2,7-м телескопа обсерватории Мак-Доналд [17,

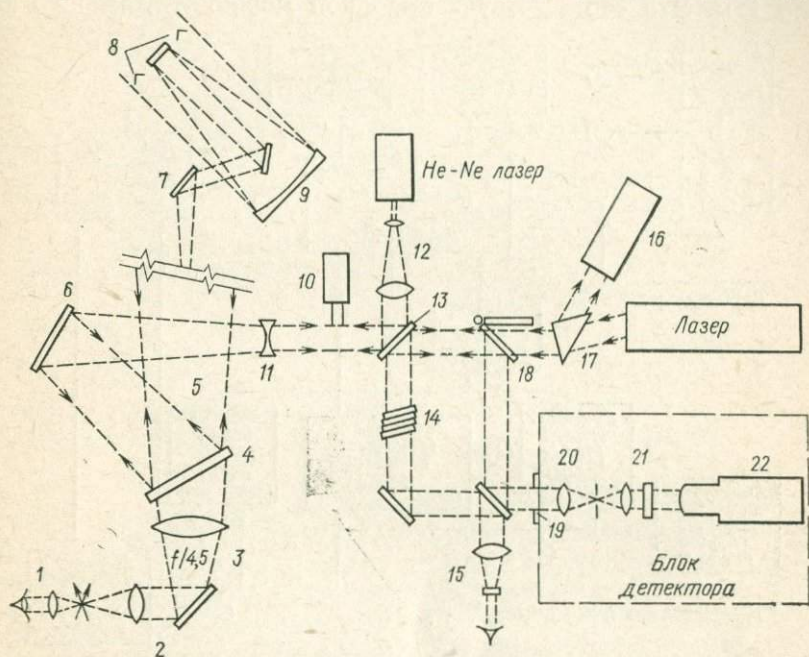


Рис. 6. Оптическая схема устройства для лазерных измерений расстояния до Луны обсерватории Мак-Доналд (по Сильвербергу и Карри [20]).

1 — окуляр; 2 — гид X-Y/оправа сетки; 3 — уменьшающая оптика; 4 — 38-см дихроичное зеркало; 5 — $f/32,5$ пучок, направляемый в фокус куде (телескопа); 6 — 13-см диэлектрическое зеркало; 7 — зеркало № 4; 8 — кубические уголкового отражатели; 9 — главное зеркало (телескопа) 2,7 м; 10 — стартовый фотодиод; 11 — рассеивающая линза; 12 — устройство для расширения луча; 13 — светоделительное устройство; 14 — фильтры; 15 — направляющий телескоп; 16 — устройство для контроля мощности излучения; 17 — призма круговой поляризации; 18 — откидывающееся зеркало; 19 — обтуратор; 20 — пространственный фильтр; 21 — спектральный фильтр; 22 — фотоумножитель

18]. Общая проектная эффективность всей системы определялась по формуле [19]

$$E = \left(\frac{AD_T D_R T_a}{2r^2 \theta \lambda D_L} \right)^2 T_0, \quad (24)$$

где A — эффективная площадь системы отражателей ($\approx 150 \text{ см}^2$); r — расстояние от поверхности Земли до отражателей ($\approx 3,7 \cdot 10^{10} \text{ см}$); θ — угол расходимости лазерного луча ($\approx 10^{-3}$ рад); D_R — диаметр приемного телескопа ($\approx 100 \text{ см}$); D_T — диаметр передающего телескопа ($\approx 100 \text{ см}$); D_L — диаметр стержня активного вещества лазера ($\approx 2 \text{ см}$); T_a — пропускание атмосферы

($\approx 85\%$); T_0 — пропускание оптической системы ($\approx 30\%$); λ — длина волны лазера ($\approx 7 \cdot 10^{-5}$ см).

Для указанных параметров эффективность составит $3,3 \cdot 10^{-18}$ и, следовательно, будет необходим лазерный импульс в 10^{19} фотонов, чтобы получить различимый импульс с фотоумножителя с квантовой эффективностью 3% , используя приемник диаметром около 1 м. Это соответствует выходной мощности лазера 3 Дж.

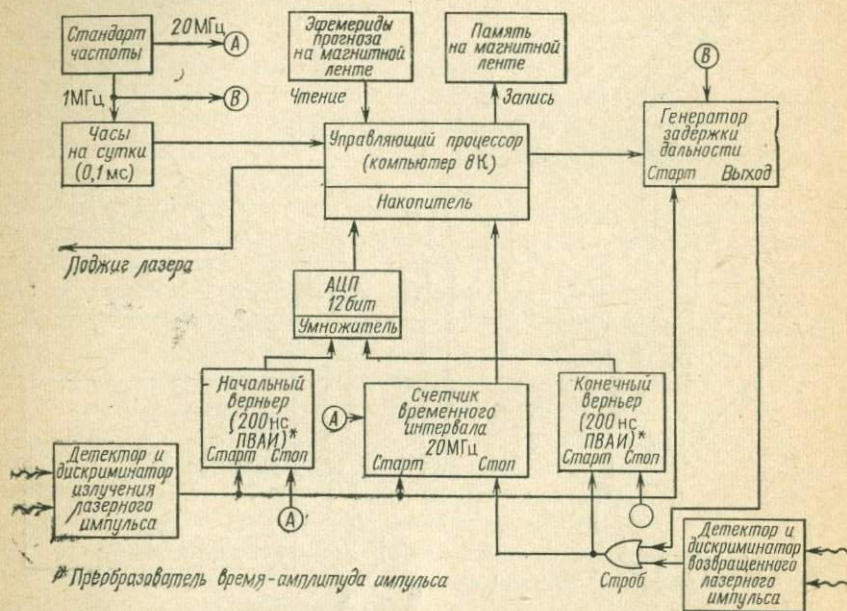


Рис. 7. Временная система, использованная в лунном эксперименте на обсерватории Мак-Доналд (по Сильвербергу и Карри [20])

3.1.3. Наземная станция. Оптическая система, используемая на обсерватории Мак-Доналд, показана на рис. 6 [20]. Лазер, — четырехступенчатая рубиновая система, имеет частоту повторения 20 импульсов в минуту с энергией 3 Дж. Ширина импульса равна 3 нс, ширина полосы $0,4 \cdot 10^{-8}$ см (т.е. $\Delta\lambda/\lambda \approx 6 \cdot 10^{-5}$). Диаметр луча равен 2 см, а его расходимость 10^{-3} рад. Это позволяет работать на пределе атмосферной видимости, 1,5 с, когда луч расширяется до 2,7 м апертуры телескопа. Телескоп направляется на отражатель с использованием координат кратеров, расположенных вблизи места установки зеркального отражателя. Каждый день натягивалась особая сетка, которая показывала положение этих кратеров по отношению к зеркальному отражателю. Для уменьшения влияния излучения фона и повышения отношения сигнал/шум отраженного луча перед детекторами устанавливались узкополосные фильтры.

Для достижения инструментальной точности 1 нс при измерении полного времени пробега, равного 2,5 с, была использована

временная система, изображенная на рис. 7. Момент поджига лазера управляется ЭЦВМ, являющейся частью схемы, которая используя параметры орбиты, вычисляет расчетное время распространения до ~ 1 нс. Выходной импульс от лазера запускает 2 таймера, один из которых при помощи верньера измеряет время между моментом поджига лазера и импульсом от часов (и таким образом дает точное время поджига), и второй, который запускает линию

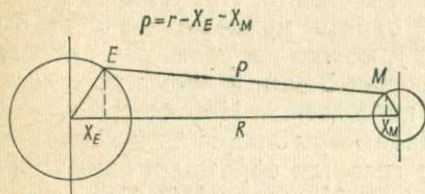


Рис. 8. Геометрия лазерных измерений расстояния до Луны

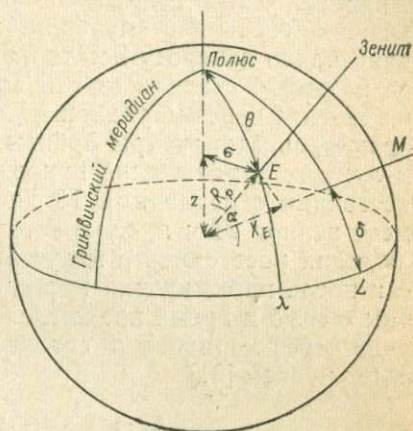


Рис. 9. Геометрическое расположение наземной станции

задержки, уже установленную при помощи ЭЦВМ на расчетную длину. Непосредственно перед прибытием возвращенного импульса включается третий таймер, который служит верньером для точного определения времени прибытия импульса. Большая часть 2,5 с интервала регистрируется 20 МГц счетчиком, а моменты поджига лазера и прибытия отраженного импульса привязываются двумя верньерами, которые оценивают доли 50 нс периода 20 МГц счетчика.

3.1.4. Основные измерения. Основным результатом измерений при лунном эксперименте является просто расстояние ρ между наземной обсерваторией E и лунным отражателем M (рис. 8), которое с хорошим приближением может быть представлено формулой вида

$$\rho = r - X_E - X_M, \quad (25)$$

где r — расстояние между центрами Земли и Луны; X_E , X_M — проекции линий наземная обсерватория — центр Земли и лунный отражатель — центр Луны на линию центр Земли — центр Луны. Перемещения наземной обсерватории влияют на расстояние только через составляющую X_E . Так как, согласно рис. 9,

$$\left. \begin{aligned} X_E &= R_p \cos \alpha; \\ \cos \alpha &= \cos \theta \sin \delta + \sin \theta \cos \delta \cos h, \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

то

$$X_E = z \sin \delta + \sigma \cos \delta \cos h,$$

где R_p — расстояние от наземной станции до центра Земли; θ , λ — широта и долгота наземной станции; $h = \lambda - L$ — местный часовой угол центра масс Луны, равный разности местного времени и прямого восхождения Луны; $\sigma = R_p \sin \theta$ — расстояние наземной станции от оси вращения Земли; $z = R_p \cos \theta$ — высота наземной станции над плоскостью экватора; δ — склонение центра масс Луны.

Один из простейших экспериментов состоял в наблюдениях за изменениями ρ вследствие вращения Земли. Принимая в расчет движение Луны (ее смещение по орбите примерно на 3° за 6 ч равнозначно повороту Земли на 90°), можно получить σ — расстояние наземной станции от оси вращения Земли и время прохождения светила через меридиан места наблюдения. Неточность лунных параметров (параметры орбиты, параметры либрации и координаты лунного отражателя) приводит главным образом в расстоянии с периодами 13 дней или большими [18]. Член $\cos h$ имеет период 25 ч и, следовательно, может быть легко учтен. Наблюдения расстояния ρ могут выполняться примерно в течение 4 ч до и после прохождения меридиана. При этом могут быть определены $\sigma \cos \delta$ и время прохождения через меридиан. Время прохождения через меридиан t_m связано с расстоянием в пределах $t_m \pm 4$ ч соотношением [21]

$$t_m = \frac{1}{2} (t_1 + t_2) = \frac{\rho_1 - \rho_2}{2\Omega\sigma \sin \theta}, \quad (27)$$

где t_1 , t_2 — моменты измерений расстояний ρ_1 , ρ_2 ; σ — расстояние станции наблюдения от оси вращения Земли; Ω — скорость вращения Земли; 2θ — угол поворота между моментами t_1 и t_2 .

Точность, с которой можно определить t_m , определяется выражением

$$\Delta t_m = \frac{\Delta(\rho_1 - \rho_2)}{2\Omega\sigma \sin \theta}. \quad (28)$$

Для $\Delta(\rho_1 - \rho_2) = 15$ см $\Delta t_m = 0,25$ мс.

Аналогичные наблюдения на двух станциях позволяют определить разность их геоцентрических долгот. Если измерения расстояний вблизи момента t_m использовать для улучшения теории движения Луны, то флуктуации величин $r - x_m$, L и δ могут быть предсказаны с достаточной точностью для исследования изменений в σ и t (т. е. вариаций движения полюса в направлении станции и вариаций местного звездного времени). Комбинированные наблюдения с двух станций дадут, кроме того, другие компоненты движения полюса. При точности определения времени t_m , упомянутой выше, положение полюса может быть определено с точностью 15 см.

3.1.5. Поправки за показатель преломления атмосферы. Важное решение вопроса со времени начала этого эксперимента вытекает из работ Хоупфилда [22] и Саастамойнена [23]. Они исходили из предположения, что поскольку атмосфера находится обычно в состоянии, близком к гидростатическому равновесию (с точностью порядка 10^{-4}), то хорошее предсказание для атмосферной поправ-

ки в расстояние может быть сделано на основе измерений давления на поверхности Земли, так как

$$P = \int_{\text{пов-сть}}^{\infty} g \cdot \rho(z) dz, \quad (29)$$

где g — ускорение силы тяжести; ρ — плотность атмосферы.

Отклонения от гидростатического равновесия могут внести ошибку в расстояние менее 3 мм для зенитных расстояний направления наблюдения до 70° . Однако дополнительные ошибки могут быть обусловлены горизонтальным градиентом температуры. Измерения при помощи радиозондов на обсерватории Мак-Доналд и другие подобные измерения показывают, что разумная оценка точности определения атмосферной поправки составляет примерно 1 см. Это значительно лучше, чем первоначальная оценка, равная 6 см [21].

К счастью, сейчас имеются подходящие лазеры с шириной импульса 2 нс и короче, а также надежные фотоумножители для приема света. Точность определения расстояния, равная 1 см, соответствует точности измерения времени $1/15$ нс, которую в действительности трудно получить. Для лазеров с короткими импульсами ожидается средняя квадратическая ошибка отдельного наблюдения 5 см при общей систематической ошибке, не превышающей 2 см.

3.1.6. Точность измерений. Точность определения динамических параметров Земли с учетом неточностей параметров Луны была вычислена на основе довольно совершенной модели, включающей 19 параметров [24]. Неточности линейных параметров Луны были вычислены без учета движения полюса в направлении наземной станции. Для инструментальной точности измерения расстояния 3 см была найдена неточность 17-ти из 19-ти переменных (другие две переменные — σ и λ_E содержат информацию о динамике Земли). Параметры движения Луны, которые имеют неопределенности такого же порядка, что и точность основного расстояния, имеют периоды 13 дней и более. Следовательно, только прямое восхождение Луны L и склонение δ влияют на динамические параметры Земли с более короткими периодами. Можно сказать, что в течение 8 ч наблюдений (по 4 ч до и после прохождения меридиана) изменение расстояния до Луны будет точно известно. Из-за неопределенностей величин L и δ ошибки в определении флукуаций движения полюса и вращения Земли в некоторой степени увеличивались бы, если бы не возможный 27-дневный цикл [25].

3.2. Измерения расстояний до искусственных спутников Земли

В настоящее время на орбитах находятся семь искусственных спутников, оборудованных лазерными отражателями. Первоначально отражатели были предназначены для лазерного слежения

за спутниками, осуществляемого с целью контроля результатов, получаемых при помощи традиционных методов. Как только лазерные системы сопровождения стали более простыми, были начаты измерения расстояний для получения интересной геофизической информации на их основе.

Основная информация, получаемая при помощи лазерных систем слежения, подобна информации, получаемой по измерениям расстояний до Луны, за исключением того факта, что измерения до ИСЗ являются относительно более быстрыми, чем до Луны. С геофизической точки зрения интерес представляют не параметры орбиты спутника, а скорее расхождения между предсказываемыми и наблюдаемыми величинами, которые дают информацию о гравитационном поле Земли [26]. Измерение наблюдаемого геоцентрического положения станций может быть интерпретировано в виде функции движения полюса и длин хорд, соединяющих станции [27].

3.2.1. Лазерные системы слежения. Спутниковая лазерная следящая система в принципе подобна системе, измеряющей расстояния до Луны, описанной выше [28]. Источником света служит импульсный рубиновый лазер с модуляцией добротности и мощностью в импульсе 1 Дж. Полуширина импульсов равна 12—15 нс, а частота повторения 1 Гц. Луч коллимируется 10-кратным телескопом, так что расходимость уменьшается до 1,2 мрад. Приемник — телескоп с апертурой 40 см, формирующий возвращенный свет через интерференционный фильтр на катоде фотоумножителя. Все устройство монтируется на следующем основании, которое управляется ЭВМ.

Измерения расстояний выполняются в пределах периода колебаний счетчика частоты 100 МГц, обеспечивающего точность измерения времени распространения 10 нс (в линейной мере 1,5 м). В настоящее время разрабатываются системы, которые имеют инструментальную точность 25 см, и в конечном счете вполне достижимы точности, которые упоминались в связи с лунным экспериментом.

3.2.2. Геодезические исследования. Эксперимент, выполненный в 1970 г. для исследования возможности измерения расстояния между пунктами земной поверхности посредством лазерного слежения, показал надежные результаты с повторяемостью 25 см на пути 400 км [26]. В качестве применения такого рода лазерных измерений расстояний был начат эксперимент на разломе Сан-Андреас (San Andreas Fault Experiment — SAFE). Основная идея — измерить накопление напряжений и движение тектонической плиты путем измерений расстояний между станциями, расположенными на противоположных частях разлома Сан-Андреас, способом, подобным экспериментам с лазерными дальномерами (см. 5.1), но на значительно больших расстояниях. Увеличение расстояний позволяет широко разместить станции по плитам и, следовательно, дает возможность определять различные виды среднего движения плит.

Некоторые результаты измерения расстояний могут быть использованы также для изучения земных приливов и приливных изменений силы тяжести, так как орбита спутника испытывает слабые возмущения вследствие влияния этих приливных сил. Эксперимент 1970 г. [26] позволил обнаружить возмущения спутниковой орбиты, обусловленные приливами в теле Земли, на основании которых была выполнена оценка числа Лява k_2 .

Предварительный анализ уже полученных данных показывает, что наклонение орбиты космического корабля можно определить с точностью $0,04''$ по 6-часовым данным, используя существующие системы слежения [28a]. Это означает, что положение полюса вращения Земли в меридиане станции слежения может быть определено с точностью примерно 1,2 м в течение одной четверти суток. С учетом новых усовершенствований лазерного способа измерения расстояний было установлено, что можно определить положение полюса с точностью 10 см за несколько десятых долей суток.

4. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕНЗОМЕТРЫ

4.1. Линейные экстензометры

Вторым важным приложением лазерной техники для геофизических исследований является разработка лазерных тензометров. Когда речь идет об измерениях деформаций земной коры (earth strain), то обычно имеют в виду измерения линейных деформаций. Изменения расстояния L между двумя опорными точками сравниваются с длиной L_0 некоторого эталона длины, и линейная деформация (linear strain) вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \Delta(L - L_0)/L. \quad (30)$$

Если предположить, что изменения эталона длины L_0 отсутствуют, то

$$\varepsilon = \Delta L/L. \quad (31)$$

Линейная деформация является просто одним из компонентов тензора деформаций e в однородной и упругой среде. Этот тензор имеет 6 компонентов. На свободной поверхности (поверхности, на которой нормальные компоненты деформации равны нулю) он преобразуется в трехкомпонентный тензор. В декартовых координатах линейная деформация, измеряемая в направлении, составляющем угол θ с осью x , связана с компонентами деформации e_{ij} соотношением

$$\varepsilon = e_{xx} \cos^2 \theta + e_{xy} \cos \theta \sin \theta + e_{yy} \sin^2 \theta. \quad (32)$$

Следовательно, для определения тензора деформаций достаточно измерить линейные деформации в трех различных направлениях.

Концепция линейного тензомера не нова. Действительно, прибор строился еще до начала текущего столетия [29], но только в 1935 г. Беньоф сконструировал современный чувствительный тензомер. Большое количество инструментов, разработанных на его основе, используется в настоящее время. Они состоят в основном из двух столбов, фиксированных по отношению к земле, и стержня, зацементированного в один из столбов и заходящего немного на другой столб. Эталон длины — кварцевый стержень (жест) делается почти равным L — расстоянию, которое исследуется. Изменения небольшого расстояния ($L-L_0$) измеряются различными электромеханическими преобразователями.

Чтобы измерить земную деформацию, которая характерна для окружающей местности (окрестного района), инструмент должен быть достаточно длинным, чтобы осреднить мелкомасштабные неоднородности основания, на котором он покоится. Обычно тензомеры имеют длину порядка 10^2 м. К сожалению, это порождает проблемы механической и температурной стабильности эталона длины. Кварц (плавленый кремний), который обладает превосходными механическими свойствами, имеет коэффициент температурного расширения $5 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}$. Вряд ли найдется любой подходящий материал, который был бы намного лучше. Следовательно, чтобы достичь стабильности 10^{-10} , температура по длине тензомера должна быть известна или поддерживаться постоянной с точностью $2 \cdot 10^{-4}^\circ$. При расположении инструмента глубоко под землей в шахтном стволе или тоннеле обеспечивается приемлемая стабильность температуры. Однако, когда измерения распространяются на низкие частоты, то температурная стабильность становится менее надежной; следовательно, в записи начинают преобладать шумы. Кроме того, шахтные стволы или тоннели не являются наиболее подходящими местами, в которых исследуют деформации Земли. Обычно их строительство вызывает большое число изломов породы и во многих шахтах геологическое строение по своей природе неоднородно.

4.2. Применение лазеров в линейных экстензометрах

С разработкой лазера как когерентного источника света стало возможным распространить метод оптической интерферометрии на значительные расстояния. С обычными источниками света измерялись расстояния порядка нескольких сантиметров. Благодаря когерентности лазеров, лазерные интерферометры успешно работали на расстояниях до 1 км [30].

Устройство в простейшем виде представляет собой интерферометр Майкельсона (хотя используются также и другие интерферометры, в частности интерферометр Фабри — Перо), содержащий источник излучения, светоделительное устройство, зеркало опорного канала на одном столбе и зеркало измерительного канала на другом столбе, удаленном на расстояние L . Свет от удаленного отражателя интерферирует со светом от местного зеркала, обра-

зую классическую интерференционную картину. В измерительном канале должно поддерживаться постоянное давление (обычно он вакуумируется) с целью ослабления влияния деформаций волнового фронта в такой степени, чтобы интерференционная картина была хорошо видимой, и уменьшения величин поправок за преломление. Интенсивность света в некоторой точке интерференционной картины связана с длиной измерительного канала выражением

$$I = I_0 \cos(4\pi L/\eta\lambda), \quad (33)$$

где λ — длина волны лазера; η — показатель преломления вдоль пути длиной L . Максимумы интенсивности получаются, когда L кратно целому числу длин полуволн лазерного излучения. Если L изменяется, то полосы перемещаются в поле зрения. Регистрируя перемещение полос при помощи фотодетектора, можно измерить расстояние ΔL в длинах полуволн $\lambda/2$. Для He-Ne лазера $\lambda \approx 6 \times 10^{-5}$ см и, следовательно, для интерферометра с измерительным каналом длиной 1 км наименьшая величина регистрируемой деформации — НВД (the least count strain — LCS) составит $3 \cdot 10^{-10}$. Заметим, что в этом инструменте эталон длины уже не близок к L , как в случае обычного тензометра.

4.3. Длина волны лазера

К сожалению, длина волны лазера не является достаточно подходящей в качестве эталона длины для этих целей. Выходное излучение лазера, будучи высокомонокроматичным, не отличается высоким постоянством частоты. Иначе говоря, свет лазера является монокроматичным только в течение очень короткого времени. В любой текущий момент спектр выходного излучения лазера является очень узким, но центр этой узкой линии может перемещаться так, что для периодов, сравнимых со временем жизни лазера (несколько месяцев), $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-6}$.

Естественная ширина линии или спектр Фурье атомного перехода, который приводит к лазерному действию, подобны Фурье-спектру затухающего гармонического осциллятора с коэффициентом затухания γ и резонансной частотой ν_0 , т. е.

$$I(\nu) = I_0 \frac{\gamma}{2\pi} \left[(\nu - \nu_0)^2 + \frac{\gamma^2}{4} \right]^{-1}, \quad (34)$$

где

$$I_0 = \int_{-\infty}^{\infty} I(\nu) d\nu$$

и ширина линии $\Delta\nu_n = \gamma$. Для постоянной схемы с двумя энергетическими уровнями величина γ равна вероятности перехода, связанной со временем жизни перехода τ соотношением $\gamma = 1/\tau$. У большинства газовых лазеров естественная ширина спектра может достигать 1 Гц, т. е. $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-14}$ [31]. С крайней предосторожностью в [32] сообщалось о мгновенной ширине линии, равной

10^{-13} . Однако долговременная стабильность или повторяемость (resettability) — другое дело.

Так как лазерное действие происходит в раскаленной возбужденной плазме (a hot excited plasma), имеет место значительный доплеровский сдвиг частоты каждого элементарного излучателя (атома). При тепловом равновесии атомы газа имеют непрерывное распределение скоростей, подчиняющееся статистике Максвелла—Больцмана вида

$$dn = n \left[\frac{M}{2kT} \right]^{1/2} \exp \left[\frac{-Mv_x^2}{2kT} \right] dv_x, \quad (35)$$

где dn — число атомов из общего их количества n , скорости которых заключены между v_x и $v_x + dv_x$; M — атомная масса; k — постоянная Больцмана. Профиль линии, расширенной эффектом Доплера, является, следовательно, гауссовым с доплеровской шириной

$$\Delta v_0 = 2v_0 \left[2 \ln 2 \frac{kT}{Mc^2} \right]^{1/2} = 7,17 \cdot 10^{-7} v_0 (T/M)^{1/2}. \quad (36)$$

Для линии неона 6328 Å ($M' = 20$)

$$\Delta v_0/v_0 = 2,8 \cdot 10^{-6}.$$

Эквивалентная добротность атомного перехода равна

$$Q_A = 3,6 \cdot 10^5.$$

Выходная частота лазера является функцией формы линии атомного перехода и характеристики передачи резонатора Фабри—Перо, образующего резонатор лазера [32а],

$$\frac{1}{\nu} = \left(\frac{1}{Q_A + Q_c} \right) \left(\frac{Q_A}{\nu_A} + \frac{Q_c}{\nu_c} \right), \quad (37)$$

где Q_A и Q_c — Q -факторы резонансов атомного перехода и резонатора, а ν_A и ν_c — их резонансные частоты. Для лазера с 15-см резонатором и шириной линии в 100 раз более узкой, чем расстояние между модами, $Q_c = 5 \cdot 10^7$. В противоположность этому добротность лазера, расширенного эффектом Доплера, равна $Q_A = 3,6 \cdot 10^5$. Если $Q_A \ll Q_c$, то частота излучения лазера приближается к резонансной частоте резонатора, т. е. $\nu \approx \nu_c$. Следовательно, атомный переход определяет частоту выходного излучения лазера только в пределах ширины линии перехода (доли от 10^6), в то время как точная частота выходного излучения устанавливается резонатором лазера.

Стабильность частоты выходного излучения лазера зависит от изменений оптической длины резонатора

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta(\eta l)}{\eta l} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \eta}{\eta}, \quad (38)$$

где η — показатель преломления на пути распространения колебаний.

Первый член $\Delta l/l$ определяется механической стабильностью конструкции резонатора, которая может быть исполнена достаточно хорошо, и его тепловым расширением, которое требует контроля

температуры. Член $\Delta\eta/\eta$ зависит от плотности плазмы в активном веществе лазера, а также от изменения плотности остаточного воздушного промежутка в резонаторе лазера. Плотность плазмы зависит от степени ионизации газа и от отношения парциальных давлений He и Ne в плазменной трубке. Степень ионизации может управляться путем регулирования тока, протекающего через трубку, но контроль отношения газов трудно осуществить, так как скорости диффузии He и Ne совершенно различны. Стабильность плотности остаточного воздушного пути в лазере нуждается как в температурном, так и в барометрическом контроле.

4.4. Методы стабилизации частоты излучения лазеров

Чтобы обойти проблемы, отмеченные выше, были использованы различные методы стабилизации частоты излучения лазеров. Они разделяются на две большие категории: одна привязывает частоту лазера к атомным линиям, которые являются особенно узкими или имеют узкие составляющие; вторая использует оптически пассивные резонаторы. Прежде чем рассматривать упомянутые категории, остановимся на способах определения стабильности частоты лазеров.

Большинство распространенных способов определения стабильности частоты лазеров сводится к наблюдениям частотного спектра биений колебаний двух одинаковых, но независимо стабилизированных лазеров. Однако результаты, получаемые этим способом, являются неопределенными, так как могут быть систематические возмущения, которые влияют на оба лазера одинаково и, следовательно, не проявляются в спектре биений. Неопределенность может быть уменьшена до некоторой степени путем измерений, выполненных с опорным третьим лазером и с опорным эталоном длины волны излучения криптона 86 [33], несмотря на то, что этот эталон имеет кратковременную стабильность, которая в лучшем случае составляет только $2 \cdot 10^{-9}$ [34]. Стабильность He-Ne лазера для коротких промежутков времени (коротких по сравнению со временем жизни лазера) оценивается величиной $5 \cdot 10^{-9}$ [35]. Однако сравнение двух частот лазеров одинакового изготовления показало расхождение, равное 10^{-7} , которое вызвано различием рабочих параметров.

Как уже упоминалось во введении, параллельная разработка обширного ряда лазеров, мазеров, микроволновых генераторов и широкополосных детекторов сделали возможным сравнить оптическую частоту лазера с частотой цезиевых часов (cesium beam clock). Этот источник является международным эталоном времени и имеет частоту $9 \cdot 10^9$ Гц с долговременной стабильностью $2 \cdot 10^{-12}$ [36]. Сравнение производится преобразованием частоты лазера к частоте цезиевого луча при помощи ряда гетеродинов. Этот процесс позволит ввести один эталон как времени, так и длины, связанных чрезвычайно точной величиной скорости света [3].

4.4.1. *Стабилизация по провалу Лэмба.* Имеется несколько способов стабилизации лазеров при помощи атомного эталона [37]. Основным способом стабилизации по атомной линии, наиболее часто используемым в серийно выпускаемых лазерах, является стабилизация по провалу Лэмба. Спектр выходного излучения лазера имеет характерный провал (провал Лэмба) в центре линии атомного перехода, расширенной эффектом Доплера. Лазер незначительно модулируется по частоте перемещением одного из зеркал резонатора и наблюдается интенсивность выходного сигнала. Для определения средней частоты выходного излучения ν_0 — центра линии путем детектирования положения локального минимума используются фазометрические схемы. Недостатком метода является требование частотной модуляции выходного сигнала. Обычно девиация частоты составляет 5 МГц, а частота изменения частоты модуляции около 5 кГц. Максимальная скорость изменения частоты равна $2,5 \cdot 10^9$ Гц/с. Применительно к интерферометрическим измерениям это означает, что свет, отраженный от удаленного отражателя, имеет частоту, отличающуюся от той, которую имеет свет, с которым он должен интерферировать (для 800 м различие составляет 125 кГц). Следовательно, интерференционная картина будет в основном результатом биений колебаний двух частот, и полосы картины будут быстро осциллировать.

4.4.2. *Дисперсионная стабилизация.* Второй метод, предложенный Беннетом и др. [38], называется дисперсионной стабилизацией. Поскольку частота выходного излучения лазера является функцией резонансной частоты резонатора ν_c и центральной частоты линии атомного перехода, можно показать, что при изменении усиления лазера частота выходного излучения будет затягиваться на различные величины по направлению к резонансной частоте резонатора

$$\Delta\nu = \frac{c}{2\pi H} \left(1 - 0,94 \frac{H}{2\Delta\nu_0} \right) \frac{l}{L} (\nu - \nu_A) \Delta G, \quad (39)$$

где H — двойная естественная ширина линии; ν — частота выходного излучения лазера; ν_A — центральная частота атомной линии; $\Delta\nu_0$ — ширина линии с учетом эффекта Доплера; ΔG — изменение усиления. Величина эффекта зависит от того, как далеко находится частота излучения лазера от центра линии; его знак изменяется, когда частота излучения лазера проходит через центральную частоту линии. Следовательно, дискриминант (параметр различения), подходящий для частотной стабилизации, получается путем гетеродинирования контролируемого лазера другим локальным (местным) осциллятором и наблюдения изменений частоты биений в процессе модуляции усиления.

С использованием этого метода были получены достаточно хорошие результаты: за период, равный 8 ч, стабильность оказалась лучше, чем 10^{-11} [38].

4.4.3. *Стабилизация при помощи эффекта Зеемана.* Частотный дискриминатор можно получить используя внешнюю поглощаю-

щую ячейку. Поглощающая ячейка Зеемана расщепляет атомный переход при наложении осевого магнитного поля. Если свет с круговой поляризацией проходит через ячейку, то составляющая с правой круговой поляризацией взаимодействует только с низкой частотой ($\Delta m = -1$) перехода, в то время как составляющая с левой круговой поляризацией взаимодействует только с высокой частотой ($\Delta m = +1$) перехода. Различие поглощений света каждой поляризации на частоте ν пропорционально различию между ν и ν_A — центральной частотой линии. Если магнитное поле поддерживать постоянным, а направление круговой поляризации лазерного луча манипулировать, то можно получить частотный дискриминатор. Рассмотрение отношения сигнал/шум для приемлемых параметров показывает, что этот метод имеет предел по обнаружению (т. е. предел, для которого отношение сигнал/шум равно единице), соответствующий $\Delta\nu/\nu = 5 \cdot 10^{-11}$. На практике было достигнуто значение $\Delta\nu/\nu = 10^{-9}$ [39].

Другой, почти подобный метод [40] использует осевое магнитное поле, прикладываемое непосредственно к плазменной трубке одномодового лазера. Это вызывает круговое двойное лучепреломление, и вырождение моды снимается. Лазер одновременно генерирует колебания двух различных частот — одно колебание с левой круговой поляризацией, а второе — с правой круговой поляризацией. Оба колебания имеют одинаковые амплитуды лишь в том случае, когда расщепление симметрично относительно центра линии; следовательно, при наблюдении амплитуд обоих компонентов образуется частотный дискриминатор.

4.4.4. Стабилизация насыщением поглощения. Одним из наиболее перспективных методов частотной стабилизации, разработанных к настоящему времени, является метод, представленный в недавней работе Холла и Баргера [41]. В этом методе поглощающая ячейка, наполненная метаном, помещается в лазерной резонатор последовательно с He-Ne плазменной трубкой. He-Ne трубка может обеспечивать усиление в широкой полосе частот, о чем уже упоминалось. Кроме того, резонатор можно сконструировать так, чтобы генерировалась только одна аксиальная мода (одночастотный лазер). Результирующая стоячая волновая картина в резонаторе может рассматриваться как сумма двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях. В метановой ячейке элементарный поглотитель (молекула) может взаимодействовать только с одной из распространяющихся волн, так как скорость поглотителя приведет к эффекту, как будто две распространяющиеся волны имеют различные частоты. Только те молекулы, которые имеют доплеровский сдвиг, одинаковый для обеих распространяющихся волн, могут взаимодействовать с ними обеими. Это поглотители с нулевым доплеровским сдвигом, т. е. стационарные поглотители. Если частота лазера настраивается на центр резонансной частоты метана, которая является просто частотой резонанса этих частиц, находящихся в состоянии покоя, то обе распространяющиеся волны взаимодействуют с молекулами. Результатом

взаимодействую является ликвидация поглотителей этой частоты, увеличивающаяся к выходу лазера. Частотный интервал, на котором обе волны могут взаимодействовать с поглотителями, является просто естественной шириной линии атомного резонанса. Этим способом определяются Q большие, чем 10^9 . Более важным, однако, является малое смещение центра линии вследствие флуктуаций давления (менее 10^{-11} /мТор), пренебрегаемое малое смещение Штарка и слабое взаимодействие с магнитными полями (после

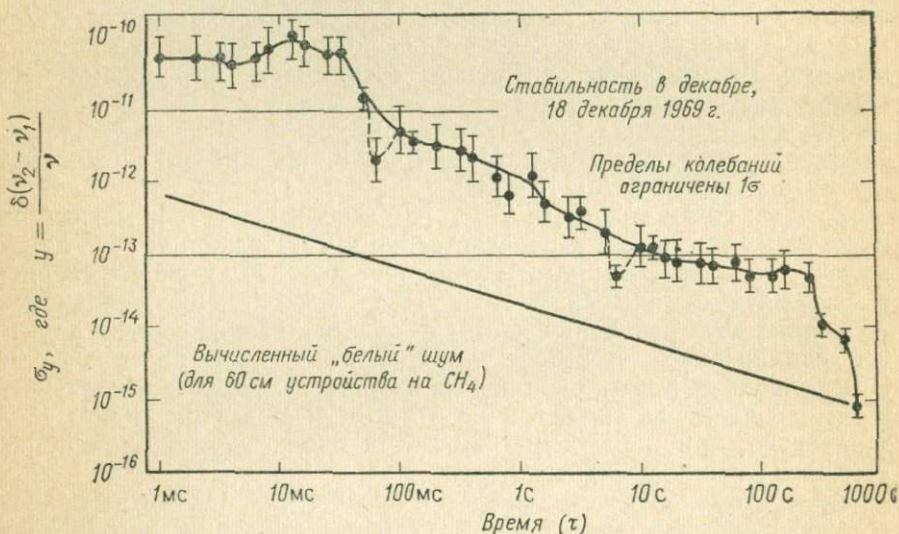


Рис. 10. Результаты исследований схемы с метановой стабилизацией. Отклонение Аппе вычислялось по средним флуктуациям частоты биений колебаний двух независимо стабилизированных лазеров как функция времени осреднения. Отклонение является отношением этих величин к частоте выходного излучения лазера ($\approx 10^{14}$ Гц) (по Левину и Холлу [42])

Земли приводит к расщеплению центра линии на 500 Гц). Стабильность этой системы измерялась при помощи биений колебаний от двух независимо стабилизированных лазеров с одновременной записью результатов, которая изображена на рис. 10. За период времени, показанный на рис. 10, стабильность была заметно лучше, чем 10^{-12} . Весьма удачные лазерные тензометры, использующие эту линию метана в качестве эталона длины [42], будут описаны в п. 4.6.

Система на метане представляет некоторые трудности в интерферометре с большой длиной пути, так как ее выходное излучение лежит в ИК-области спектра. Однако совсем недавно Хейнс и Бейрд [43] и Бейрд [44] разработали аналогичную систему, использующую сверхтонкую составляющую линии поглощения I_2 на длине волны $\lambda = 6330$ Å. Они оценивают точность системы в $2 \cdot 10^{-9}$.

4.4.5. Стабилизация с использованием пассивных оптических резонаторов. Второй класс стабилизаторов использует оптические

открытые резонаторы. Резонаторы с высокими Q широко используются в микроволновых приложениях со времени их разработки Паундом в 1946 г. Действительно, использование оптических открытых резонаторов с высокими Q было неотъемлемой частью разработки лазеров. В своей основе этот метод перекладывает проблему стабилизации с резонатора лазера на внешний резонатор. Это дает свои преимущества: упрощается контроль окружающей среды (environmental control), так как отсутствует газоразрядная трубка. Частотную модуляцию колебаний, возникающих в оптическом резонаторе, можно осуществлять одновременно с частотной модуляцией выходного излучения лазера.

В качестве оптического резонатора обычно используется резонатор Фабри — Перо. На практике легко достигаются Q порядка 10^8 . Это соответствует

резонансной ширине линии 5 МГц и, следовательно, при регистрации центра этого пика с точностью 10^{-4} можно получить точность стабилизации частоты 10^{-12} .

Резонатор Фабри — Перо состоит из двух параллельных зеркал, установленных на заданном расстоянии друг от друга (рис. 11). Функция передачи резонатора $T(\nu)$, равная отношению интенсивностей излучаемого и падающего света (см. п. 1.2.1), имеет вид

$$T(\nu) = (1 + F \sin^2 \varphi)^{-1}, \quad (40)$$

где

$$\varphi = (2\pi\eta l\nu/c) \cos \theta.$$

Максимумы коэффициента передачи образуются при

$$\varphi_0 = m\pi,$$

где m — целое число, или

$$\nu_0 = \frac{mc}{2\eta l \cos \theta}.$$

Тогда в окрестности максимума

$$T_0(\nu) = 1 - F \left(\frac{m\pi}{\nu_0} \right)^2 (\nu - \nu_0)^2. \quad (41)$$

Таким образом, измеряя интенсивность излучаемого света, получают частотный дискриминант (параметр различения частоты), амплитуда которого пропорциональна $(\nu - \nu_0)^2$, а фаза определяет знак разности $(\nu - \nu_0)$.

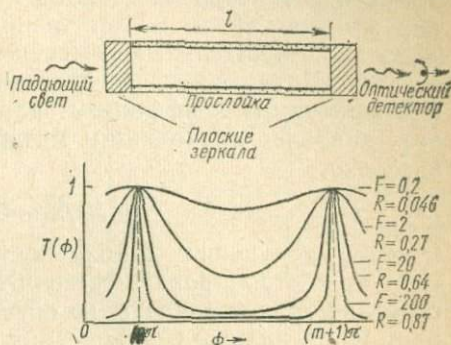


Рис. 11. Оптический резонатор Фабри — Перо

Главным недостатком такой системы является то, что резонансная частота ν_0 находится в линейной зависимости от длины резонатора l , т. е.

$$\frac{\Delta \nu_0}{\nu_0} = - \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0}. \quad (42)$$

Так как резонатор является по существу пассивным элементом, окружающая среда может точно контролироваться. Вместе с тем довольно значительные изменения длины будут все же возникать вследствие теплового воздействия на пространственную трубку. Температурный коэффициент плавленого кремния, который является наиболее подходящим материалом, равен $5 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}$ и, следовательно,

$$\Delta \lambda / \lambda = 5 \cdot 10^{-7} / ^\circ\text{C}.$$

Для получения стабильности длины волны, равной 10^{-10} , следует контролировать температуру с точностью $0^{\circ},001$. Это не особенно трудно сделать, но остаются еще неизвестными деформации, происходящие в кварцевой трубке. Кварц, обжигаемый должным образом и помещаемый в хорошо контролируемое окружение, вероятно проявляет более высокую механическую стабильность, чем другие материалы, но изменения в трубке будут неразличимы от вековых изменений длины волны. Верхним пределом этого является просто наблюдаемая скорость геофизической вековой деформации, измеренная лазерным тензомером, управляемым таким устройством: $1,5 \cdot 10^{-7}$ в год [49].

4.5. Интерферометр Майкельсона

Двухкомпонентный 800-метровый лазерный тензомер с кварцевым резонатором в качестве эталона длины непрерывно используется Калифорнийским университетом, Сан-Диего в Национальном парке Сан-Бернардино, расположенном между системами разломов Сан-Андреас и Сан-Джасинто. Аналогичное устройство [46, 47] функционировало в Камп-Эллиотте вблизи Сан-Диего в течение последних трех лет.

4.5.1. Механическая часть. Конечными точками тензомера являются 4-метровые колонны из черного гранита с поперечным сечением примерно 1 м^2 (рис. 12). Они устанавливаются в шурфах, пробуренных в земле на глубину примерно 3 м, и цементируются снизу в пределах 1 м. Остальная часть шурфа заполняется изолирующим материалом. Предполагают, что таким образом можно отделить колонны от поверхностного слоя земли, который испытывает заметные температурные изменения и может вызвать впоследствии термоупругие деформации. Колонны помещаются не в коренную породу, а в полутвердый гранит, который расположен выше и постепенно переходит в коренную породу примерно в 10 м от поверхности земли. Верхние 50 см или около того совершенно не уплотнены и вполне вероятно, что этот слой обеспечивает значи-

тельную температурную изоляцию. В то же время он слишком слаб для того, чтобы препятствовать значительной деформации теплового происхождения более низких слоев.

Вокруг каждой колонны строятся изолирующие сооружения. После этого инструментальная колонна заключается в массивный кожух, обеспечивающий максимальную тепловую и звуковую изоляцию. Термостаты (heat pumps) поддерживают температуру со-

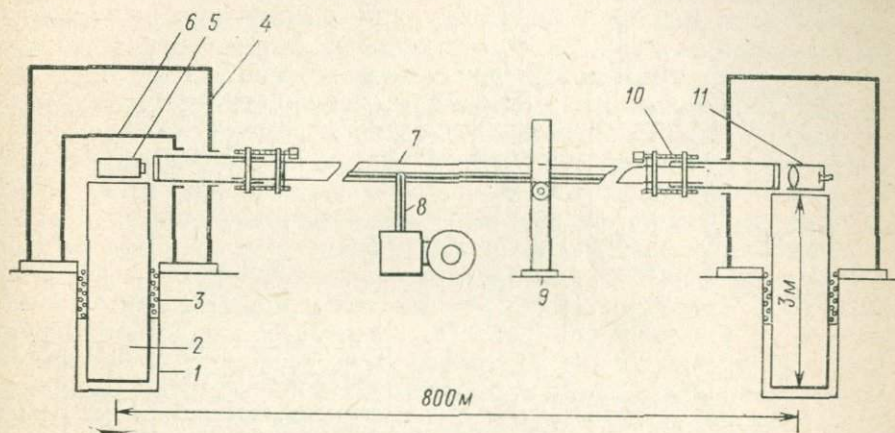


Рис. 12. Лазерный тензометр: механическая часть (по Бергеру и Лавбергу [46]). 1 — бетон; 2 — столб из черного гранита; 3 — пеностирол; 4 — сооружение с контролируемой температурой; 5 — интерферометр; 6 — изолирующий кожух; 7 — вакуумированная труба; 8 — вакуумный насос; 9 — суппорт; 10 — сервоуправление длиной трубы; 11 — удаленный отражатель

оружия постоянной с точностью 3°C , в то время как изменения температуры инструментальной колонны поддерживаются в пределах 5°C .

Оптический канал длиной 800 м между концевыми столбами (колоннами) заключен в вакуумированную алюминиевую трубу. Труба, состоящая из 7,3-метровых секций, скрепляется в единое целое «о»-образными кольцами. Она опирается на землю только в средней точке. Роликовые суппорты позволяют ей свободно изменять длину в соответствии с изменениями внешней температуры (± 25 см на каждом конце). Телескопические соединения на концах поддерживают длину трубы (the tube end-pier distance) постоянной с точностью $5 \cdot 10^{-3}$ см. Труба вакуумируется до давления 10^{-3} Тор двумя механическими насосами, которые работают непрерывно со скоростью 1500 л/мин.

Вследствие вогнутости вертикального профиля вдоль одной из линий необходимо было изогнуть оптический канал в средней точке на угол порядка 3° . Это позволило установить трубу в пределах 7 футов от земли вдоль всей ее длины без земляных работ. Световой луч поворачивается в средней точке посредством согласованного ряда взаимно поворачивающихся призм.

4.5.2. *Оптическая часть.* Источником света в тензометре служит одномодовый He-Ne лазер с выходной мощностью 100 мкВт, рабо-

тающий на длине волны 6328 Å. Плазменная трубка с холодным катодом, возбуждаемая постоянным током, монтируется в массивном инварном резонаторе, обладающем высокой стабильностью к температурным и акустическим возмущениям. Плазменная трубка может управляться без движения резонатора и, следовательно, без расстройки оптической регулировки инструмента. На концах резонатора устанавливаются диэлектрические зеркала — плоское на

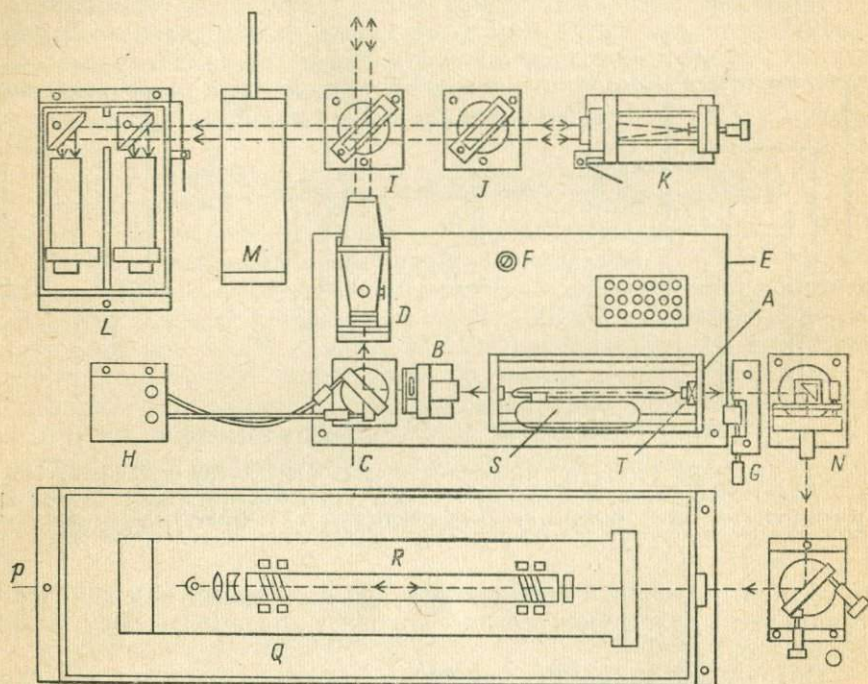


Рис. 13. Лазерный тензомер: оптическая часть (по Бергеру и Лавбергу [46])

одном конце и полусферическое, смонтированное на пьезоэлектрическом элементе, — на другом конце. Такая система позволяет изменять длину резонатора и, следовательно, управлять частотой излучения лазера (рис. 13).

Лазер должен быть изолирован от остального оптического тракта так, чтобы лишь пренебрегаемо малое количество света отражалось к нему от интерферометра. Если свет от отражателя попадает на вход лазера, то образуются в сущности два связанных объемных резонатора; внешний резонатор, образуемый отражателем, оказывает влияние на частоту выходного излучения лазера. Хотя добротность внешнего резонатора мала по сравнению с добротностью лазера, его значительно большая длина приводит к очень близкому расположению соседних аксиальных мод. Резонансный максимум внешнего резонатора (интерферометра) будет всегда находиться внутри ширины линии резонатора лазера. Следовательно,

частота выходного излучения лазера будет незначительно затягиваться по направлению к пику резонатора интерферометра [42, 48]. В экстремальном случае затягивания частоты лазер будет жестко привязан к внешнему резонатору и при изменении длины плеча интерферометра полосы будут оставаться неподвижными, а частота лазера будет изменяться. Измерения деформаций, основанные на подсчете интерференционных полос, в таком случае окажутся бессмысленными. Было рассчитано [48], что для того, чтобы «затягивание» не превышало $1 \cdot 10^{-10}$, отношение изоляции (т. е. отношение света, излучаемого лазером, к свету, возвращающемуся к нему обратно) должно быть равным по меньшей мере 10^8 .

В качестве светоделителя используются призма Глан-Томпсона (типа призмы Николя) и четвертьволновая пластинка. Призма линейно поляризует свет лазера и позволяет вращать направление (плоскость) поляризации, а четвертьволновая пластинка осуществляет круговую поляризацию. Поляризация света, отраженного удаленным (или местным) отражателем, остается круговой, но ее направление противоположно направлению поляризации излучаемого сигнала. После прохождения четвертьволновой пластинки принимаемый луч станет снова линейно поляризованным, но плоскость его поляризации будет перпендикулярна плоскости поляризации выходящего луча. Следовательно, поляризационная призма будет блокировать попадание этого света в резонатор лазера.

Управление лучом осуществляется при помощи двух отдельных систем. Для приближенной регулировки лазер, разделитель и устройство расширения луча монтируются на подвижном основании с двумя степенями свободы — вращения вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Это позволяет направить луч первоначально так, чтобы он возвращался обратно к базе интерферометра. Вторая система точного контроля, представляющая собой зеркало, смонтированное в кардановом подвесе и снабженное дифференциальными микрометрами, управляет положением луча между лазером и коллиматором. Система снабжена мотором, что позволяет осуществлять дистанционное управление лучом.

После отражения от точно управляемого зеркала свет проходит коллиматор луча, который содержит расширяющую линзу, пространственный фильтр и коллимирующую линзу. Коллиматор расширяет луч примерно от 5 до 25 мм для уменьшения дифракционного расхождения. Пространственным фильтром служит отверстие диаметром 50 мкм, главной функцией которого в одномодовом лазере является фильтрация света, рассеиваемого малыми частицами (пылинками) на оптике до этой точки в схеме. Он достаточно велик, чтобы аккомодировать малые поперечные перекосы и вертикальные сдвиги фокального пятна, вызываемые зеркалом с точной регулировкой.

После этого часть света направляется на местный отражатель, а другая его часть — через трубу на удаленный отражатель. В качестве отражателей используются системы типа «кошачий глаз», состоящие из собирательных линз и плоского зеркала, которое

монтируется на микрометричном винте для фокусировки отраженного луча. Выходящий луч фокусируется на удаленном отражателе. Здесь пространственный фильтр принимает только центральное пятно дифракционной картины. Удаленный отражатель фокусируется так, чтобы придать обратному лучу небольшое расхождение и тем самым уменьшить влияние смещения любого луча, вызванного управлением.

У входа в местный отражатель в оптический канал вводится фазорегулятор. Этот элемент задерживает фазу одной половины луча по отношению к другой половине на 90° для определения направления движения полос. Фазорегулятор состоит из оптической пластинки, два противолежащих квадранта которой покрыты диэлектриком так, что фаза луча задерживается в них на 45° , а другие два квадранта прозрачны. Отражатель поворачивает луч на 180° , поэтому два квадранта луча дважды проходят через покрытые участки пластинки и, следовательно, имеют фазы, сдвинутые по отношению к фазам других двух квадрантов на 90° .

После рекомбинации опорного и измерительного лучей четыре квадранта сигнала разделяются системой зеркал. Два сдвинутых по фазе квадранта направляются на один ФЭУ, а другие два — на другой ФЭУ. Для того чтобы избавиться от паразитной засветки, перед ФЭУ устанавливается узкополосный фильтр, пропускающий свет с длиной волны 6328 \AA .

4.5.3. *Электронный отсчет.* Сдвиг по фазе 90° между двумя сигналами ФЭУ используется в цифровой схеме для определения знака изменения длины измерительного канала. Интерференционные полосы, попадающие на ФЭУ, вырабатывают сигналы

$$V_x = I_0 + I_1 \cos(4\pi L\varepsilon/\lambda) \quad (43)$$

и

$$V_y = I_0 + I_1 \cos(4\pi L\varepsilon/\lambda + \varphi). \quad (44)$$

Если оптика отъюстирована правильно, то $\varphi = \pi/2$ и переменные компоненты сигналов будут равны

$$V_x = I_1 \cos(4\pi L\varepsilon/\lambda) \quad (45)$$

и

$$V_y = I_1 \sin(4\pi L\varepsilon/\lambda). \quad (46)$$

В этом случае

$$V_x^2 + V_y^2 = I_1^2. \quad (47)$$

и

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{V_y}{V_x} = \operatorname{tg}(4\pi L\varepsilon/\lambda). \quad (48)$$

Если эти два сигнала приложить к x - и y - входам осциллографа, результирующая картина будет представлять собой пятно, движущееся по окружности радиуса I_1 , с угловым положением θ , связанным с мгновенным значением деформации соотношением вида

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{4\pi L} \operatorname{ctg} \left(\frac{V_y}{V_x} \right). \quad (49)$$

Каждый полный оборот пятна соответствует одной полосе интерференционной картины или изменению деформации на величину

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{2L} = 4 \cdot 10^{-10}.$$

Цифровое электронное устройство дает единицу на каждые 90° поворота пятна. Следовательно, одной полосе будут соответствовать четыре единицы и наименьшая величина деформации составит

$$\text{НВД} = \frac{1}{4} (\lambda/2L) = 10^{-10} \quad \text{для } L = 800 \text{ м.}$$

В принципе чувствительность этого инструмента может быть заметно увеличена высокоточным разрешением углового положения пятна при помощи фигур Лиссажу. Быстрая оцифровка выходного сигнала ФЭУ и вычисление в микроЭВМ являются вполне осуществимыми. В этом методе деформация вычисляется, как и прежде, по формуле (49), но степень оцифровки является более тонкой и, следовательно, разрешение увеличивается.

Другая система, динамически следящая за движением полос при помощи гальванометра, использовалась в лазерном тензомере Вашингтонского университета [30]. Полосы интерференционной картины фокусируются на зеркало гальванометра, которое отражает их на вершину прямоугольной призмы. Два фотодетектора регистрируют расщепленную интерференционную картину, а сервосистема управляет положением гальванометра таким образом, чтобы направить центр картины на вершину призмы. Выходной аналоговый сигнал заводится обратно на гальванометр. Система может регистрировать движение полос с частотой 300 Гц при динамическом диапазоне в одну полосу.

Конечно, неопределенность частоты лазера будет ухудшать повышенную чувствительность системы, давая больше шума, чем сигнала. При использовании кварцевого эталона долговременная стабильность может быть намного лучше и, следовательно, увеличение чувствительности в сейсмической полосе ($f > 1$ колебание в год) до 10^{-12} или примерно до такой величины будет, вероятно, выгодным.

4.6. Интерферометр Фабри — Перо

Совершенно другой подход был использован Левиным и Холлом [42] в Колорадском университете (рис. 14). Этот тензомер, расположенный в шахте вблизи Боулдер, шт. Колорадо, использует метановую стабилизацию, описанную выше, и работает в инфракрасной области спектра ($\lambda = 3,39 \cdot 10^{-4}$ см). Измерительным плечом служит 30-метровый интерферометр Фабри — Перо. Один лазер привязан к этому резонатору посредством изменения его длины волны таким образом, что интерференционная картина остается неизмен-

ной. Другой лазер стабилизируется метановой системой и свет от двух лазеров смешивается. Один из компонентов результирующего сигнала имеет амплитуду, которая пропорциональна разности частот лазеров

$$\nu_{\text{биен}} = \nu_{\text{виз.кан}} - \nu_{\text{мет}}. \quad (50)$$

Резонансная частота измерительного канала $\nu_{\text{виз.кан}}$ пропорциональна его длине L . Учитывая, что $\Delta\nu_{\text{мет}} = 0$, для деформации ϵ получим

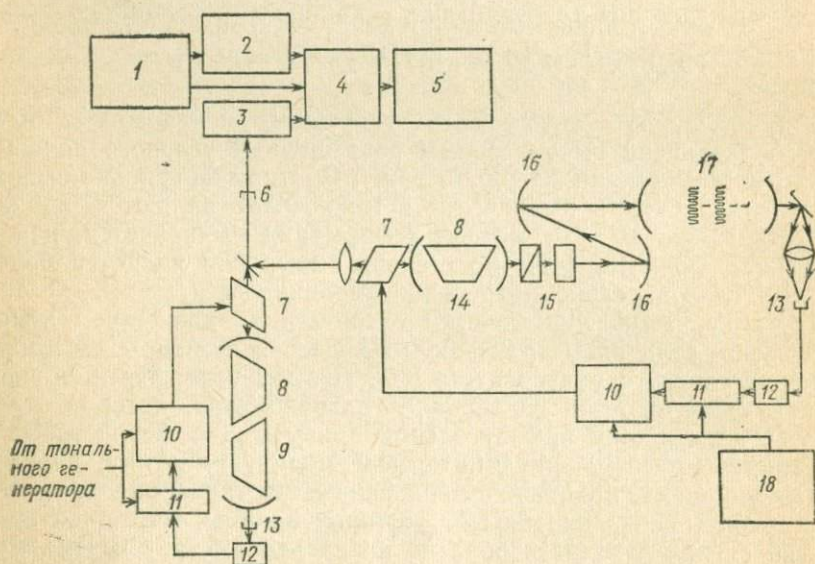


Рис. 14. Лазерный тензометр с метановой стабилизацией (по Левину и Холлу [42]).

1 — кварцевый генератор; 2 — часы истинного времени; 3 — счетчик; 4 — записывающее устройство; 5 — полудюймовый 7-дорожечный магнитофон; 6 — смесительный диод; 7 — пьезоэлектрический кристалл; 8 — ячейка усиления; 9 — ячейка на метане; 10 — фильтры и драйверы; 11 — синхронизатор; 12 — усилитель; 13 — фотодиод; 14 — местный генератор 3,39 мкм; 15 — оптический изолятор; 16 — зеркало, согласующее тип колебаний; 17 — интерферометр 30 м; 18 — тональный генератор

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = - \frac{\nu_{\text{биен}}}{\nu_{\text{виз.кан}}}. \quad (51)$$

Для подсчета частоты биений за некоторый период интегрирования используется цифровая система. Наименьшая вычисляемая этой системой деформация равна

$$\text{НВД} \approx 10^{-14}$$

за период интегрирования, равный 1 с.

Нестабильность системы с метановой стабилизацией плюс систематический и инструментальный шумы, комбинируясь, дают уровень шума, соответствующий деформации $4 \cdot 10^{-12}$ за время интегрирования 1 с [42].

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ И РАССТОЯНИЙ

5.1. Скорости вековых деформаций

Понимание процессов, которые управляют тектоническими движениями, землетрясениями и смещениями вдоль разломов, требует чрезвычайно точного знания поля перемещений (движений) Земли в очень широком спектре. Космологи Дирак и Бранс-Дикке предсказывают вековое уменьшение величины гравитационной постоянной G , которое будет проявляться в скорости деформации, равной 10^{-10} в год по теории Дирака и $3 \cdot 10^{-13}$ — $3 \cdot 10^{-14}$ в год по теории Бранс-Дикке. По независимым геологическим данным другие пришли к значению 10^{-10} в год. Долгопериодические деформации, связанные с геологическими процессами, различаются в значительной степени от места к месту. Сообщалось о скоростях порядка 10^{-5} в год в Японии, 10^{-6} в год в Калифорнии и 10^{-7} в год в Нью-Джерси, которые, по-видимому, отражают степень тектонической активности в этих районах. Предполагают, что в старых стабильных областях, таких, как Канадский щит, скорости вековых деформаций будут даже меньше. Сезонные эффекты, вызываемые изменениями температуры, выпадением снега и влиянием грунтовых вод, также будут присутствовать в сигнале о деформации.

Измерения скоростей вековых деформаций при помощи лазерных тензометров являются скудными вследствие их недавней разработки. Отдельные примерно двухгодичные непрерывные ряды измерений были получены в обсерваториях Камп-Эллиотт и Пиннон-Флэт Калифорнийского университета [49]. Полученные данные свидетельствуют о годовых скоростях деформаций, не превышающих нескольких долей 10^{-7} в год (рис. 15). Это несколько меньше скорости 10^{-6} в год, обычно отмечаемой для Калифорнии, но может быть просто влиянием местоположения обсерваторий. Измерение на тензометре, работающем при университете в Колорадо, несмотря на то, что было органичено коротким промежутком времени, также показывает незначительные скорости деформаций. Обсерватория в Англии, функционирующая при Кембриджском университете, сообщила о вековых скоростях $2 \cdot 10^{-8}$ в сутки [50].

Долгопериодные явления представляют особенный интерес при изучении землетрясений и смещений вдоль разломов. Точности, обеспечиваемые при помощи лазерных дальномерных устройств, позволяют осуществить измерения процессов вязкого течения и освобождения напряжений, связанных с землетрясениями.

Обширные программы контроля смещений вдоль разлома при помощи оптических дальномерных устройств были выполнены в Калифорнии Калифорнийским управлением водных ресурсов и Геологической съемкой США (by the California Department of Water Resources and the U. S., Geological Survey) в течение по-

следних нескольких лет. Первоначально при выполнении программ использовались устройства с дуговыми ртутными лампами. Появление лазерных дальномеров не только повысило точность измерений, но и значительно увеличило их производительность. Дальнейшего увеличения точности и производительности можно ожидать при использовании подходящего для полевых условий двухволнового лазерного дальномерного устройства. При изучении землетря-

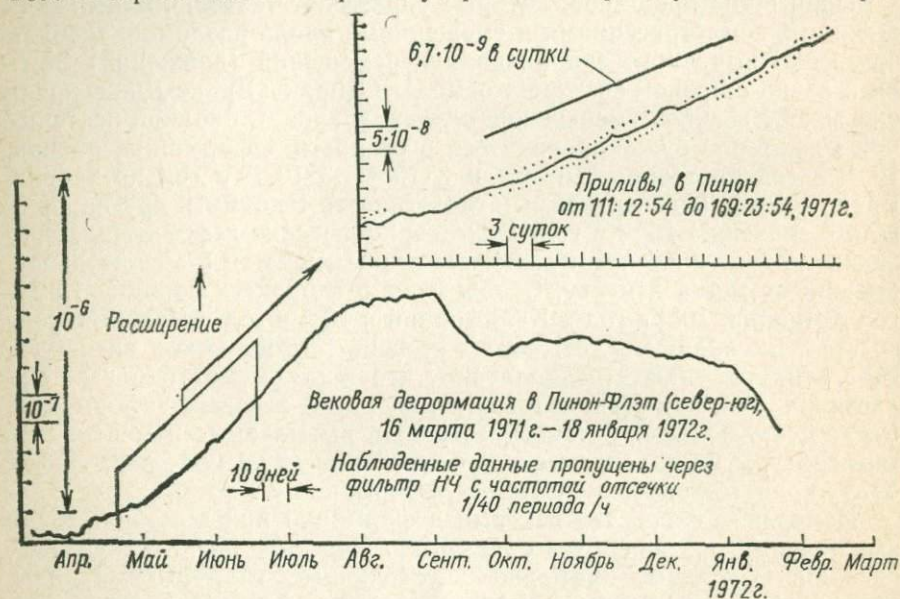


Рис. 15. Запись вековой деформации по данным геофизической обсерватории в Пинон-Флэт. Данные регистрировались через 6 мин и пропущены через фильтр НЧ с частотой отсечки 1/40 периода/ч с целью получения вековой записи. Вставка сверху показывает часть необработанной записи перед фильтрацией

сений важными являются измерения движений действующих разломов. Обычно использовалась схема измерений, изображенная на рис. 16. По измерениям трех линий можно различить смещение (проскальзывание) вдоль разлома (slippage), однородную деформацию (homogeneous strain) и упругое смещение (elastic slippage). Сеть таких линий, пересекающая систему разломов Сан-Андреас от Сан-Франциско до Мексиканской границы, дала очень ценную информацию о тектонических движениях в этой высокоактивной системе разломов. Картина, которая выяснилась на основе этих и других исследований, полезна для отделения опасных зон от тех, которые кажутся относительно безопасными.

Представляется, что сейсмически спокойные зоны не обязательно являются безопасными. Вдоль разлома Сан-Андреас в Калифорнии наблюдается обратная картина. В местах, где смещение вдоль разлома (fault slippage) происходит регулярно, наблюдается

высокая степень сейсмичности, но с малыми амплитудами. Там, где сейсмичность является невысокой и слабой или движения вдоль разлома не отмечаются вообще, подозревают, что может произойти сильное землетрясение. Два значительных (с магнитудой более 8 баллов по шкале Рихтера) калифорнийских землетрясения, которые имели место на разломе Сан-Андреас (землетрясение в 1857 г. в Форт-Тегоне и разрушительное землетрясение в 1906 г. в Сан-Франциско), произошли в таких районах. Современные представ-

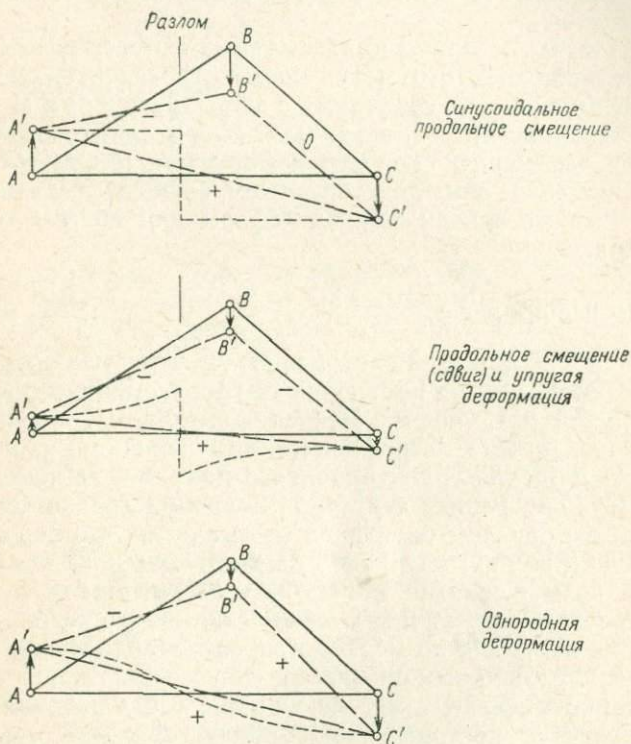


Рис. 16. Расположение лазерного дальномерного устройства над действующим разломом. Окружности показывают конечные точки измеряемых линий, а стрелки — направленные движения станций. Короткие штрихи являются следом линии, проведенной между A и C перед движением разлома. Длинные штрихи изображают измеряемые линии после движения разлома (со знаками «+» или «-» рядом с ними, показывающими направление смещений)

ления о тектонике разлома Сан-Андреас в значительной степени являются результатом работ с геодезическим прибором, выполненных в последнем десятилетии, и состоят в следующем [51]. Общие движения земной коры в районе разлома обуславливаются относительными движениями Североамериканской и Тихоокеанской плит. Разлом

Сан-Андреас образовался в результате совместного действия поперечных смещений плит с продольным скольжением, достигающим 5 см в год. В районе Сан-Бернардино разлом поворачивает от своего преобладающего направления СЗ—ЮВ к направлению почти В—З. Силы, которые ранее вызывали продольное смещение, здесь нормальны к направлению разлома и сжимают его противоположные края. Горные породы, которые оказываются более прочными при сжатии, чем при сдвигах или растяжениях, могут накапливать большие количества энергии, прежде чем произойдет крупное землетрясение.

По результатам лазерных дальномерных измерений в Калифорнии было установлено, что могут возникать «спонтанные деформации» («strain events»), связанные с землетрясениями и, возможно, предшествующие им. «Спонтанные деформации» соответствуют аномальному изменению скорости деформации и для того чтобы наблюдать их, если они действительно случаются, необходимо иметь непрерывные записи земных деформаций вблизи действующих разломов.

5.2. Земные приливы

При помощи длиннопериодных инструментов можно регистрировать реакцию Земли на изменения ее гравитационного поля, вызываемые Луной и Солнцем. Небесная механика, обеспеченная хорошо определенными астрофизическими величинами, позволяет вычислять возмущения гравитационного поля точнее чем до 0,1%. Действительно, внутренняя структура Земли настолько хорошо известна, главным образом благодаря сейсмологии, что перемещения поверхности твердой симметричной Земли, вызванные этими гравитационными возмущениями, могут быть вычислены с точностью порядка 1% [52]. Это означает в сущности, что в пределах диапазона периодов от $\frac{1}{3}$ дня до месяца природа снабдила нас постоянно существующим опорным сигналом.

Чрезвычайно полезным методом анализа наблюдений земных приливов является построение приливной фазовой диаграммы (a tidal phasor diagram) [53] различных приливных компонентов. Вычисляются временные ряды теоретических земных приливов на станции. Вычитанием наблюдаемых серий из теоретических в отдельных точках определяются разностные серии. Теоретические, наблюдаемые и разностные серии подвергаются анализу Фурье. Для каждого экстремума спектра вычисляются отношения наблюдаемой и разностной амплитуд к теоретической амплитуде и определяются разности фаз между теоретическими и наблюдаемыми, теоретическими и разностными пиками. После этого строится приливный фазовый вектор (the tidal phasor) путем присвоения теоретическому пику единичной амплитуды и нулевой фазы и изображения наблюдаемых и разностных векторов с соответствующими амплитудами и фазами по отношению к теоретической. Разностный вектор после сложения с теоретическим должен давать на-

блужденное значение. Он представляет собой сумму всех «шумов» на данной частоте. Этот шум может происходить от воздействия океанических приливов, изменений атмосферного давления и температурных влияний на приливных частотах. Рис. 17 иллюстрирует пример построения приливного фазового вектора для компонента M_2 полусуточной приливной волны на геофизической обсерватории в Пинон-Флэт. Наблюденная амплитуда составляет 0,75 от теоретической, а наблюдаемая фаза опережает теоретическую на $2^{\circ},5$. Фаза разностного вектора равна $172^{\circ},5$, а амплитуда 0,25.

Рис. 17. Приливная фазовая диаграмма. В Пинон-Флэт $\Theta = 2^{\circ},5$ и $\delta = 0,75$; следовательно $\Phi = 172^{\circ},5$ (чертеж выполнен в произвольном масштабе)



В соответствии с моделью приливов для открытого океана Манка и др. [53а], вычисленный фазовый угол возмущения, обусловленного массой океанов, равен 170° . Этот угол не зависит от используемой модели Земли. Предполагая на основании хорошего фазового согласования, что возмущающий вектор обусловлен только океанической нагрузкой, можно вычислить амплитуду по мощности океанического прилива, если известна структура Земли. Легко видеть, что измерения земных деформаций могут быть использованы для измерения «интегрального» океанического прилива [53].

Фарелл [52] рассчитал функции Грина для сферической радиально слоистой Земли, которые можно использовать для расчета перемещений от произвольных нагрузок. Он показал, что целесообразнее использовать наблюдения земных приливов для изучения океанических приливов и других нагрузочных явлений, полагая известной структуру Земли, чем, предполагая известными нагрузочные мощности, вычислять структуру Земли. Дело в том, что внутренняя структура Земли известна из независимых сейсмологических данных с точностью примерно 1%, в то время как приливы открытого океана и другие нагрузочные мощности едва ли известны с достаточной точностью.

5.3. Землетрясения

5.3.1. *Вертикальные движения Земли.* Непрерывные записи крупных телесейсмических явлений (крупных землетрясений) представляют значительный интерес, так как эти явления часто вызывают вертикальные движения поверхности Земли. С 1952 г., когда эти колебания впервые наблюдались во время землетрясения с силой 8,5 балла на Камчатке, при помощи гравиметров (вертикальных акселерометров) и тензометров с кварцевыми стержнями

ми были выполнены наблюдения за колебаниями поверхности при наиболее крупных землетрясениях. До 1968 г. только семь землетрясений имели магнитуду, достаточную для наблюдения возникающих колебаний земной поверхности. Однако с тех пор усовершенствования аппаратуры, в частности разработка гравиметра Блок—Мура с кварцевыми нитями и лазерного тензомера позволили наблюдать вертикальные колебания при хорошем отношении сигнала к шуму для землетрясений с магнитудой, меньшей чем 6,3 балла [45]. На рис. 18 показана запись, полученная на лазерном тензомере во время землетрясения с силой 7 баллов близ Вальпараисо (Чили) 9 июля 1971 г. Анализ Фурье этой записи свиде-

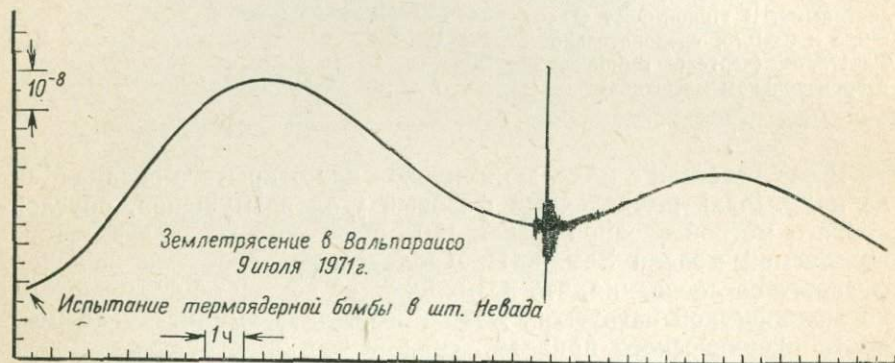


Рис. 18. Землетрясение в Вальпараисо, зарегистрированное в Ла-Холья. Это широкополосная запись при помощи лазерного тензомера в Камп-Эллиотт. НВД означает наименьшую величину деформации или изменение длины линии при смещении интерференционной картины на одну полосу (деформация $4 \cdot 10^{-10}$).

тельству о линейной структуре спектра деформации (рис. 19). Очень важно с целью опознавания колебаний и последующих исследований механизма землетрясения уметь отделить крутильные колебания (которые не регистрируются вертикальными инструментами) и сферидальные колебания. Следовательно, необходимо регистрировать как горизонтальные, так и вертикальные движения. В связи с этим можно отметить, что для исследования вертикальных движений двухкомпонентный лазерный тензомер Калифорнийского университета в Пинон-Флэт объединяется с лазерным тензомером в Камп-Эллиотт, удаленным на 80 км, чтобы образовать трехкомпонентную систему. Следовательно, имеется возможность точно определять тензор деформаций для движений, длина волн которых сравнима с 80 км.

5.3.2. Местные (локальные) землетрясения. Измерения явлений, связанных с близповерхностными землетрясениями, при помощи непрерывно регистрирующего лазерного тензомера дают различные сведения. Рис. 20 представляет запись землетрясения в Сан-Фернандо 9 февраля 1971 г. (магнитуда землетрясения 6,3 балла).

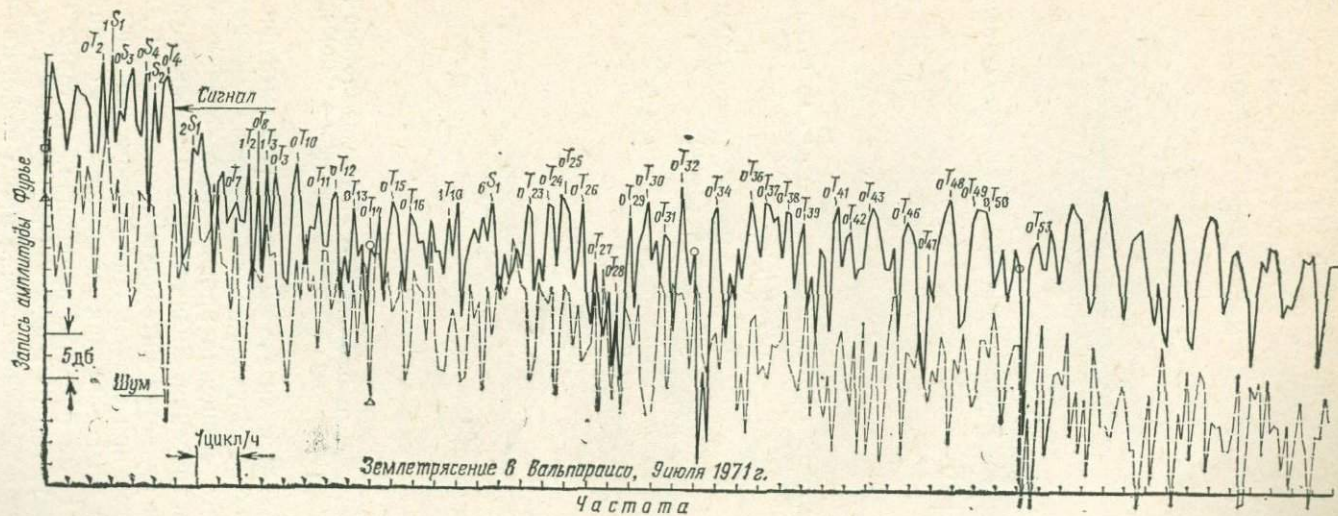


Рис. 19. Спектр Фурье землетрясения в Вальпараисо

полученную на лазерном тензомере в Ла-Холья, в 200 км от эпицентра. Если данные пропустить через низкочастотный фильтр, получится запись, показанная на рис. 21. Отчетливое смещение на $1,6 \cdot 10^{-9}$ произошло во время землетрясения. Заметим, что оно составляет только 0,0025 от максимального диапазона изменения



Рис. 20. Запись землетрясения в Сан-Фернандо

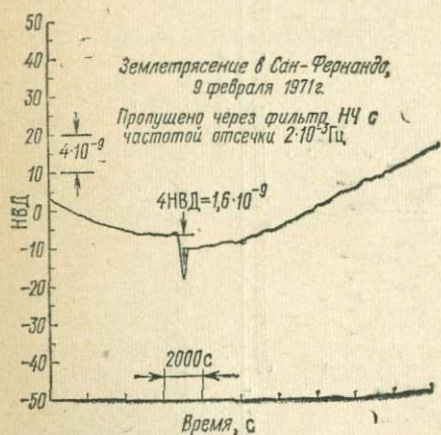


Рис. 21. Низкочастотный вариант записи землетрясения в Сан-Фернандо

деформации. Является ли это смещение «систематическим» («регрессивным») или нет, — установить не удалось, так как изменение скорости векового смещения произошло в течение восьми часов до и после землетрясения. Значительное изменение скорости вековой деформации является интересным, но трудным для интерпретации результатов при записи тензомером на расстоянии почти 200 км от места землетрясения и может быть случайным (встречаются другие, даже большие изменения, которые не связаны с землетрясениями). Тем не менее нет сомнения в том, что этот вид наблюдений даст в конечном случае много информации о тектонических процессах вообще и о землетрясениях в частности.

6. ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

6.1. Лазерный интерферометр для абсолютных измерений g

На основе использования лазерного интерферометра со свободно падающим отражателем [54] был разработан прибор, который измеряет абсолютное значение g — ускорения силы тяжести. Оп-

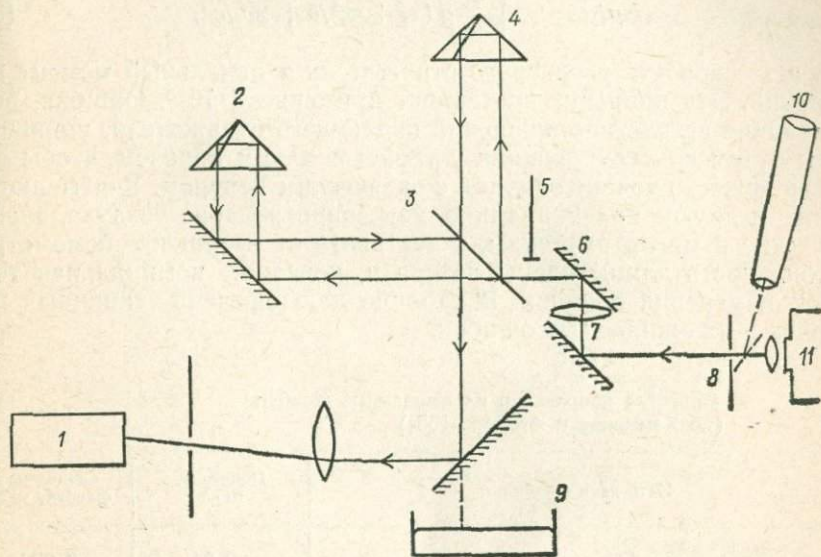


Рис. 22. Блок-схема интерферометра для определения абсолютного значения g (по Хаммонду и Фаллеру [54]).

1 — фотоумножитель; 2 — опорный уголкового кубический отражатель; 3 — главное светоделительное устройство; 4 — свободно падающий кубический отражатель; 5 — половинная диафрагма; 6 — регулируемое зеркало; 7 — коллиматор; 8 — точечное отверстие; 9 — ртутный горизонт; 10 — микроскоп; 11 — лазер

тическая схема прибора приведена на рис. 22. Расстояние, проходимое свободно падающим уголкового отражателем в течение точно измеренного временного интервала, определяется в числах полос, проходящих мимо фотоумножителя. Если первоначальная скорость уголкового отражателя неизвестна, измерения выполняются в течение двух временных интервалов τ_1 и τ_2 , и величина g определяется из выражения

$$g = \frac{\lambda (N_2 - N_1 \tau_1 / \tau_2)}{\tau_2^2 - \tau_1 \tau_2}, \quad (52)$$

где λ — длина волны света; N_1 и N_2 — количества полос, сосчитанные за два временных интервала. Временные интервалы имеют одно и то же начало отсчета, причем τ_2 обычно вдвое больше, чем τ_1 . Чтобы учесть влияние движения земной коры, опорный уголкового отражатель монтируют на сейсмомере.

Вследствие наличия градиента гравитационного поля Земли должна определяться поправка за высоту, на которой происходят измерения. Измеренная величина, полученная из уравнения, приведенного выше, используется для вычисления g на уровне пола помещения, в котором расположена аппаратура, с учетом градиента $\gamma = dg/dz$.

Должна быть учтена также поправка, обусловленная доплеровским сдвигом лазерного излучения,

$$\Delta g/g = - \left[\frac{4}{3} g (\tau_1 + \tau_2)/c + 2v_0/c \right], \quad (53)$$

где v_0 — скорость уголкового отражателя в начальный момент измерений. Эта поправка составляет примерно $3 \cdot 10^{-8}$. Ошибки, возникающие вследствие вращения падающего отражателя, уменьшаются путем конструирования устройства таким образом, чтобы его центр тяжести точно совпадал с оптическим центром. Учитываются также и другие явления, такие, как сопротивление воздуха, электрические и магнитные силы, в частности от катушек сейсмометра, стабильность длины волны лазера и, конечно, номинальная точность измерения времени. В таблице дан перечень типичных поправок и их ожидаемых ошибок.

Типичные поправки и их ожидаемые ошибки
(по Хаммонду и Фаллеру [55])

Источники ошибок	Поправка, мГал	Ожидаемая ошибка, мГал
Длина волны лазера	-0,94	0,020
Направление и коллимация	-0,005	0,005
Временные интервалы	0,00	0,10
Градиент силы тяжести	+0,432	0,010
Скорость света	-0,028	0,001
Сопротивление воздуха	+0,010	0,005
Электростатические и магнитные силы	0,00	0,010
Магнитное поле сейсмометра	0,00	0,030
Общая поправка	+0,315	0,041

Прибор портативен. Результаты нескольких измерений, выполненных в различных местах, приведены в работе [55].

6.2. Лазерный Гетеродинный интерферометр

Последнее из описываемых устройств — лазерный гетеродинный интерферометр [56], который может быть использован для измерения скоростей вращения посредством наблюдения прохождения «стационарных» звезд по небесному своду. Первоначально инструмент был разработан для измерения диаметров звезд методом, аналогичным применяемому в звездном интерферометре Майкельсона [57]. Основная идея, заложенная в его инструмент, была

следующей. Если наблюдают свет от удаленного источника, такого, как звезда, при помощи двух малых апертур и заставляют эти лучи интерферировать, то минимум яркости картины будет иметь место в случаях, когда расстояние d между апертурами удовлетворяет условию

$$d = A\lambda_0/\theta, \quad (54)$$

где θ — угловой диаметр источника; λ_0 — средняя длина волны; A — постоянная, зависящая от распределения интенсивности источника [7, стр. 274]. Например, $A=0,5$ для точечного источника и

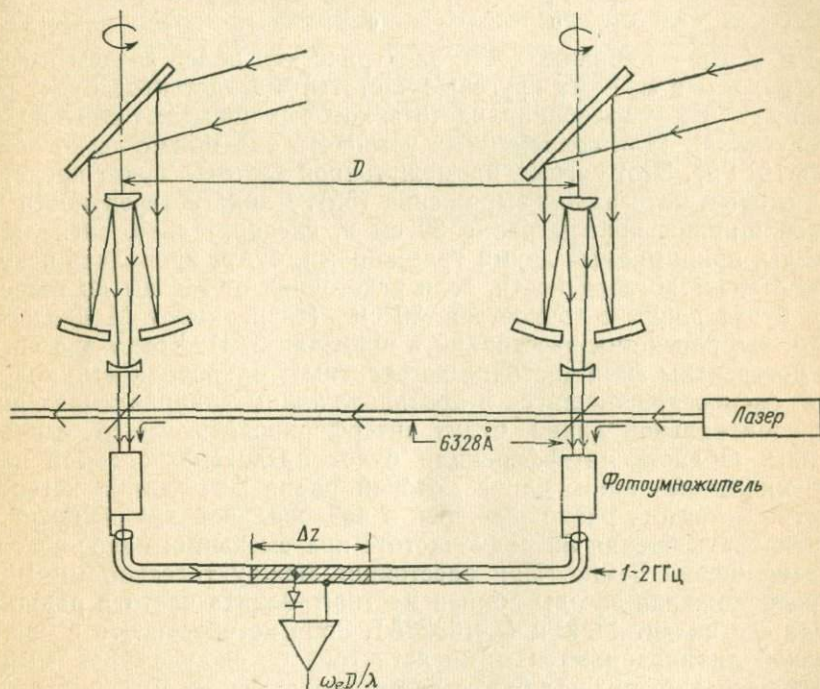


Рис. 23. Гетеродинный интерферометр (по Лавбергу [56])

1,22 для однородного светящего круглого диска. В эксперименте Майкельсона 100-дюймовый телескоп обсерватории Маунт — Вилсон был заднафрагмирован так, чтобы образовать 2 апертуры. Для направления света к наблюдателю было использовано симметричное зеркальное устройство. Проблемы, связанные с механической стабильностью, ограничили расстояние между внешними зеркалами 6,1 м, так что наименьший наблюдаемый диаметр составлял около 0,02".

Лазерный гетеродинный интерферометр превосходит этот предел разрешения способом, аналогичным применяемому в радиоин-

терферометрах со сверхдлинными базами. Как следует из рис. 23, в инструменте Лавберга использованы два небольших разнесенных телескопа и связанный с ними одночастотный лазер. Устройство работает во многом подобно гетеродинному радиоприемнику. Несущими колебаниями служит свет звезды, проходящий через узкополосный оптический фильтр, настроенный на частоту лазера. Этот свет интерферирует со светом лазера, образуя микроволновые биения. Интенсивность сигнала фотодетектора определяется выражением

$$I = E_L E_L^* + \left| \int_0^{\infty} e^{i\omega t} d\omega \right|^2 + 2 \int_0^{\infty} E_L E_s \cos(\omega_0 - \omega) t \cdot d\omega, \quad (55)$$

где E_s и E_L — напряженности электрических полей звезды и света лазера; а ω и ω_0 — их круговые частоты. Фотодетектор будет реагировать на все колебания, частоты которых попадают в его полосу пропускания (для современных устройств она может легко достигать 10^9 Гц). Этот сигнал, промежуточной частоты, будет представлен вторым интегралом выражения (55). Длина когерентности для такой ширины полосы равна 30 см и, следовательно, сигналы от звезды, принимаемые двумя телескопами, будут проявлять некоторую степень когерентности, если расстояния от звезды до телескопов будут равны с точностью 30 см (эксперимент Майкельсона требовал равенства расстояний в пределах $5 \lambda!$). Когда два сигнала когерентны (или частично когерентны), микроволновые колебания, распространяющиеся в противоположных направлениях внутри коаксиальной линии, будут интерферировать где-то вдоль ее длины. Область интерференции будет представлять собой часть коаксиальной линии, длина которой равна Δz — длине когерентности. Детектор, расположенный в коаксиальной линии, будет детектировать биения на радиочастоте при смещении полос вследствие вращения Земли. При расстоянии между телескопами 100 м и расположении звезды вблизи местного зенита частота радиосигнала составляет 11 кГц ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$). Зона когерентности в коаксиальной линии движется мимо детектора со скоростью 7 мм/с и, следовательно, полосы будут детектироваться за 40 с при любом положении детектора. Долговременные наблюдения могут быть выполнены посредством перемещения детектора вдоль линии, т. е. посредством слежения за движением звезды на небесном своде.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приложения лазерной техники к геофизической аппаратуре за последние 10 лет выразились в существенном улучшении инструментальных возможностей. Данные, полученные на основе геодезических работ, выполненных с лазерными дальномерными устрой-

ствами, внесли значительный вклад в понимание жизни разлома Сан-Андреас в частности и в понимание тектонических процессов вообще. Эти данные, объединенные с измерениями, выполняемыми при помощи лазерных тензометров, будут иметь большое значение для проблемы предсказания землетрясений, — вероятно, важнейшей проблемы, стоящей перед геофизиками в настоящее время. Пионерская работа по лазерным измерениям расстояния до Луны открывает новые возможности в области геодезических работ на очень больших площадях выполняемых, в частности, с целью исследования континентального дрейфа и тектоники плит. В самом деле, разнообразие геофизических и геодезических инструментов, существующих в настоящее время, от сверхчувствительных и высокостабильных лазерных тензометров до аппаратуры для межконтинентальных экспериментов по лазерным измерениям расстояния до Луны позволяет впервые предпринять действительно объединенные попытки для разгадки сложной структуры движений Земли. Предложенные устройства, чувствительные к вращениям, открывают возможность расширения наших знаний о таких разнообразных явлениях, как приливное трение и возбуждение землетрясений. Можно надеяться, что эти идеи принесут плоды в ближайшем будущем.

- A — эффективная поверхность системы отражателей; отношение преломлений
 A_1, A_2 — амплитуда электрического поля в направлении X_1, X_2
 D_R — диаметр приемного телескопа
 D_T — диаметр передающего телескопа
 D_L — диаметр лазерного луча
 E_1, E_2 — электрическое поле в направлении X_1, X_2
 E_L, E_S — напряженность электрического поля в свете лазера и звезды
 e — влажность воздуха
 f_T — частота излучения (микроволновая)
 f_R — опорная частота (микроволновая)
 F — отражающая функция зеркала
 g — ускорение силы тяжести
 H — естественная двойная ширина линии
 h — местный часовой угол
 I — плотность света
 K_R, K_B — поправки за оптические компоненты в пути красного и синего света
 P — атмосферное давление в миллибарах
 P_0 — стандартное давление (1013 мбар)
 Q — добротность резонатора
 R — относительная влажность в %
 r — расстояние между центрами Земли и Луны
 T — функция передачи; температура в К
 T_0 — стандартная температура (298К)
 T_a — пропускание атмосферы
 t_m — время прохождения меридиана
 t_1, t_2 — моменты измерения расстояний
 I — групповая скорость света
 V_x, V_y — напряжения на фотомножителе
 v_x — скорость в направлении x
 X_E, X_M — проекции линий наземная обсерватория — центр Земли и лунный отражатель — центр Луны на направление линии центр Земли — центр Луны
 γ — вероятность перехода
 ϵ — деформация
 ϵ_1, ϵ_2 — индексы модуляции

η — показатель преломления
 k — постоянная Больцмана
 λ — длина волны света и
длина волны модуляции
 $\mu - \eta - 1$
 ν — частота световых колебаний
 ν_A — частота центра атом-

ной линии
 ρ — плотность атмосферы
и расстояние от Земли
до Луны
 ω — круговая частота
 Ω — скорость вращения
Земли
 Ω_{ij} — линейные электрооптические коэффициенты

1. Emmett J. L. Frontiers of laser development. *Phys. Today*, 1971, 24, 24—34.
2. Baird K. M. Length standards. *Nat. Bur. Stand. (U. S.), Spec. Publ.*, 1971, 343, 39—48.
3. Evenson K. M., Wells J. S. and Matarrese L. M. Defining the speed of light: A combination time, frequency, and length standard: Recent progress toward measuring the frequency of visible light. *Nat. Bur. Stand. (U. S.), Spec. Publ.*, 1971, 343, 67—71.
4. Evenson K. M., Day G. W., Wells J. S. and Mullen L. O. Extension of absolute frequency measurements to the cw He—Ne laser at 88 THz (3.39 μ). *Appl. Phys. Lett.*, 1972, 20, 133—137.
5. Collis, R. T. H. Lidar. *Advan. Geophys.*, 1969, 13, 113—141.
6. Cooney J. Laser Raman probing of the atmosphere. In "Laser Applications in the Geosciences" (J. Gauger and F. F. Hall, eds.), pp. 51—69. Western Periodicals Co., North Hollywood, California, 1970.
7. Born M. and Wolf E. "Principles of Optics", 1970, p. 327. Pergamon, Oxford.
8. Froome K. D. and Bradsell R. H. A new method for the measurement of distances up to 5000 ft by means of a modulated light beam. *J. Sci. Instrum.*, 1966, 43, 129—133.
9. Kaminow J. P. and Turner E. H. Electro-optic light modulators. *Proc. IEEE*, 1966, 54, 1374—1390.
10. Owens J. C. Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition. *Appl. Opt.*, 1967, 6, 51—59.
11. Kerr D. E. "Propagation of Short—Radio Waves", MIT Radiat. Lab. Ser. N 13. Dover, New York, 1965.
12. Bender P. L. and Owens J. C. Correction of optical distance measurements for the fluctuating atmospheric index of refraction. *J. Geophys. Res.*, 1965, 70, 2461—2462.
13. Erickson K. E. Investigation of the invariance of atmospheric dispersion with a long-path refractometer. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1962, 52, 777—787.
14. Earnshaw K. B. and Owens J. C. A dual wavelength optical distance measuring instrument which corrects for the air density. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1967, 3, 544—550.
15. Earnshaw K. B. and Hernandez E. N. A two—laser optical distance measuring instrument that corrects for atmospheric index of refraction. *Appl. Opt.*, 1972, 11, 749—754.
16. Fowler R. A. Earthquake prediction from laser surveying. *NASA Spec. Publ. NASA SP-5042*, 1968.

17. *Alley C. O., Chang R. F., Currie D. G., Poultney S. K., Bender P. L., Dicke R. H., Wilkinson D. T., Faller J. E., Kaula W. M., MacDonald G. J. F., Mulholland J. D., Plotkin H. H., Carrion W. and Wampler E. J.* Laser ranging retroreflector: Continuing measurements and expected results. *Science*, 1970, 167, 458—460.

18. *Faller J. E., Bender P. L., Alley C. O., Currie D. G., Dicke R. H., Kaula W. M., MacDonald G. J. F., Mulholland J. D., Plotkin H. N., Silverberg E. C. and Wilkinson D. T.* Geodesy results obtainable using lunar retroreflectors. *Proc. Symp. Uses Artif. Satellites Geodesy*, 1971.

19. *Alley C. O., Bender P. L., Dicke R. H., Faller J. E., Franken P. A., Plotkin H. H. and Wilkinson D. T.* Optical radar using a corner reflector on the moon. *J. Geophys. Res.*, 1965, 70, 2267—2269.

20. *Silverberg E. C. and Currie D. G.* A description of the lunar ranging station at McDonald Observatory. *Pap.*, 1972, 14th Meet. COSPAR, 1971.

21. *Alley C. O. and Bender P. L.* Information obtainable from laser range measurements to a lunar corner reflector. In "Continental Drift, Secular Motion of the Pole-Rotation of the Earth" (W. Markowitz and B. Guinot, eds), 1968, pp. 86—90. Springer—Verlag, New York.

22. *Hopfield H. S.* Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1970, 51, 265 (abstr.).

23. *Saastamoinen J.* The atmospheric correction for laser ranging of satellites. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1970, 51, 266 (abstr.).

24. *Bender P. L., Dicke R. H., Wilkinson D. T., Alley C. O., Currie D. G., Faller J. E., Mulholland J. D., Silverberg E. C., Plotkin H. H., Kaula W. M. and MacDonald G. J. F.* The lunar laser ranging experiment. *Proc. Conf. Exp Tests-gravitation Theories*, JPL Tech. Mem., 1971, 33—499, pp. 178—181.

25. *Bender P. L.* Private communication. 1972.

26. *Smith D. E., Kolenkiewicz R. and Dunn P. J.* "Geodetic Studies by Laser Ranging to Satellites", Preprint x—553—71—361. Goddard Space Flight Center. Greenbelt. Maryland, 1971.

27. *Smith D. E.* Private communication, 1972.

28. *Johnson T. S., Plotkin H. H. and Spadin P. L.* A laser satellite ranging system. Part 1. Equipment design. *IEEE J. Quantum Electron*, 1967, 3, 435—439.

28a. *Smith D. E.* Polar motion from laser tracking of artificial satellites. *Pap. 2nd Astrodyn. Geodyn. Meet.*, 1972.

29. *Benioff H.* A linear strain seismograph. *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 1935, 25, 238—309.

30. *Vali V. and Bostrom R. C.* One thousand meter laser interferometer. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, 39, 1304—1306.

31. *Shalow A. L. and Townes C. H.* Infrared and optical masers. *Phys. Rev.*, 1958, 112, 1940.

32. *Jaseja T. S., Javan A. and Townes C. H.* Frequency stability of He-Ne masers and measurements of length. *Phys. Rev. Lett*, 1963, 10, 165.

32a. *Shimoda K. and Javan A.* Stabilization of the He-Ne maser on the atomic line center. *J. Appl. Phys.*, 1965, 36, 718—726.

33. *Englehard E.* Wellenlängenstabilität eines Neon-Helium lasers. *Z. Angew. Phys.*, 1966, 20, 404—407.

34. *Baird K. M. and Smith D. S.* Primary standard of length. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1962, 52, 507—514.

35. *Mielenz K. R., Nefflen K. F., Rowley W. R. C., Wilson D. C. and Englehard E.* Reproducibility of Helium-Neon laser wavelength at 633 nm. *J. Appl. Opt.*, 1968, 7, 289—293.

36. *Hellwig H. and Halford D.* Accurate frequency measurements: Survey, significance, and forecast. *Nat. Bur. Stand. (U. S.), Spec. Publ.*, 1971, 343, 17—27.

37. *Hall J. L.* The laser absolute wavelength problem. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1968, 638—641.

38. *Bennet W. R., Jacobs S. F., Latourette J. T. and Rabinowitz P.* Dispersion characteristics and frequency stabilization of a gas laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, 5, 66.

39. *White A. D., Gordon E. I. and Labuda E. F.* Frequency stabilization of single mode gas lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, 5, 97.

40. *Tobias I., Skolnick M., Wallace R. A. and Polanyi T.* Derivation of a frequency-sensitive signal from a gas laser in an axial magnetic field. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, 6, 198.

41. *Hall J. L. and Barger R. L.* The implication of saturated molecular absorption for the laser wavelength standard problem. *Nat. Bur. Stand. (U. S.), Spec. Publ.*, 1971, 343, 49—50.

42. *Levine J. and Hall J. L.* Design and operation of a methane absorption stabilization laser strainmeter. *J. Geophys. Res.*, 1972, 14, 2595—2609.

43. *Hanes G. R. and Baird K. M.* I₂ controlled He—Ne laser at 633 nm preliminary wavelength. *Metrologia*, 1969, 5, 32—33.

44. *Baird K. M.* Personal communication, 1969.

45. *Block B. and Dratler J. Jr.* Improvements in the wide band quartz torsion accelerometer. *J. Geophys. Res.*, 1972, 77, 3678—3689.

46. *Berger J. and Lovberg R. H.* A laser earth strain meter. *Rev. Sci. Instrum.*, 1970, 40, 1569—1575.

47. *Berger J. and Lovberg R. H.* Earth strain measurements with a laser interferometer. *Science*, 1971, 170, 296—303.

48. *Berger J.* A laser earth strain meter. Ph. D. Dissertation, University of California. San Diego, 1970.

49. *Berger J., Wyatt F. K. and Lovberg R. H.* A year of strain measurements in Southern California. *Nature (London)*, 1972, 238, 93.

50. *King G. C. P., Bilham R. G., Gerard J. B., Davies D. and Sydenham P. H.* New strain meters for geophysics. *Nature (London)*, 1969, 233, 818—819.

51. *Brune J.* Private communication, 1971.

52. *Farrell W. E.* Deformation of the earth by surface loads. *Rev. Geophys.*, 1972, 10, 761—797.

53. *Farrell W. E.* Gravity tides. Ph. D. Dissertation. University of California, San-Diego, 1970.

53a. *Munk W. H., Snodgrass F. E. and Wimbush M.* Tides offshore: Transition from California coastal to deep-sea waters. *Geophys. Fluid Dyn.*, 1970, 1, 161—235.

54. *Hammond J. A. and Faller J. E.* Laser—interferometer system for the determination of the acceleration of gravity. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1967, 3, 597—602.

55. *Hammond J. A. and Faller J. E.* Results of absolute gravity determinations at a number of different sites. *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, 7850—7854.

56. *Lovberg R. H.* The optical heterodyne interferometer: A proposal for stellar diameter measurements. In "Laser Applications in the Geosciences" (J. Gauger and F. F. Hall, eds), 1970, pp. 249—267. Western Periodicals Co., North Hollywood, California.

57. *Michelson A. A.* On the application of interference methods to astronomical measurements *Astrophys. J.*, 1920, 51, 257—262.

	Стр.
1. Введение	5
1.1. Лазерные тензометры и лазерные дальномерные устройства	6
1.2. Лазеры	7
2. Наземные лазерные дальномерные устройства	10
2.1. Основные соображения	10
2.2. Электрооптические модуляторы света	10
2.3. Инструментальное описание лазерных дальномерных устройств	11
2.4. Точность лазерных дальномерных устройств	13
2.5. Двухволновые способы	13
2.6. Инструментальное описание двухволновых лазерных дальномерных устройств	15
3. Лазерные дальномерные устройства для измерения расстояний до внеземных объектов	18
3.1. Эксперимент по лазерному измерению расстояния до Луны	18
3.2. Измерения расстояний до искусственных спутников Земли	23
4. Лазерные тензометры	25
4.1. Линейные экстензометры	25
4.2. Применение лазеров в линейных экстензометрах	26
4.3. Длина волны лазера	27
4.4. Методы стабилизации частоты излучения лазеров	29
4.5. Интерферометр Майкельсона	34
4.6. Интерферометр Фабри — Перо	39
5. Результаты измерений деформаций и расстояний	41
5.1. Скорости вековых деформаций	41
5.2. Земные приливы	44
5.3. Землетрясения	45
6. Другие применения лазеров	49
6.1. Лазерный интерферометр для абсолютных измерений g	49
6.2. Лазерный гетеродинный интерферометр	50
7. Заключение	52
Список обозначений	54
Список литературы	56

ИБ № 828

Джон Бергер

**Применение лазерной техники
в геодезии и геофизике**

Перевод с английского
Алексея Васильевича Кондрашкова и Дмитрия
Дмитриевича Дзямана

Редактор *П. П. Медведев*
Редактор издательства *Н. Т. Куприна*
Обложка художника *А. А. Зубченко*
Художественный редактор *В. В. Евдокимов*
Технические редакторы *О. Н. Ласточкина,*
Л. Я. Голова
Корректор *Е. Г. Черняк*

Сдано в набор 12/V 1977 г.
Подписано в печать 12/VII 1977 г.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага № 2 Печ. л. 4,0.
Уч.-изд. л. 3,78. Тираж 4500 экз.
Заказ № 813/6920—15 Цена 40 коп.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19
Московская типография № 32 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров
СССР по делам издательств, полиграфии и
книжной торговли. Москва, К-51, Цветной б., 26.

УВАЖАЕМЫЙ ТОВАРИЩ!
В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НЕДРА»
ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ НОВЫЕ КНИГИ

АНИКСТ Д. А. Высокоточные теодолиты Т1 и Т05. 10 л. 55 к.

Книга содержит описание конструкции высокоточных теодолитов Т1 и Т05 с чертежами и оптическими схемами. Приведены соображения, по которым выбраны примененные в них устройства; особое внимание уделено новым и малоизвестным элементам. Даны методы расчета некоторых элементов отсчетных систем, недостаточно освещенные в имеющейся литературе. Показан точностной расчет высокоточного теодолита в сопоставлении с фактическими результатами испытаний. Даны подробные указания по эксплуатации и техническому обслуживанию приборов, их разработке, сборке и юстировке. Изложена методика исследований и проверок, сопровождаемая необходимыми примерами.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, использующих теодолиты Т1 и Т05 и выполняющих их обслуживание и ремонт; будет полезна для студентов и аспирантов приборостроительных специальностей, а также для специалистов оптико-механической промышленности, проектирующих подобные приборы и устройства.

ГАУФ М. Электронные теодолиты и тахеометры. Чехословакия. 1975. Пер. с чешск. 10 л. 74 к.

В книге изложены теоретические основы и описаны конструкции электронных теодолитов и тахеометров. На основе положений теории информации и кибернетики рассмотрен процесс съемки этими приборами.

Приведены сведения о кодах, логических цепях, преобразователях информации, индикаторах и других блоках, используемых в современных электронных геодезических приборах. Описаны комбинированные тахеометры.

Книга предназначена для широкого круга инженеров-геодезистов и лиц, занимающихся разработкой геодезической техники, а также может быть рекомендована для студентов геодезических вузов.

ЗАХАРОВ А. И. Новые теодолиты и оптические дальномеры.
Изд. 2, перераб. и доп. 18 л. 1 р. 05 к.

В книге даны конструкции отечественных геодезических приборов и их отдельных узлов, помещены чертежи, детально поясняющие их устройство. Приведены рекомендации по проверке, юстировке и ремонту всех описываемых приборов, перечень возможных неисправностей и способы их устранения. Описан принцип действия, разобраны основные источники погрешностей и даны рекомендации по их устранению или снижению.

Предназначена для геодезистов, работающих с инструментами, и на механиков ремонтных мастерских.

ЛЫСОВ Г. Ф. Поверки и исследования теодолитов и нивелиров в полевых условиях. 5 л. 30 к.

В книге рассмотрены различные способы и приемы производства полевых поверок и исследований современных теодолитов и нивелиров. Приведены примеры вычислений ожидаемых ошибок юстировки и оформления записей результатов наблюдений при исследованиях теодолитов и нивелиров.

Книга предназначена для геодезистов, маркшейдеров, землеустроителей и других специалистов, работающих с геодезическими приборами, а также может быть использована студентами вузов.

ЧЕРЕМИСИН М. С., АРДАСЕНОВ В. Д., КОЛЬЦОВ В. П.
Нивелиры с компенсаторами. 10 л. 55 к.

В книге изложены вопросы, связанные с устройством, исследованиями и применением в СССР технических, точных и высокоточных нивелиров с компенсаторами. Рассмотрены теоретические вопросы действия компенсаторов, ошибки возникающие при работе нивелиров с компенсаторами, и способы их ослабления или полного исключения.

Описана методика лабораторного и полевого комплексов исследования, с помощью которых выявляется технико-эксплуатационная характеристика и область применения того или иного типа нивелира с компенсатором. Приведены основные технические характеристики нивелиров, полученные в результате испытаний и сравнения их с аналогичными показателями уровенных нивелиров. Даны конкретные рекомендации по применению нивелиров с компенсаторами.

Рассчитана на широкий круг работников топографо-геодезического производства, а также на студентов геодезических вузов.

ЯМБАЕВ Х. К. Высокоточные створные измерения. 12 л. 69 к.

В книге обобщен отечественный и зарубежный опыт в области теории и практики высокоточных створных измерений, а также в вопросах разработки и применения высокоточных створных измерений при строительстве крупных сооружений. Рассмотрены все основные методы и средства створных измерений, включая лазерные приборы для контроля прямолинейности.

Предназначена для широкого круга специалистов, работающих в области геодезического обеспечения строительства и эксплуатации крупных промышленных и научных комплексов.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «Книга — почтой» магазинов:

№ 17 — 199178. Ленинград, В. О., Средний проспект, 61;
№ 59 — 127412. Москва. Коровинское шоссе, 20.

Издательство «Недра»

40 коп.

2311

НЕДРА