

А.А.ГЕНИКЕ А.М.АФАНАСЬЕВ

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СВЕТО- И РАДИО- ДАЛЬНОМЕРЫ

СРЕДНЕТЕХНИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ



А.А.ГЕНИКЕ А.М.АФАНАСЬЕВ

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СВЕТО- И РАДИО- ДАЛЬНОМЕРЫ

*Допущено
Главным управлением геодезии и картографии
при Совете Министров СССР
в качестве учебника
для учащихся топографических техникумов*



МОСКВА "НЕДРА" 1988

ББК 26

Г 34

УДК 528.517+528.516(075)

Рецензенты: *М. Ф. Қазаринов, Ю. Е. Смирнов.*

Г 1902020000—169
043(01)—88 — 6—88 — св. план для сред. спец. уч. завед.

ISBN 5—247—00267—9

© Издательство «Недра», 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

В современном топографо-геодезическом производстве особая роль отводится созданию высокоавтоматизированных технических средств, позволяющих в полевых условиях выполнять геодезические измерения быстро, надежно и с малыми затратами сил и средств. Примером может служить дальномерная техника, которая за последние 10—15 лет совершенствовалась быстрыми темпами. Внедрение современной полупроводниковой элементной базы, а также целого ряда новых технических решений позволили существенно повысить дальность действия, точность измерений, уровень автоматизации процесса измерений при одновременном улучшении таких показателей, как весовые, габаритные и энергетические характеристики дальномеров. Существенно расширилась при этом и область применения современной дальномерной техники. Значительно возрос удельный вес линейных измерений, выполняемых с движущихся объектов. С каждым годом дальномеры все шире используются для решения разнообразных задач прикладной геодезии.

Перечисленные выше факты нашли свое отражение при написании настоящего учебника.

При рассмотрении теоретических основ геодезических световых и радиодальномеров наряду с фазовыми методами уделено внимание развивающемуся импульсно-фазовому методу, принципам автоматизации процесса разрешения неоднозначности, а также другим современным проблемам, оказавшим заметное влияние на формирование общих теоретических основ геодезической дальномерной техники.

Рассматривая современные принципы построения обобщенных функциональных схем дальномеров и их основных компонент, авторы отказались от описания принципов действия таких широко распространенных узлов электронных схем, как генераторы, усилители, преобразователи электрических сигналов и др., с которыми учащиеся знакомы из других курсов. Основное внимание уделено описанию современных составных узлов, специфичных для дальномерной техники (излучатели, приемники, канализирующие системы, фазоизмерительные устройства и др.).

При изложении основополагающих принципов классификации дальномерной техники проанализировано построение функциональных схем дальномеров различных классификационных групп и описаны особенности работы тех дальномеров, которые получили наибольшее распространение в отечественном топографо-геодезическом производстве.

В процессе изучения основных источников ошибок дальномерных измерений рассмотрены способы уменьшения влияния возникающих ошибок измерений, особенности работы с дальномерами в полевых условиях, а также основные методы обработки результатов дальномерных измерений.

В заключение изложены основные направления и перспективы дальнейшего развития дальномерной техники.

Все главы настоящего учебника написаны А. А. Генике, а вопросы и упражнения составлены А. М. Афанасьевым.

Дальномерная техника, базирующаяся на определении времени распространения электромагнитных волн, начала интенсивно развиваться и широко внедряться в топографо-геодезическое производство около тридцати лет тому назад. Однако основополагающие теоретические и экспериментальные предпосылки разрабатывались в течение длительного времени. Так, величина скорости распространения электромагнитных волн, необходимая при определении расстояний дальномерами рассматриваемого типа, определялась и уточнялась различными физическими методами на протяжении нескольких столетий. К тридцатым годам нашего столетия появилась возможность измерять эту скорость сравнительно несложными техническими приемами с погрешностью около $1 \cdot 10^{-4}$, что предопределило начало развития свето- и радиодальномеров.

Ведущая роль в создании первых в мире свето- и радиодальномеров принадлежит советским ученым. В 1936 г. в Государственном оптическом институте под руководством акад. А. А. Лебедева был разработан и изготовлен первый в мире действующий светодальномер, которым можно было измерять линии длиной до 3,5 км с погрешностью 2—3 м. В 30-х годах в Советском Союзе под руководством академиков Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси был проведен комплекс исследовательских работ, завершившийся созданием радиодальномерной системы, позволявшей измерять расстояния до 100 км с погрешностью 5—10 м.

Великая Отечественная война затормозила развитие дальномерной техники. В этот период в различных странах мира стали уделять повышенное внимание разработке радиодальномерных систем, используемых в военных целях. Было создано несколько радиодальномерных систем, позволяющих с достаточно высокой степенью точности определять местоположение судов в открытом море и самолетов в воздушном пространстве.

Пятидесятые годы явились началом развития свето- и радиодальномеров повышенной точности, что существенно расширило область их применения в топографо-геодезическом производстве. Проведенные к этому периоду исследовательские работы по определению скорости распространения электромагнитных волн открыли возможность измерения расстояний с относительной погрешностью $(1—5) \cdot 10^{-6}$. Созданные в 50-х годах в Советском Союзе и за рубежом свето- и радиодальномеры позволили измерять расстояния в несколько десятков километров с погрешностью 5—10 см.

В 60-е годы основные усилия создателей дальномерной техники были направлены на совершенствование дальномеров. Появившиеся к тому времени лазерные источники позволили проводить измерения как в ночных, так и в дневных условиях, а портативные полупроводниковые излучатели в сочетании с транзистированием электронных схем позволили существенно уменьшить габариты и массу создаваемых приборов. В области геодезической радиодальномерной техники разработаны приборы с выносными приемопередатчиками, приспособленными для установки на раздвижные переносные мачты, что позволило проводить линейные измерения без постройки геодезических наружных знаков. На основе наземных радиодальномеров, предназначенных для измерения линий фиксированной длины, создаются ультракоротковолновые радиодальномерные системы, используемые для определения плановых координат движущихся объектов. Их отличительная особенность — портативность и повышенная точность измерений.

Характерная особенность периода 70-х годов состояла в решении проблемы автоматизации всего процесса измерений и последующих вычислений. Широко внедряются электронные цифровые фазометры в сочетании с отдельными составными узлами вычислительной техники, что позволило не только снимать с табло окончательное значение измеренной длины линии, но и автоматически регистрировать значение получаемой погрешности измерений.

Достигнутые в области дальномерной техники успехи по автоматизации измерений стимулировали создание автоматизированных угломерных устройств и появление электронных тахеометров, позволяющих в автоматическом режиме выполнять как линейные, так и угловые измерения. Использование встроенных портативных запоминающих устройств позволило во многих случаях отказаться от ведения полевого журнала.

В 80-х годах процесс совершенствования дальномерной техники продолжается. При этом значительное внимание уделяется вопросам повышения точности дальномерных измерений, улучшению эксплуатационных характеристик приборов, разработке автоматизированных дальномерных систем, позволяющих измерять длины линий в динамике. Параллельное развитие дальномеров, работающих в различных участках шкалы электромагнитных волн, вполне оправдано, так как в зависимости от решения конкретных производственных топографо-геодезических задач каждая группа приборов открывает дополнительные возможности.

§ 1. ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В повседневной практической деятельности человек очень часто сталкивается с различного рода измерениями. При этом простейшим видом измерений являются прямые методы, при реализации которых результат получается непосредственно из сопоставления однородных физических величин, причем числовое значение одной из них известно, а другое требуется определить.

На практике использовать прямые методы не всегда представляется возможным, а иногда и экономически нецелесообразно. Поэтому зачастую прибегают к косвенным методам, характерная особенность которых состоит в том, что искомую величину находят путем измерения другой физической величины, однозначно связанной с первой известным математическим соотношением.

Принципы действия современных геодезических свето- и радиодальномеров базируются на использовании косвенных методов. В связи с этим рассмотрим следующий простой пример, поясняющий сущность косвенных методов измерений.

Пусть нам необходимо измерить расстояние между двумя отметками на рельсах прямолинейного участка железнодорожной линии. Поместим около данных отметок наблюдателей с точными синхронно идущими часами. При движении по отмеченному участку поезда наблюдатели последовательно фиксируют моменты соприкосновения переднего колеса поезда с указанными отметками. Если скорость поезда v на данном участке была постоянна и известна, то по разности зафиксированных наблюдателями отсчетов времени Δt нетрудно вычислить интересующее нас расстояние D между отметками:

$$D = v\Delta t. \quad (1)$$

В приведенном примере обращает на себя внимание тот факт, что искомой величиной было расстояние, а фактически измерялось время, т. е. рассмотренный метод измерения расстояний является косвенным.

Принцип действия современных свето- и радиодальномеров также основан на аналогичной зависимости. Длины линий на местности определяются такими приборами путем измерения времени прохождения тем или иным носителем информации

искового расстояния. В связи с вышеизложенным проанализируем особенности данного метода измерения расстояний более детально.

§ 2. ВЫБОР НОСИТЕЛЯ ИНФОРМАЦИИ

Носителем информации об измеряемой длине линии в рассмотренном выше примере был движущийся материальный объект (в частности, поезд). При этом для выполнения точных измерений длин линий на местности к данному объекту предъявляются следующие основные требования:

движение объекта должно осуществляться по известной траектории, соединяющей конечные точки измеряемой линии и по возможности не связанной с формой рельефа местности между этими точками;

скорость движения объекта должна быть постоянна и известна с относительной погрешностью не ниже погрешности выполняемых линейных измерений.

При характерной для геодезии высокой точности измерений носители информации в виде тех или иных движущихся объектов, как правило, не удовлетворяют перечисленным выше требованиям (за исключением искусственных спутников Земли).

Значительно целесообразнее для решения рассматриваемых задач использовать свободно распространяющиеся в окружающем нас пространстве волны. При этом к выбираемым для данных целей волнам помимо перечисленных выше требований в отношении определенности траектории и постоянства скорости их распространения предъявляется целый ряд дополнительных требований, основные из которых следующие:

волны должны распространяться вдоль измеряемой линии без значительного затухания, причем желательно при любых условиях погоды (в том числе в тумане, запыленной атмосфере и т. п.);

волны должны обеспечивать нормальную работу дальномерных систем в любое время суток и в любое время года.

Из всего разнообразия существующих в природе волн при решении вопроса о выборе носителя информации заслуживают внимания звуковые и электромагнитные волны.

Сопоставление особенностей распространения этих двух разновидностей волн свидетельствует о том, что внешние условия (неоднородный состав и состояние атмосферы, рельеф местности и т. п.) оказывают повышенное влияние на скорость и траекторию распространения звуковых волн. В результате этого не удастся обеспечить высокую точность линейных измерений при использовании указанных волн. К тому же эти волны принципиально не пригодны для измерения расстояний до объектов, находящихся за пределами земной атмосферы. В то же время в развивающихся за последние годы методах морской геодезии

Таблица 1

Участок спектра	Наименование волн	Длина волны	
		нижняя граница	верхняя граница
Оптический диапазон	Ультрафиолетовые	0,1 мкм	0,4 мкм
	Видимый свет	0,4 мкм	0,74 мкм
	Инфракрасные	0,75 мкм	1 мм
Радиоволны	УКВ диапазон	Миллиметровые	1 мм
		Сантиметровые	1 см
		Дециметровые	10 см
		Метровые	1 м
	Короткие	10 м	100 м
	Средние	100 м	1 км
	Длинные	1 км	10 км
	Сверхдлинные	10 км	100 км

звуковые волны с успехом используются для измерения расстояний в водной среде.

Что касается электромагнитных волн (интересующий нас участок спектра приведен в табл. 1), то они значительно полнее отвечают перечисленным выше требованиям. Так, например, скорость распространения этих волн в вакууме является фундаментальной физической константой, а при распространении таких волн в приземных слоях атмосферы максимальные отклонения от скорости в вакууме не превышают 0,04%. В однородной среде электромагнитные волны распространяются прямолинейно. В реальной неоднородной атмосфере искривления траектории световых лучей невелики, и в большинстве случаев высокоточных линейных измерений отмеченными искривлениями пренебрегают.

Однако свету свойствен такой существенный недостаток, как значительное затухание при распространении в тумане и дымке, что препятствует созданию «всепогодных» дальномеров. Работа с узконаправленными лучами, которые характерны для оптического диапазона электромагнитных волн, порождает также трудности измерения расстояний до движущихся объектов.

Отмеченных недостатков в значительной мере лишены радиоволны. Но, к сожалению, скорость и траектория распространения последних сильнее подвержены влиянию внешних условий.

Приведенные выше факты свидетельствуют о том, что для использования в качестве носителей информации при точном

измерении на местности и в окружающем пространстве длин линий наиболее подходящими являются электромагнитные волны; причем в зависимости от конкретных условий работы дальномерных устройств предпочтение отдают или свету, или радиоволнам.

§ 3. ВЫБОР ПРИНЦИПА ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Возвращаясь к разобранным примеру измерения расстояний с использованием движущегося поезда, заменим это материальное тело распространяющимся вдоль искомой линии импульсом света и рассмотрим требования, которые предъявляются при этом к устройствам, применяемым для фиксации интересующих нас моментов времени.

Прежде всего следует отметить, что скорость распространения света близка к 300 000 км/с. За одну миллиардную долю секунды, которая носит название наносекунды (нс), свет проходит расстояние, равное 30 см. Поскольку для большинства выполняемых геодезических работ необходима точность измерения расстояний, заключенная в пределах от нескольких сантиметров до десятых долей миллиметра, то интересующие нас моменты времени должны фиксироваться с точностью от десятых до тысячных долей наносекунды.

Такие высокие требования к измерителям временных интервалов не позволяют прежде всего реализовать рассмотренный выше пример с использованием двух синхронно идущих часов, так как несмотря на значительный прогресс в разработке прецизионных измерителей времени подавляющее большинство из них не обеспечивает необходимую взаимную точность в течение сравнительно длительного промежутка времени, определяемого реальной возможностью сличения показаний этих часов с целью проверки синхронности их хода.

Выполнение отмеченных требований значительно облегчается, если из схемы измерений исключить одни часы. С этой целью поместим на одном конце линии источник электромагнитного излучения и устройство для измерения коротких временных интервалов, а на другом конце линии — приспособление, отражающее падающие на него электромагнитные волны в обратном направлении. Последнее получило название отражателя. Схема взаимодействия указанных узлов показана на рис. 1.

Принцип действия приведенной схемы дальномера несложен. Отдельные очень короткие световые импульсы, излучаемые импульсным источником света 1, направляют на полупрозрачную пластину 2, с помощью которой часть энергии светового импульса отражается и поступает в приемное устройство 4, где от данного сигнала запускают электронные часы. Другая основная часть энергии этого импульса проходит через полупрозрачную

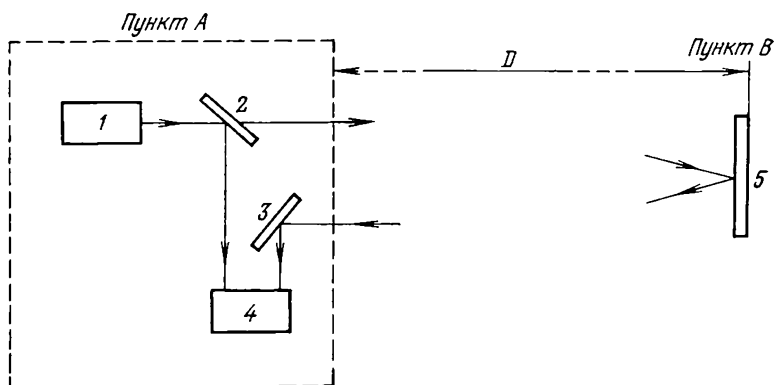


Рис. 1. Упрощенная схема импульсного светодальномера

пластину 2, затем вдоль измеряемой линии и попадает на отражатель 5, установленный на другом конце линии. После отражения от отражателя импульсный сигнал еще раз проходит измеряемую линию в обратном направлении, попадает на зеркало 3, а затем в приемное устройство 4. Последний сигнал используют для остановки электронных часов.

Если скорость света v известна, то нетрудно вычислить интересующую нас длину линии по формуле, аналогичной формуле (1):

$$2D = v\tau, \quad (2)$$

где τ — временной интервал, измеряемый электронными часами.

Множитель 2 в левой части формулы введен из-за того, что свет проходит измеряемое расстояние дважды (в прямом и обратном направлениях).

На практике формула (2) обычно используется в следующем виде:

$$D = v\tau/2. \quad (2a)$$

Следует заметить, что рассмотренная выше упрощенная функциональная схема лежит в основе многих современных импульсных светодальномеров. Один из существенных недостатков таких дальномеров состоит в том, что для выполнения высокоточных линейных измерений необходимо использовать импульсные сигналы с очень крутыми фронтами, которые практически реализовать и передать без искажений весьма трудно.

Решение проблемы значительно облегчается в случае применения фазовых методов определения интересующих нас отрезков времени.

Для пояснения особенностей фазового метода проанализируем работу устройства, схема которого приведена на рис. 2.

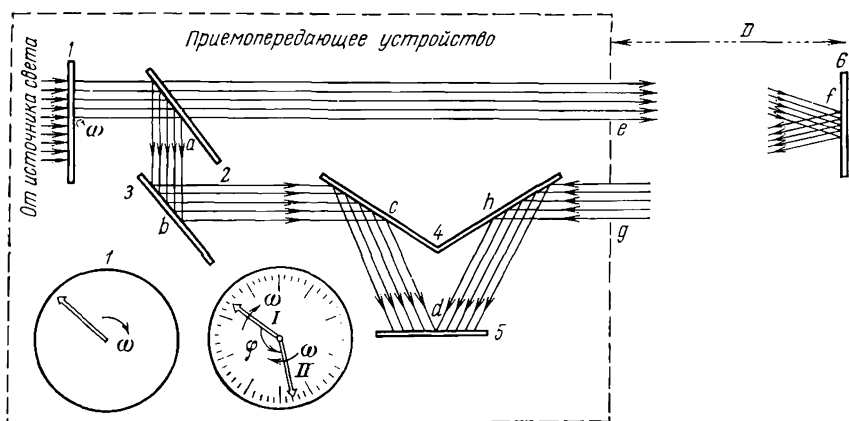


Рис. 2. Схема, поясняющая фазовый метод измерения расстояний

Пусть свет от источника непрерывного излучения падает в виде параллельного пучка на непрозрачный диск I , вращающийся в плоскости, перпендикулярной к плоскости рисунка, с угловой скоростью ω . В диске сделан вырез в виде стрелки, как показано на рис. 2. Если пренебречь искажениями изображения, обусловленными дифракционными эффектами, то световой поток в своем поперечном сечении на выходе из диска будет соответствовать форме выреза, т. е. будет иметь форму стрелки, которая вращается в пространстве с угловой скоростью ω .

Как и в предыдущем примере, поместим на пути прохождения светового луча полупрозрачную пластину 2, от которой часть светового потока отразится в сторону. Направим с помощью зеркал 3 и 4 часть светового потока на экран 5, представляющий собой прозрачный диск, на который нанесена круговая шкала. В результате на экране можно наблюдать светящееся изображение I , имеющее форму стрелки и вращающееся с угловой скоростью ω .

Другую часть светового потока, прошедшую через полупрозрачную пластину 2, направим на отражатель 6, установленный на другом конце измеряемой линии. После прохождения этой линии в прямом и обратном направлениях световой поток с помощью зеркала 4 также спроектируем на экран 5 (изображение II). В результате на участке от полупрозрачной пластины 2 до экрана 5 световые сигналы проходят по двум различным путям ($a-b-c-d$ и $a-e-f-g-h-d$), существенно отличающимся по длине. Поскольку на прохождение расстояния до удаленного отражателя и обратно свет затрачивает больше времени, то сигнал, пришедший с дистанции, будет запаздывать относительно сигнала, прошедшего по кратчайшему пути. Поэтому на экране можно наблюдать два изображения стрелки, вращаю-

щихся с одинаковой скоростью ω , но сдвинутых относительно друг друга на постоянный угол φ . Этот угол и будем в дальнейшем называть фазовым. Он является основным измерительным параметром, с помощью которого определяют время, затрачиваемое сигналом на прохождение измеряемого расстояния.

Затруднения, связанные с отсчитыванием угла φ между изображениями I и II , находящимися в непрерывном движении, легко преодолимы (например, путем фотографирования экрана за очень короткий промежуток времени). При этом в зависимости от момента фотографирования расположение стрелок на шкале может быть произвольным, но их взаимное положение, определяемое углом φ , будет постоянным.

§ 4. ОСНОВНАЯ РАБОЧАЯ ФОРМУЛА ФАЗОВОГО ДАЛЬНОМЕРА

На основе рассмотренной схемы установим математическую зависимость между измеряемым фазовым углом φ и величиной искомого расстояния D , обратив особое внимание на физическую сущность вводимых параметров.

Одним из основных параметров, от которых зависит величина угла φ , является угловая скорость вращения ω . Последняя характеризует быстроту вращения диска I (см. рис. 2). Количественно угловая скорость определяется углом, на который поворачивается диск за единицу времени,

$$\omega = \Delta\varphi/\Delta t. \quad (3)$$

Вместо угловой скорости в технике очень часто используют число оборотов n в минуту. Величины ω и n однозначно связаны между собой простой математической зависимостью.

Предположим, что диск совершает n оборотов за одну минуту. За секунду он совершит $n/60$ оборотов. Последний параметр для рассматриваемых в дальнейшем периодически повторяющихся процессов, к которым относится и вращательное движение, носит название частоты:

$$f = n/60. \quad (4)$$

Время одного оборота, характеризующее периодичность процесса, называют периодом и обозначают в большинстве случаев T :

$$T = 1/f = 60/n. \quad (5)$$

При равномерном вращении диска один оборот, соответствующий углу, равному 2π , совершается за время T . Следовательно, угловая скорость, выраженная в радианах в секунду, будет при этом равна

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \frac{2\pi}{60} n. \quad (6)$$

Возвращаясь к схеме, изображенной на рис. 2, нетрудно теперь вывести формулу для фазового угла φ . Если пренебречь временными задержками сигналов, которые они получают в результате прохождения оптического пути внутри приемопередающего устройства, то в соответствии с формулой (3)

$$\varphi = \omega\tau, \quad (7)$$

где $\tau = 2D/v$ — время, которое затрачивает сигнал на прохождение измеряемого расстояния в прямом и обратном направлениях.

Подставляя значение τ в формулу (7), имеем

$$\varphi = \omega \frac{2D}{v}. \quad (7a)$$

или

$$D = \frac{v}{2\omega} \varphi. \quad (8)$$

Формула (8) является основной рабочей формулой для фазовых дальнометров. Непосредственно из анализа данной формулы следует, что для определения искомой длины линии фазовыми методами необходимо не только измерить величину фазового угла φ , но и обеспечить определение скорости распространения v используемых нами сигналов и угловую скорость ω .

§ 5. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ФАЗОВОГО ДАЛЬНОМЕРА

На основе рассмотренного примера реализации принципа измерения расстояний фазовым методом выявим общие закономерности построения схемы фазового дальнометра.

Одним из неотъемлемых узлов приведенной на рис. 2 схемы является источник света (или, в общем случае, источник электромагнитного излучения). При фазовом методе этот источник должен работать в непрерывном режиме. Однако в последние годы все более широкое распространение получает импульснофазовый метод измерения расстояний. При использовании последнего излучатель может работать и в импульсном режиме.

Другим характерным узлом данной схемы является вращающийся диск, видоизменяющий проходящий через него световой поток и приводимый в движение тем или иным устройством (например, электродвигателем). Этот узел, управляющий одним из параметров используемого нами излучения, в общем случае носит название модулятора.

Далее на пути прохождения светового потока расположена полупрозрачная пластина. Основная роль данного узла состоит в том, чтобы разделить проходящий через пластину оптический сигнал на две части. В дальнейшем будет показано, что такое разделение может производиться не только с помощью полупрозрачной пластины и необязательно в тракте прохождения оптического луча.

Тот сигнал, который попадает на экран (см. рис. 2) по кратчайшему пути, называют опорным. Наличие опорного сигнала является обязательным для всех разновидностей фазовых дальномеров.

Другой сигнал, посылаемый на удаленный отражатель 6 и проходящий измеряемое расстояние в прямом и обратном направлениях, не получил до настоящего времени установившегося термина. В дальнейшем этот сигнал будем условно называть информационным, т. е. несущим в себе информацию о величине измеряемого расстояния. Вполне очевидно, что при отсутствии данного сигнала (так же, как и опорного) немыслима работа фазового дальномера.

Устройство 6, устанавливаемое на удаленном конце линии и получившее название отражателя, также входит в перечень обязательных составных узлов дальномера. Отражатель может быть реализован в виде зеркала той или иной конструкции, которое отражает падающий на него свет в обратном направлении. Однако такое пассивное отражающее устройство не всегда отвечает предъявляемым к нему требованиям. Так, при использовании в качестве несущих колебаний радиоволн целесообразнее применить активный ретранслятор, с помощью которого производится не только усиление, но и преобразование переизлучаемых сигналов.

Наконец, еще одним неотъемлемым элементом схемы фазового дальномера является экран 5 со шкалой (см. рис. 2), позволяющий произвести отсчет величины фазового угла. В общем случае этот узел носит название фазоизмерительного устройства или сокращенно фазометра.

Что касается элементов оптического тракта 3 и 4, то они выполняют вспомогательные функции, и их присутствие в той или иной схеме дальномера не является обязательным.

Таким образом, на основе выполненного выше анализа, не прибегая к дополнительным пояснениям, представляется возможным начертить простейшую схему фазового дальномера (рис. 3).

Для обоснования необходимости дальнейшего совершенствования схемы, построенной на основе рассмотренного выше принципа, отметим отдельные особенности работы дальномеров, использующих механические модуляторы в виде вращающихся дисков.

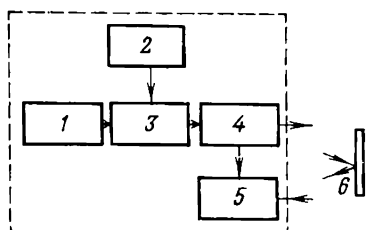


Рис. 3. Упрощенная схема фазового дальномера:

1 — источник непрерывного электромагнитного излучения; 2 — устройство, управляющее работой модулятора; 3 — модулятор; 4 — разделитель сигналов; 5 — фазоизмерительное устройство; 6 — отражатель

Прежде всего, исходя из требований получения заданной точности измерений, оценим необходимую величину угловой скорости механического модулятора. В соответствии с формулой (8) изменения расстояния ΔD связаны с изменениями величины фазового угла $\Delta\varphi$ соотношением

$$\Delta D = \frac{v}{2\omega} \Delta\varphi. \quad (9)$$

Откуда

$$\omega = \frac{v}{2} \frac{\Delta\varphi}{\Delta D}.$$

При измерении расстояний с точностью 1 см и погрешности фазовых измерений, равной $0,1^\circ$ (или в радианах 0,0017), а также с учетом того, что скорость распространения электромагнитных волн равна примерно $3 \cdot 10^{10}$ см/с, необходима угловая скорость модулятора, равная $\omega \approx 25 \cdot 10^6$ рад/с.

Реализация такой чрезвычайно высокой угловой скорости при любых модификациях конструкции диска представляет собой сложнейшую техническую задачу. В дополнение к этому необходимо также обеспечить высокую стабильность этой скорости во время всей работы дальномера.

Указанные причины наряду с целым рядом других причин, препятствующих созданию портативного экономичного автоматизированного дальномера, послужили основой для отказа от использования принципа управления световым потоком с помощью механически вращающихся дисков.

Решение задачи значительно упрощается при замене модулятора механического типа на устройство, в котором управление несущими колебаниями осуществляется с помощью электрических сигналов. При этом необязательно стремиться к тому, чтобы фазовые измерения выполнялись на основе использования вращательного движения. Эта же задача может быть успешно решена и при использовании простейших колебательных процессов.

§ 6. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ВРАЩАТЕЛЬНЫМ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЯМИ

Для установления связи между параметрами, характеризующими вращательное и колебательное движение, рассмотрим следующий пример (рис. 4).

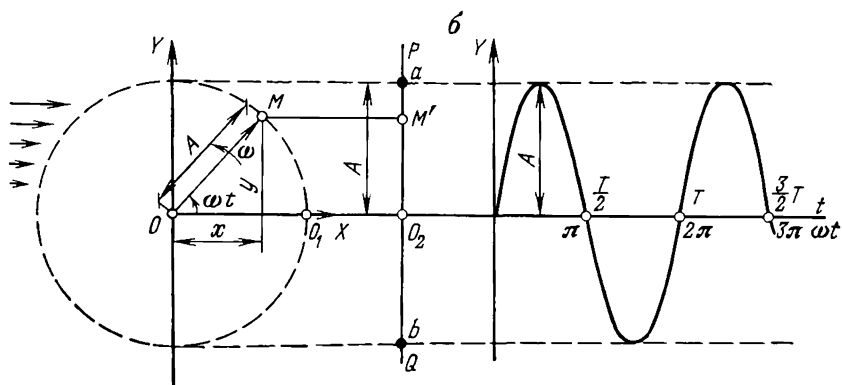


Рис. 4. Графики взаимосвязи между вращательным и колебательным движениями:
 а — график вращения вектора; б — график проекции вращающегося вектора на вертикальную ось

Пусть какое-либо материальное тело (например, небольшой шарик M) вращается с угловой скоростью ω по окружности радиуса A с центром в точке O (рис. 4, а). Направим на этот шарик в плоскости его вращения параллельный пучок света. При этом на поверхности PQ , расположенной перпендикулярно к плоскости рисунка, будет видна тень в виде небольшого темного пятна (точка M'), которая будет совершать колебательные движения относительно точки O_2 .

Если угловая скорость шарика M постоянна, то угол поворота отрезка OM относительно начальной точки O_1 , получивший название текущей фазы, будет определяться как

$$\theta(t) = \omega t. \quad (10)$$

При этом удаление точки M' относительно точки O_2 оказывается равным

$$M'O_2 = OM \sin \omega t, \quad (11)$$

или

$$y = A \sin \omega t, \quad (12)$$

где $y = M'O_2$ — удаление точки M' от точки O_2 в произвольный момент времени; $A = aO_2 = OM$ — максимальное удаление этой точки, называемое в общем случае амплитудой колебания.

Параметры ω , f и T имеют тот же физический смысл, что и для рассмотренного выше вращательного движения, но применительно к колебательному движению для некоторых из них введены специальные названия и единицы измерения. Так, величину ω чаще всего называют угловой или круговой частотой, а величина f , характеризующая число колебаний в единицу време-

ни, носит название частоты колебаний и измеряется в герцах (один герц соответствует одному колебанию в секунду)¹

Уравнение (12) широко известно как уравнение гармонических колебаний. Колебательное движение, совершаемое по гармоническому закону, часто называют простейшим, так как оно играет такую же роль в различных колебательных движениях, как равномерное прямолинейное движение при поступательных перемещениях тела или равномерное вращательное движение при рассмотрении различного рода вращательных процессов.

Графическое изображение колебательного движения, описываемого уравнением (12), показано на рис. 4, б.

В общем случае за начало отсчета может быть принято произвольное состояние вращательного и соответствующего ему колебательного движения. При этом текущая фаза $\varphi(t)$ определяется выражением

$$\varphi(t) = \omega t + \varphi_0,$$

где φ_0 — начальная фаза в момент времени, равный нулю.

Уравнение (12) для общего случая принимает вид

$$y = A \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (13)$$

Колебания, описываемые уравнением

$$y = A \cos(\omega t + \varphi_0'), \quad (14)$$

также являются гармоническими, так как формулы (13) и (14) различаются между собой только значением начальной фазы.

Описанная выше взаимосвязь между вращательным и колебательным движениями является настолько глубокой, что позволяет с помощью анализа одного из них изучать качественные и количественные закономерности другого. В частности, в электротехнике и радиотехнике широкое распространение получил метод вращающихся векторов, используемый для изучения различных гармонических колебаний. Характерная особенность этого метода состоит в том, что периодически изменяющиеся по гармоническому закону физические величины представляют в виде вращающихся векторов, длины которых пропорциональны амплитудам рассматриваемых колебаний, а угловая скорость вращения — круговой частоте этих колебаний.

В последующих параграфах учебника в отдельных случаях используется указанная взаимосвязь как для более наглядного объяснения тех или иных физических процессов, так и при установлении количественных соотношений между отдельными интересующими нас параметрами. Так, например, все основные особенности работы рассмотренного выше фазового дальномера

¹ Практически наряду с герцами (Гц) широко используются и производные единицы — килогерцы, мегагерцы и гигагерцы ($1 \text{ кГц} = 1 \cdot 10^3 \text{ Гц}$, $1 \text{ МГц} = 1 \cdot 10^6 \text{ Гц}$, $1 \text{ ГГц} = 1 \cdot 10^9 \text{ Гц}$).

с использованием в качестве модулятора механически вращающегося диска характерны и для других фазовых дальномеров, в которых используются иные виды управления параметрами излучаемых колебаний. Поэтому изображенную на рис. 3 функциональную схему фазового дальмера можно рассматривать как обобщающую.

§ 7. ДЛИНА ВОЛНЫ ИЗЛУЧАЕМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Применительно к дальномерным системам представляет интерес круг вопросов, связанных с изучением закономерностей распространения колебаний в окружающем нас пространстве. Как уже отмечалось выше, такие колебания получили название волн.

Для наглядности вводимых ниже представлений о волновых процессах рассмотрим следующий простой пример. Нальем в достаточно широкую ванну воду и будем периодически погружать в нее какой-либо стержень (например, карандаш). При этом от стержня будут расходиться волны, имеющие вид концентрических окружностей (рис. 5). Заметим, что при соблюдении строгой ритмичности погружения стержня расстояние между соседними горбами (а соответственно, и между впадинами) будет оставаться неизменным. Это расстояние для широкого круга волновых процессов получило название длины волны. Величина данного параметра зависит как от скорости распространения волн, так и от частоты их возбуждения (т. е. в рассматриваемом случае от частоты погружения стержня):

$$\lambda = \frac{v}{f} = vT, \quad (15)$$

где v — скорость распространения волн; f и T — соответственно частота и период возбуждаемых колебаний.

Волны, распространяющиеся с определенной скоростью в одном направлении, получили название бегущих. При наличии на пути распространения волн препятствий (например, стенки сосуда) они отражаются, т. е. возникают отраженные волны, распространяющиеся в обратном направлении.

Введенные представления об отдельных особенностях распространения волн на водной поверхности справедливы и для электромагнитных волн, применяемых в дальномерной технике. В частности, для уяснения роли широко используемого в дальнейшем понятия длины волны проанализируем вкратце работу простейшего фазового дальмера, основанного на применении гармонических колебаний. Функциональная схема такого дальмера показана на рис. 6, основная отличительная особенность которой от обобщенной схемы (см. рис. 3) состоит в том, что при использовании в качестве излучателя источника гармонич-

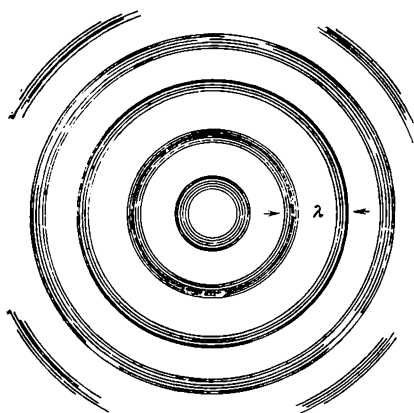


Рис. 5. Схематическое изображение волн на поверхности воды

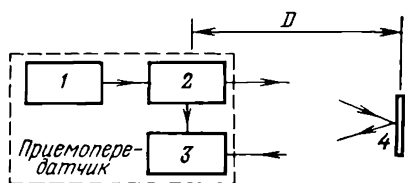


Рис. 6. Простейшая схема фазового дальномера с источником, генерирующим гармонические колебания:

1 — источник гармонических колебаний; 2 — разделитель сигналов; 3 — фазоизмерительное устройство; 4 — отражатель

ческих колебаний наличие модулятора и устройства, управляющего работой модулятора, не является обязательным.

В соответствии с уравнением (13) текущая фаза колебаний на выходе из источника излучения может быть описана следующим математическим выражением

$$\theta(t) = \omega t + \varphi_0. \quad (16)$$

Если предположить, что излучаемые в направлении на отражатель электромагнитные колебания распространяются в однородной среде со скоростью v , то после прохождения измеряемого расстояния в прямом и обратном направлениях эти колебания будут запаздывать по фазе относительно опорных колебаний, поступающих в фазоизмерительное устройство по кратчайшему пути. Текущая фаза принимаемых с дистанции колебаний определится выражением

$$\theta'(t) = \omega \left(t - \frac{2D}{v} \right) + \varphi_0. \quad (17)$$

Разность фаз между излучаемыми и принимаемыми колебаниями при этом равна

$$\varphi = \theta(t) - \theta'(t) = \omega \frac{2D}{v}. \quad (18)$$

Тождественность уравнений (7а) и (18), устанавливающих зависимость между фазовым углом φ и величиной измеряемого расстояния D и полученных при управлении излучаемыми сигналами с использованием как вращательных, так и колебательных процессов, лишний раз свидетельствует о тесной взаимосвязи между упомянутыми процессами.

Учитывая, что $\omega \approx 2\pi f$, и решая уравнение (18) относительно D , получим

$$D = \frac{\varphi}{2\pi} \frac{v}{2f}. \quad (19)$$

Данная формула, как и аналогичная ей формула (8), является основной рабочей формулой для фазовых дальномеров. С введением понятия длины волны отмеченные формулы могут быть записаны в несколько ином виде, позволяющем дать фазовым методам более наглядную физическую трактовку, а также представить используемый нами косвенный метод измерения расстояний в виде эквивалентного ему прямого метода. С этой целью преобразуем формулу (19) с учетом уравнения (15):

$$D = \frac{\varphi}{2\pi} \frac{\lambda}{2}. \quad (20)$$

Кроме того, заметим, что в зависимости от длины измеряемой линии фазовый угол φ может иметь значения, значительно превышающие 2π . В то же время любое фазоизмерительное устройство способно измерять разность фаз только в пределах, не превышающих одного периода, т. е. от 0 до 2π . С учетом этого

$$\varphi = 2\pi N + \Delta\varphi, \quad (21)$$

где $\Delta\varphi$ — фазовый угол, непосредственно измеряемый фазометром; N — целое число, соответствующее количеству полных периодов изменения фазы за время прохождения сигналом измеряемого расстояния в прямом и обратном направлениях.

Для наглядности отметим, что применительно к схеме, изображенной на рис. 2, число N соответствует числу полных оборотов стрелки опорного сигнала, которое она совершит за время прохождения информационным сигналом расстояния до отражателя и обратно.

Подставляя приведенное выражение для φ в уравнение (20), получим

$$D = (N + \Delta N) \frac{\lambda}{2}, \quad (22)$$

где $\Delta N = \Delta\varphi/2\pi$ — измеряемый фазометром фазовый угол, выраженный в долях полного периода, т. е. величина ΔN всегда меньше единицы.

Остановимся на физическом смысле отдельных составляющих, входящих в формулу (22).

Величина $\lambda/2$, соответствующая половинному значению длины волны используемых колебаний, представляет собой своеобразный «метр», которым измеряют расстояние. Целое число N соответствует тому, сколько таких «метров» укладывается в измеряемом расстоянии. Величина ΔN характеризует в относи-

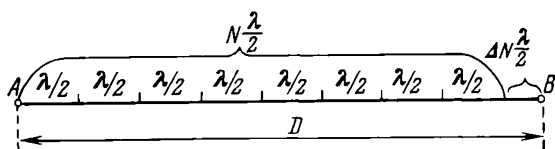


Рис. 7. Взаимосвязь длины волны масштабных колебаний с величиной измеряемого расстояния

тельных единицах дробную часть «метра», которая дополняет целое число «метров» до величины измеряемого расстояния. Рис. 7 иллюстрирует основные идеи прямого метода измерения расстояний, к которому может быть сведен рассматриваемый нами косвенный метод фазовых измерений.

Возвращаясь к формуле (22), заметим, что за исключением N все величины, входящие в правую часть этой формулы, или известны, или определяются в процессе измерения расстояний. Действительно, для определения λ согласно формуле (15) достаточно знать скорость распространения электромагнитных волн v и их частоту f . Величину ΔN определяют по значению измеренного угла $\Delta\phi$. Что же касается целого числа N , то оно остается неизвестным при использовании колебаний только одной частоты. Это обусловлено свойством фазоизмерительных устройств, позволяющих измерять разность фаз только в пределах одного периода. В связи с этим для расстояний, отличающихся на целое число $\lambda/2$, показания фазометра получаются одинаковыми. В результате формула для вычисления расстояний не будет давать однозначного решения, т. е. возникает неоднозначность определения длины D .

Для разрешения неоднозначности, т. е. нахождения целого числа N , измерения фазовым дальномером выполняют не на одной, а на нескольких частотах. Более подробно методы разрешения неоднозначности рассмотрены ниже в § 12.

§ 8. НЕСУЩИЕ И МАСШТАБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Из анализа функциональной схемы дальмера, приведенной на рис. 6, следует, что в случае использования в качестве излучателей источников гармонических колебаний принципиально не возникает необходимости в применении отдельных модуляторов, так как управление излучаемыми колебаниями по гармоническому закону можно осуществлять за счет физических процессов, лежащих в основе работы таких излучателей.

Многие из разработанных к настоящему времени источников электромагнитных колебаний как оптического, так и радиодиапазонов по своему принципу действия являются источниками гармонических колебаний. В частности, к таким источникам в оптическом диапазоне могут быть отнесены отдельные типы

лазеров, а в радиодиапазоне — подавляющее большинство генераторов, работающих в непрерывном режиме.

Среди свето- и радиодальномеров, в которых измерение расстояний осуществляется непосредственно с использованием немодулированных гармонических колебаний, в отмеченную группу приборов входят лазерные интерферометры, а также отдельные типы радиогеодезических систем, работающих в средних и длинноволновом диапазонах.

Широкому распространению дальномеров рассматриваемого типа препятствуют трудности, связанные с разрешением неоднозначности. Непосредственно из рис. 7 видно, что для уверенного разрешения неоднозначности необходимо, чтобы погрешность в измерении расстояния на фиксированной частоте излучаемых колебаний не превышала четверти длины волны этих колебаний. Для оптического диапазона отмеченная длина исчисляется десятками долями микронметра, а для радиоволн УКВ диапазона — единицами сантиметров. Обеспечить такую высокую точность измерений на практике, как правило, не удается.

В связи с вышеизложенным рассмотрим, из каких же соображений следует выбирать частоту колебаний, по фазовым сдвигам которых определяется длина измеряемой линии.

Современные фазоизмерительные устройства позволяют без значительных технических трудностей измерять разность фаз двух гармонических колебаний с погрешностью от 0,1 до 1°. Если поставить условие, что точность измерения расстояний характеризуется ошибками, не превосходящими 0,5—3 см, то, воспользовавшись формулой (19), нетрудно подсчитать, что частота электромагнитных колебаний должна выбираться в пределах диапазона от 1,5 до 100 МГц (длина волны — от 200 до 3 м).

При использовании более низких частот точность измерения расстояний будет ниже заданных пределов. Если же применить более высокие частоты, то возникают трудности, связанные с неоднозначными результатами получаемого в процессе измерения искомого расстояния.

Таким образом, по указанным выше причинам диапазон электромагнитных колебаний от 1,5 до 100 МГц оказывается наиболее подходящим. Однако из анализа условий распространения электромагнитных волн следует, что волны этого диапазона мало пригодны для точного измерения расстояний по следующим причинам:

1. Данные волны способны огибать встречающиеся на пути препятствия, в результате чего траектория распространения волн искривляется и становится недостаточно определенной.

2. Антенны для излучения и приема радиоволн метрового и более длинноволновых диапазонов состоят, как правило, из системы проводников значительной длины. Положение центра излучения таких антенн относительно точки, от которой измеряется расстояние, становится весьма неопределенным.

3. Электрические свойства подстилающей поверхности, т. е. земли, воды, снега и т. п., существенно влияют на скорость распространения радиоволн указанного диапазона.

Перечисленные трудности в значительной мере устраняются, если существенно повысить частоту излучаемых электромагнитных колебаний. Но, как уже отмечалось выше, из-за трудности разрешения неоднозначности такие СВЧ колебания мало пригодны для непосредственных фазовых измерений.

Для преодоления указанных противоречий в современных геодезических дальномерах применяют модулированные электромагнитные колебания. При этом для переноса информации с одного конца измеряемой линии на другой используют СВЧ колебания с частотами свыше тысячи мегагерц, в частности, ультракороткие радиоволны сантиметрового и миллиметрового диапазонов (частоты от 3000 до 36 000 МГц) и оптический диапазон (частоты порядка 10^{14} Гц). Эти колебания подвергаются модуляции, т. е. управлению другими более низкочастотными колебаниями, по фазовым сдвигам которых определяют величину измеряемого расстояния. Исходя из этого, последние колебания часто называют модулирующими. Их частота выбирается в пределах указанного выше диапазона (от 1,5 до 100 МГц). Поскольку упомянутая частота определяет ту длину волны, с помощью которой измеряют расстояние, то она получила название масштабной частоты, а соответствующие ей модулирующие колебания часто называют также масштабными.

Излучаемые СВЧ колебания используются при этом только для переноса колебаний масштабной частоты от одного конца измеряемой линии до другого и обратно. В связи с этим данные колебания и соответствующие им частоты называют несущими.

§ 9. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕСУЩИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Совместное использование колебаний несущих и масштабных частот позволяет преодолеть отмеченные выше трудности, связанные как с разрешением неоднозначности, так и с обеспечением необходимой точности измерений. Вместе с тем возникает необходимость введения в схему дальномера дополнительных технических средств, позволяющих управлять одним из параметров несущих колебаний. Как уже отмечалось выше, сам процесс управления получил название модуляции, а устройства, осуществляющие это управление, — модуляторов. Колебания, возникающие в результате такого управления, называют модулированными.

Рассмотрим вкратце основные принципы управления несущими колебаниями. К настоящему времени для передачи на расстояние той или иной информации используют большое разнообразие различных видов модуляции. В том случае, если пер-

вичные колебания являются строго гармоническими, то возможное количество видов модуляции существенно ограничивается. Оно соответствует при этом числу параметров гармонического колебания. Согласно уравнению (13) таких параметров всего три: амплитуда A , частота f (или круговая частота ω) и начальная фаза φ_0 .

В зависимости от того, какой из параметров несущих колебаний подвергается изменениям, различают три вида модуляции: амплитудную, частотную и фазовую. Поскольку все эти три вида модуляции находят применение в дальномерной технике, проанализируем их характерные особенности.

Как уже отмечалось выше, гармонические колебания (и, в частности, несущие) описываются следующим математическим выражением:

$$y = A' \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (23)$$

Будем гармонически менять амплитуду этих колебаний во времени с круговой частотой Ω , т. е.

$$A' = A + \Delta A \cos \Omega t = A(1 + m \cos \Omega t), \quad (24)$$

где A — амплитуда несущих колебаний при отсутствии модуляции; ΔA — максимальное изменение амплитуды несущих колебаний; $m = \Delta A/A$ — коэффициент, характеризующий относительные изменения амплитуды A и называемый коэффициентом глубины модуляции.

Коэффициент m является основным параметром амплитудной модуляции.

Необходимо отметить, что для передачи модулирующих колебаний с наименьшими искажениями необходимо, чтобы их частота была значительно ниже частоты несущих колебаний, т. е. $\Omega \ll \omega$. Обычно на практике выполняют условие: $\omega/\Omega \geq 100$.

Подставим выражение (24) в (23):

$$y = A(1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (25)$$

Уравнение (25) называют уравнением амплитудно-модулированных (АМ) колебаний. На рис. 8 дано графическое представление АМ колебаний. Как видно из этого рисунка, коэффициент глубины модуляции m может изменяться в пределах от 0 до 1.

Если в формуле (25) раскрыть скобки и сделать тригонометрические преобразования, то получим

$$y = A \cos(\omega t + \varphi_0) + \frac{mA}{2} \cos[(\omega + \Omega)t + \varphi_0] + \frac{mA}{2} \cos[(\omega - \Omega)t + \varphi_0]. \quad (26)$$

Следовательно, такие простейшие АМ колебания можно рассматривать как сумму трех гармонических колебаний с частота-

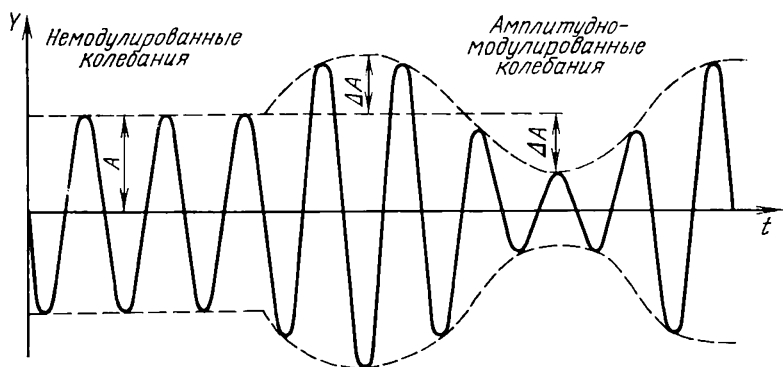


Рис. 8. Графическое изображение амплитудно-модулированных колебаний

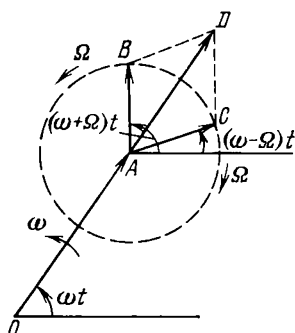


Рис. 9. Векторная диаграмма АМ колебаний

ми ω , $\omega + \Omega$ и $\omega - \Omega$, причем первая из них носит название основной несущей, а две последние — верхней и нижней боковых частот.

Наглядное представление об амплитудно-модулированных колебаниях, состоящих из трех составляющих компонентов, можно составить из рассмотрения векторной диаграммы (рис. 9). Вектор OA колебаний основной несущей частоты имеет длину A , которая характеризует амплитуду колебаний этой составляющей. Он вращается с угловой скоростью ω . Векторы AB и AC с амплитудами $mA/2$ вращаются с угловы-

ми скоростями $\omega + \Omega$ и $\omega - \Omega$, что эквивалентно вращению этих векторов относительно вектора OA с угловой скоростью Ω в противоположные стороны. Сумма всех трех векторов, соответствующая амплитудно-модулированному колебанию, представлена на данном рисунке вектором OD . Этот вектор всегда совпадает по направлению с вектором основной несущей частоты OA , что свидетельствует о его вращении с неизменной угловой скоростью ω . Что касается его длины, то она периодически изменяется по мере вращении векторов AB и AC относительно OA . Это означает, что данное результирующее колебание имеет постоянную частоту, но изменяющуюся с течением времени амплитуду, т. е. является амплитудно-модулированным колебанием.

При реализации частотно-модулированных (ЧМ) колебаний с течением времени изменяется не амплитуда, а частота несущих колебаний.

Пусть исходные несущие колебания, так же как и в предыдущем случае, определяются формулой

$$y = A \cos(\omega t + \varphi_0) = A \cos \theta(t). \quad (27)$$

Под воздействием гармонических модулирующих колебаний несущая частота изменяется согласно уравнению

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t, \quad (28)$$

где ω_0 — круговая частота немодулированных несущих колебаний; $\Delta\omega$ — максимальное отклонение круговой частоты под воздействием модулирующих колебаний, именуемое девиацией частоты.

При анализе частотной модуляции необходимо прежде всего отметить следующую характерную особенность данного вида модуляции.

Изменение значения круговой частоты свидетельствует о том, что мы имеем дело с колебаниями, скорость изменения фазы которых не остается постоянной с течением времени. В то же время, как было показано в § 6, уравнение гармонических колебаний вида $y = A \cos(\omega t + \varphi_0)$ получено в предположении, что частота данных колебаний постоянна. Поэтому непосредственная подстановка значения ω , определяемого уравнением (28), в уравнение (27) недопустима.

Как известно из общего курса физики, скорость поступательного движения тела в общем виде определяется уравнением $v = dx/dt$.

Применительно к колебательным движениям величиной, эквивалентной расстоянию x , является текущая фаза $\theta(t)$. Поэтому угловая скорость $\omega(t)$ в общем виде определяется как

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}.$$

Откуда текущая фаза для рассматриваемой частотной модуляции описывается следующим математическим выражением:

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt = \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t + C,$$

где $C = \varphi_0$ — постоянная интегрирования, равная в нашем случае начальной фазе.

Подставляя значение $\theta(t)$ в формулу (27), получим уравнение для частотно-модулированных колебаний

$$y = A \cos(\omega_0 t + \beta \sin \Omega t + \varphi_0), \quad (29)$$

где $\beta = \Delta\omega/\Omega$ — коэффициент, определяемый отношением девиации частоты к частоте модулирующих колебаний и называемый индексом частотной модуляции.

Коэффициент β является основным параметром частотной модуляции. Его величина может принимать любые положительные

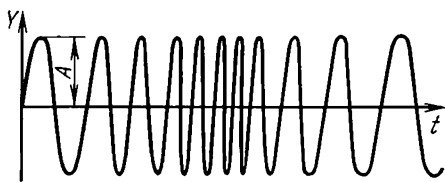


Рис. 10. Графическое изображение частотно-модулированных колебаний

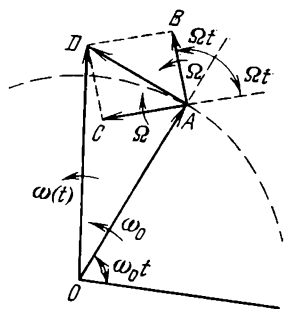


Рис. 11. Векторная диаграмма ЧМ колебаний

ные значения. Однако практически для ограничения частотного спектра величину β выбирают в пределах от нуля до нескольких десятков.

Графическое изображение ЧМ колебаний показано на рис. 10.

Так же как и при амплитудной модуляции, ЧМ колебания можно представить в виде суммы простых гармонических колебаний. Не останавливаясь на громоздких промежуточных математических преобразованиях, приведем уравнение (29) в следующем виде:

$$y = A \left\{ J_0(\beta) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \sum_{k=1}^{\infty} J_k(\beta) \cos[(\omega_0 + k\Omega)t + \varphi_0] + \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^{\infty} J_k(\beta) \cos[(\omega_0 - k\Omega)t + \varphi_0] \right\}, \quad (30)$$

где $J_0(\beta)$ и $J_k(\beta)$ — вспомогательные коэффициенты, однозначно определяемые через величину β ; $k=1, 2, 3, \dots$ — последовательность целых чисел.

Физический смысл уравнения (30) состоит в том, что ЧМ колебание, представляющее собой колебательное движение с переменной скоростью изменения текущей фазы, можно заменить суммой большого количества гармонических колебательных движений различной частоты, в каждом из которых скорость изменения текущей фазы постоянна. При этом амплитуды гармонических составляющих определяются индексом частотной модуляции β , и по мере повышения номера гармоники k амплитуды данных составляющих имеют тенденцию к уменьшению.

В современных дальномерных системах, как правило, используются ЧМ колебания с небольшим индексом частотной модуляции ($0 < \beta < 1$). В данном случае влиянием гармоник с номерами $k \geq 2$ можно пренебречь, и уравнение (30) принимает следующий упрощенный вид:

$$y = A \{ J_0(\beta) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + J_1(\beta) \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0] - \\ - J_1(\beta) \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0] \}. \quad (31)$$

Формальное сравнение уравнений (26) и (31), характеризующих АМ и ЧМ колебания, свидетельствует о том, что данные колебания содержат одни и те же составляющие, которые могут иметь несколько разное соотношение амплитуд колебаний основной несущей и боковых частот. Принципиальное отличие состоит в том, что составляющая нижней боковой частоты для ЧМ колебаний имеет противоположный знак. Для того чтобы оценить роль этого знака, рассмотрим векторную диаграмму для ЧМ колебаний, соответствующую уравнению (31).

Принцип построения диаграммы, приведенной на рис. 11, аналогичен тому, который был использован при анализе АМ колебаний (см. рис. 9), но в соответствии с уравнением (31) вектор AC , характеризующий составляющую нижней боковой частоты, имеет противоположное направление. В результате вектор AD , соответствующий сумме векторов AB и AC боковых составляющих, уже не совпадает с направлением вектора OA основной составляющей, а перпендикулярен к ней. При этом по мере вращения векторов AB и AC результирующий вектор OD качается относительно вектора несущей частоты OA . Что касается длины вектора OD , то в соответствии с основным уравнением (29) для ЧМ колебаний эта длина должна оставаться постоянной. Некоторое отличие длины вектора OD от OA (см. рис. 11) обусловлено тем, что мы не учитываем в данном случае влияние высших гармоник. При более строгом рассмотрении конец результирующего вектора OD перемещается по дуге окружности, т. е. не изменяет свою длину, а в результате качания около вектора OA его угловая скорость все время изменяется, что и характеризует основные отличительные особенности ЧМ колебаний.

При фазовой модуляции (ФМ) под воздействием управляющего сигнала изменяется начальная фаза несущих колебаний. Поскольку в геодезических фазовых дальномерах модуляция этих колебаний осуществляется, как правило, гармоническим сигналом, то уравнение для ФМ колебаний имеет следующий вид:

$$y = A \cos(\omega_0 t + \Delta\psi \sin \Omega t + \varphi_0), \quad (32)$$

где $\Delta\psi$ — индекс фазовой модуляции.

Сопоставление уравнений (29) и (32), написанных для ЧМ и ФМ колебаний, свидетельствует о том, что эти два вида модулированных колебаний описываются одинаковыми математическими выражениями. Поэтому все особенности прохождения таких двух разновидностей модулированных несущих колебаний как через атмосферу, так и по электрическим цепям дальномера одинаковы. Различие состоит лишь в технической реализации этих видов управления несущими колебаниями, причем индексы модуляции β и $\Delta\psi$ по-разному зависят от параметров модулирующего сигнала. Так, если индекс ФМ колебаний $\Delta\psi$ опреде-

ляется только амплитудой управляющего сигнала, то индекс ЧМ колебаний β зависит не только от амплитуды, но и от частоты этого сигнала.

§ 10. МЕТОДЫ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ДАЛЬНОМЕРАХ

Основным параметром, используемым при вычислении значения интересующей нас длины линии, является определяемая из фазовых измерений величина фазового угла между опорным и информационным сигналами. Поиски возможностей выполнения фазовых измерений с максимальной точностью, а также стремление проведения таких измерений с помощью несложных технических средств привели к разработке различных методов фазовых измерений, нашедших практическое применение в геодезических фазовых дальномерах. При этом упомянутые методы постоянно видоизменяются по мере совершенствования дальномерной техники.

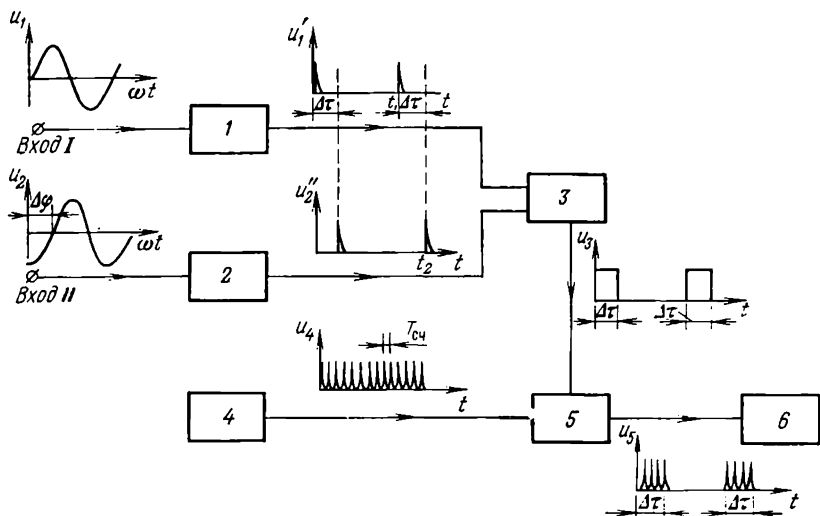
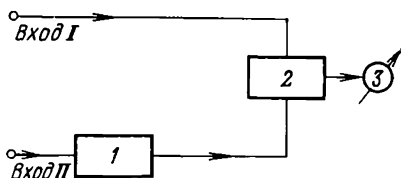
Так, в визуальных светодальномерах, получивших распространение в 60-х годах, нашел применение метод фазовых измерений, основная особенность которого состояла в том, что разность фаз между опорным и информационным сигналами регистрировалась оператором визуально (как правило, по минимуму светового потока, выходящего из размещаемого на входе приемного устройства специального узла, получившего название демодулятора). Поскольку эти минимумы соответствовали вполне определенным соотношениям фазосравниваемых сигналов, то возникала задача приведения разности фаз, зависящей от длины измеряемой линии, к определенным, заранее заданным значениям. Такая проблема решалась посредством плавного изменения масштабной частоты. Оператор в процессе измерения расстояний определял то значение упомянутой частоты, которое соответствовало минимуму светового потока. Это свидетельствовало о том, что в измеряемом расстоянии укладывается без остатка вполне определенное целое число отрезков длины, задаваемых длиной волны масштабных колебаний.

В связи с тем что визуальные светодальномеры к настоящему времени почти повсеместно вытеснены более совершенными лазерными дальномерами с высоким уровнем автоматизации измерительного процесса, то описанный визуальный метод фазовых измерений также не получил дальнейшего развития.

В фазовых УКВ радиодальномерах, созданных в конце 50-х и начале 60-х годов, нашел применение другой метод фазовых измерений, базирующийся на использовании в качестве фазометра электроно-лучевой трубки. Данный метод получил название способа круговой развертки. Его характерная особенность состоит в том, что один из фазосравниваемых гармонических сигналов используется для формирования круговой развертки на

Рис. 12. Упрощенная схема фазометра с фазовращателем и фазовым детектором

Рис. 13. Функциональная схема цифрового фазометра



экране электронно-лучевой трубки, а другой сигнал преобразуется в остroконечные импульсы, поступающие на управляющий электрод трубки. В результате на экране с помещенной перед ним круговой шкалой можно наблюдать круговую развертку с разрывом, по положению которого относительно верхней точки круговой развертки отсчитывается измеряемый фазовый угол.

Способ круговой развертки обеспечивает измерение разности фаз в пределах от 0 до 360° с погрешностью порядка 2—5°. Из-за невысокой точности измерений, а также из-за неперспективности использования в схемах дальномеров вакуумных электронных приборов отмеченный способ во вновь разрабатываемых радиодальномерах, как правило, не используется.

В 60—70-х годах широкое распространение получил компенсационный метод фазовых измерений, основанный на использовании градуированного фазовращателя, фазового детектора и стрелочного индикатора. Для пояснения взаимодействия перечисленных узлов на рис. 12 приведена упрощенная функциональная схема такого фазометра.

Фазосравниваемые сигналы, сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол $\Delta\varphi$, поступают соответственно на два входа («Вход I» и «Вход II»). Фаза одного из сигналов может при этом в фазометре плавно изменяться с помощью фазовращателя 1, снабженного шкалой, позволяющей отсчитать величину введенной фазовращателем фазовой задержки. Фазовый детектор 2 со стрелочным индикатором 3 выполняют в данной схеме роль регистрирующего устройства, отмечающего тот момент, когда разность фаз на входе фазового детектора достигает вполне определенной величины. При этом отсчет φ_f , снимаемый со шкалы фазовращателя, оказывается однозначно связанным с разностью фаз $\Delta\varphi$ сигналов, поступающих на вход фазометра.

Точность такого компенсационного метода определяется в большинстве случаев точностью работы градуированного фазовращателя. Используемые в дальномерях фазовращатели обеспечивают точность фазовых измерений порядка нескольких десятых долей градуса. Преимущество рассмотренного метода — простота схемы. Недостаток — сравнительно невысокая скорость выполнения измерений.

В последние годы как в свето-, так и в радиодальномерях преимущественное распространение получил цифровой метод фазовых измерений. Для пояснения основных особенностей данного метода рассмотрим функциональную схему, изображенную на рис. 13.

Так же как и в предыдущем случае, два синусоидальных напряжения u_1 и u_2 , между которыми нужно измерить разность фаз, поступают соответственно на «Вход I» и «Вход II». С помощью формирующих устройств эти напряжения преобразуются в остроконечные импульсы, причем на выходах формирующих устройств 1 и 2 импульсы оказываются сдвинутыми во времени на величину Δt , которая однозначно связана с измеряемой разностью фаз соотношением $\Delta\varphi = \omega\Delta t$. Следовательно, для определения значения $\Delta\varphi$ необходимо знать частоту ω подводимых к фазометру напряжений u_1 и u_2 , а также измерить их сдвиг во времени Δt .

Для измерения Δt импульсы с выходов формирующих устройств поступают в датчик интервала времени счета 3, представляющий собой триггер с двумя устойчивыми положениями равновесия, на выходе которого формируется прямоугольное напряжение. Последнее воздействует на электронный ключ, открывая его на время Δt .

В течение этого отрезка времени импульсные сигналы от генератора счетных импульсов 4, состоящего из кварцевого генератора и формирователя импульсов, проходят через электронный ключ 5 и поступают в счетное устройство 6, с помощью которого осуществляется счет импульсов за время Δt с выдачей данных на световое табло. Если частота следования счетных им-

пульсов известна, то значение $\Delta\tau$ легко определяется по показаниям счетного устройства:

$$\Delta\tau = aT_{\text{сч}} = a \frac{1}{f_{\text{сч}}},$$

где a — снимаемый со светового табло отсчет, соответствующий количеству импульсов, поступающих от генератора счетных импульсов за время $\Delta\tau$; $T_{\text{сч}}$ и $f_{\text{сч}}$ — период и частота следования счетных импульсов.

Подбирая частоту $f_{\text{сч}}$, можно легко осуществить градуировку счетного устройства в удобных для эксплуатации единицах. Так, в современных дальномерах градуировка счетчика осуществляется, как правило, непосредственно в единицах длины измеряемого расстояния.

Рассмотренный цифровой метод позволяет выполнять фазовые измерения с высокой степенью точности. При условии, что на вход цифрового фазометра поступают неискаженные синусоидальные сигналы, разность фаз между такими сигналами может быть измерена с относительной точностью $1 \cdot 10^{-4}$ от полного периода, что эквивалентно двум угловым минутам. Наряду с высокой точностью цифровые фазометры обеспечивают также и высокую скорость измерений. К недостаткам цифровых фазометров следует отнести сравнительно сложную электрическую схему, которая в полевых условиях не всегда обеспечивает высокую надежность работы.

Следует заметить, что в большинстве рассмотренных выше методов фазовых измерений стабильность и точность работы фазометров с понижением частоты сигналов, между которыми требуется измерить разность фаз, как правило, повышаются. Однако для обеспечения высокой точности дальномерных измерений частота масштабных колебаний должна быть не менее нескольких мегагерц (см. § 8). Для устранения данного противоречия в современных фазовых дальномерах широкое распространение получил низкочастотный метод фазовых измерений. Для пояснения сущности этого метода рассмотрим схему, приведенную на рис. 14.

Пусть на специальные устройства, называемые смесителями, поступают высокочастотные гармонические колебания с одинаковой частотой, но с различными начальными фазами:

$$u_1 = U_1 \cos(\omega_1 t - \varphi_1);$$

$$u_2 = U_2 \cos(\omega_1 t - \varphi_2).$$

Разность текущих фаз этих колебаний

$$\Delta\psi_{\omega_1} = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (33)$$

Кроме того, подадим на данные смесители колебания от вспомогательного генератора, определяемые уравнением

$$u_0 = U_0 \cos(\omega_2 t - \varphi_0).$$

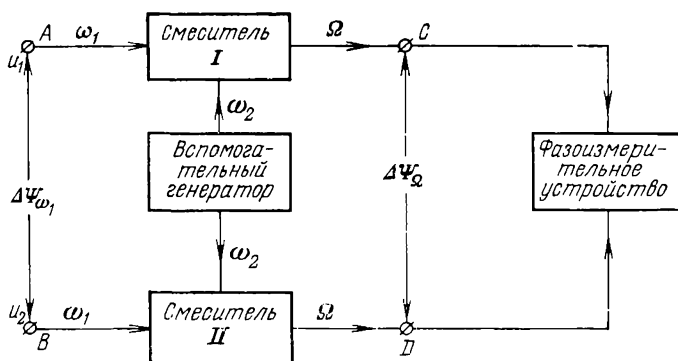


Рис. 14. Схема низкочастотного метода фазовых измерений

Основное назначение смесителя состоит в том, что при подаче на него двух гармонических колебаний с разными частотами на выходе смесителя с помощью соответствующего фильтра представляется возможным выделить колебания разностной частоты. Не прибегая к математическому выводу формулы для этих колебаний, отметим, что их текущая фаза определяется как разность текущих фаз смешиваемых колебаний. При этом в качестве уменьшаемого используется текущая фаза тех колебаний, частота которых выше. Так, если $\omega_2 > \omega_1$, то на выходе смесителя *I* выделяются колебания с текущей фазой

$$\theta_1(t) = \Omega t + \varphi_1 - \varphi_0, \quad (34)$$

где $\Omega = \omega_2 - \omega_1$ — круговая разностная частота.

Соответственно для текущей фазы колебаний на выходе смесителя *II* будем иметь

$$\theta_2(t) = \Omega t + \varphi_2 - \varphi_0. \quad (35)$$

Для разности текущих фаз $\theta_2(t)$ и $\theta_1(t)$ низкочастотных колебаний на выходе смесителей можно написать

$$\Delta\psi_\Omega = \theta_2(t) - \theta_1(t) = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (36)$$

Из сравнения уравнений (33) и (36) следует

$$\Delta\psi_{\omega_1} = \Delta\psi_\Omega, \quad (37)$$

т. е. разность фаз колебаний разностной частоты Ω на выходе смесителей *I* и *II* равна разности фаз высокочастотных колебаний с частотой ω_1 , подаваемых на вход этих смесителей.

Следовательно, используя описанный выше прием, можно определить разность фаз двух высокочастотных колебаний с помощью того или иного фазоизмерительного устройства, работающего на более низкой частоте. Поэтому такой метод измере-

ния разности фаз получил название низкочастотного. Заметим, что измеряемая на низкой частоте разность фаз не зависит от начальной фазы φ_0 вспомогательного генератора, который обычно называют гетеродином.

§ 11. ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫЙ ГЕТЕРОДИННЫЙ МЕТОД

В разработанных за последние годы светодальномерах широкое распространение получили полупроводниковые излучатели, имеющие небольшие габариты и массу в сочетании с малым потреблением электроэнергии. Однако при работе в характерном для фазовых методов непрерывном режиме мощность излучения таких источников сравнительно мала, что существенно ограничивает дальность действия дальномеров. Использование в качестве источников излучения полупроводниковых импульсных лазеров позволяет устранить этот недостаток, но вызывает необходимость применения импульсного метода, с помощью которого трудно обеспечить требуемую высокую точность измерений.

Поиски компромиссных решений привели к разработке импульсно-фазового гетеродинного метода, удачно сочетающего в себе положительные качества фазового и импульсного методов. На рис. 15 приведена схема, поясняющая принцип реализации такого метода в дальномерной технике.

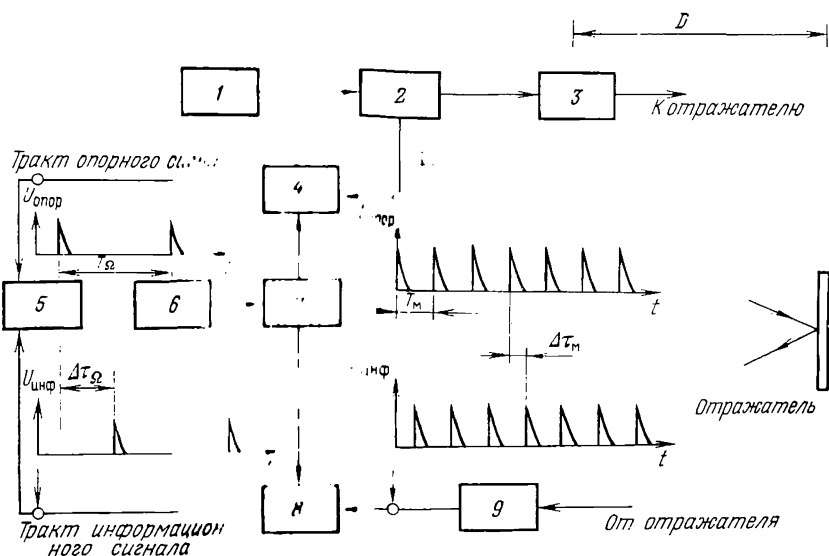


Рис. 15. Упрощенная функциональная схема импульсно-фазового гетеродинного дальномера:

1 — генератор масштабной частоты; 2 и 7 — формирователи импульсов; 3 — импульсный источник излучения; 4 и 8 — схемы совпадения; 5 — электронный цифровой фазометр; 6 — генератор вспомогательной частоты; 9 — фотоприемник

Данная схема является дальнейшим развитием рассмотренного в предыдущем параграфе низкочастотного метода фазовых измерений. Ее отличительные особенности состоят, прежде всего, в том, что гармонические колебания, возбуждаемые генераторами масштабной 1 и вспомогательной 6 частот, преобразуются в остроконечные импульсы с помощью введенных в схему формирователей импульсов 2 и 7. Такое преобразование позволяет реализовать импульсный режим работы источника оптического излучения.

Период повторения излучаемых импульсов T_m связан с масштабной частотой f_m соотношением

$$T_m = 1/f_m. \quad (38)$$

После прохождения удвоенной величины измеряемого расстояния $2D$ эти импульсы отстают во времени относительно опорных импульсных сигналов на величину $\tau = 2D/v$. Поскольку практически получаемое значение τ может значительно превышать период повторения T_m , то, так же как и при фазовых измерениях, возникает неоднозначность определения значения τ , а следовательно, и D , обусловленная тем, что дальномером измеряется запаздывание $\Delta\tau_m$ относительно ближайшего опорного импульса (см. рис. 15). При этом

$$\tau = NT_m + \Delta\tau_m, \quad (39)$$

где N — число полных периодов повторения T_m , которое содержится в величине τ и требуется определить с помощью дополнительных методов.

Для упрощения задачи измерения величины $\Delta\tau_m$ с требуемой точностью в схеме предусмотрено своеобразное «гетеродинирование», т. е. понижение частоты следования импульсных сигналов. Поставленная задача решается за счет использования схем совпадения 4 и 8 и генератора вспомогательной частоты 6 (гетеродина), выполняющих роль смесителей в сочетании с гетеродином в рассмотренном выше низкочастотном фазовом методе. Период повторения гетеродинных импульсов T_g выбирается таким, чтобы он отличался от периода повторения масштабных импульсов T_m на небольшую величину.

Импульсные сигналы на выходах схем совпадения появляются только в случае совпадения во времени импульсов, поступающих от масштабного генератора и гетеродина. При этом, так же как для низкочастотного фазового метода, частота повторения F импульсных сигналов на выходах схем совпадения определяется формулой

$$F = f_m - f_g \quad (\text{при } f_m > f_g). \quad (40)$$

Учитывая, что

$$F = 1/T_\Omega, \quad f_m = 1/T_m, \quad f_g = 1/T_g,$$

имеем

$$T_{\Omega} = \frac{T_{\text{м}} T_{\Gamma}}{T_{\Gamma} - T_{\text{м}}}, \quad (41)$$

где через T_{Ω} обозначен период повторения импульсов на выходах схем совпадения.

Как показано на рис. 15, информационный импульсный сигнал на выходе схемы совпадения 8 запаздывает относительно опорного сигнала на величину $\Delta\tau_{\Omega}$, которую измеряют электронным цифровым фазометром 5. Для того чтобы установить взаимосвязь отмеченной величины $\Delta\tau_{\Omega}$ со значением измеряемого расстояния D , используем выведенное в предыдущем параграфе соотношение (37), согласно которому при преобразовании с помощью гетеродина частоты информационного и опорного сигналов разность фаз низкочастотных сигналов на выходах смесителей равна разности фаз высокочастотных сигналов на входах смесителей, т. е.

$$\Delta\varphi_{\text{м}} = \Delta\varphi_{\Omega}, \quad (42)$$

где $\Delta\varphi_{\text{м}}$ и $\Delta\varphi_{\Omega}$ — разность фаз между информационным и опорным сигналами соответственно на входах и выходах смесителей.

Применительно к рассматриваемой схеме, где эквивалентные разности фаз могут быть выражены как

$$\Delta\varphi_{\text{м}} = 2\pi f_{\text{м}} \Delta\tau_{\text{м}}; \quad \Delta\varphi_{\Omega} = 2\pi F \Delta\tau_{\Omega},$$

величина запаздывания $\Delta\tau_{\Omega}$ оказывается связанной со значением $\Delta\tau_{\text{м}}$ соотношением

$$\Delta\tau_{\Omega} = \frac{f_{\text{м}}}{F} \Delta\tau_{\text{м}}. \quad (43)$$

При этом формула (2а) для определения значения искомого расстояния D принимает вид

$$D = \frac{v}{2} \left(NT_{\text{м}} + \frac{F}{f_{\text{м}}} \Delta\tau_{\Omega} \right). \quad (44)$$

Из анализа формулы (44) нетрудно установить, что погрешность в величине измеряемого расстояния D , обусловленная неточностью определения значения $\Delta\tau_{\Omega}$, зависит от отношения $F/f_{\text{м}}$. В реальных схемах дальномеров это отношение оценивается величинами порядка $10^{-3} \div 10^{-4}$, в результате чего требования к обеспечению стабильности величины $\Delta\tau_{\Omega}$ в сравнении с величиной $\Delta\tau_{\text{м}}$ снижаются в $10^3 \div 10^4$ раз. При этом во столько же раз может быть уменьшена частота повторения счетных импульсов в электронном цифровом фазометре при условии сохранения разрешающей способности дальномеров на прежнем уровне, соответствующем отсутствию преобразования частоты повторения импульсных сигналов.

В рассматриваемой схеме путем подбора периода повторения T_r импульсов вспомогательного генератора имеется возможность регулировать период повторения T_0 низкочастотных импульсов и тем самым регулировать соотношение между реально наблюдаемыми параметрами прибора, характеризующими стабильность и быстродействие работы отдельных узлов, и допусками на эти параметры.

Поскольку требования к стабильности временных задержек при прохождении информационных сигналов до входа в схему совпадения и после выхода из нее различны, то место расположения схемы совпадения в тракте прохождения информационного сигнала безразлично. Так как значительно более жесткие требования предъявляются к сигналам с периодом следования T_m , то схема совпадения должна быть размещена по возможности ближе к входу приемного устройства дальномера.

Что касается тракта прохождения опорного сигнала, то в нем имеется возможность использовать как импульсные, так и непрерывные гармонические сигналы. Для реализации последнего варианта достаточно в рассматриваемой схеме (см. рис. 15) вместо верхней схемы совпадения 4 использовать смесительный каскад, на который следует подать гармонические сигналы непосредственно от генераторов масштабной 1 и вспомогательной 6 частот, минуя формирователи импульсов 2 и 7. Требуемые для работы электронного цифрового фазометра 5 импульсные опорные сигналы могут быть сформированы непосредственно у входа в данный фазометр.

Более детальный анализ схемы, приведенной на рис. 15, свидетельствует о том, что в тех случаях, когда в схему совпадения поступают импульсные сигналы сравнительно большой длительности, то условия совпадения во времени основного и вспомогательного импульсов выполняются одновременно для целой серии последовательных импульсов, в результате чего длительность импульсов на выходе схемы совпадения становится во много раз больше, чем длительность импульсов, поступающих на входы схем совпадения. Чрезмерное увеличение отмеченной длительности импульсов, поступающих на вход фазометра, может привести к понижению точности дальномерных измерений. В связи с этим целесообразно с помощью формирователей импульсов формировать сигналы по возможности малой длительности.

§ 12. МЕТОДЫ РАЗРЕШЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СВЕТО- И РАДИОДАЛЬНОМЕРАХ

При фазовых и импульсно-фазовых измерениях на одной масштабной частоте не удастся в большинстве случаев обеспечить получение однозначного значения искомой длины линии. Это связано с тем, что фазовый угол или временное запаздывание,

обусловленные временем прохождения сигналом удвоенного значения искомого расстояния, могут существенно превышать величину периода масштабных колебаний, в то время как фазоизмерительные устройства способны измерять отмеченные параметры только в пределах одного периода. Поэтому при вычислении значения D используется рабочая формула в виде соотношения

$$D = (N + \Delta N) \frac{\lambda}{2} = \left(N + \frac{\Delta \varphi}{2\pi} \right) \frac{v}{2f}. \quad (45)$$

Процесс разрешения неоднозначности сводится к нахождению неизвестной величины N , которая соответствует целому числу полных периодов масштабных колебаний, укладывающихся в величину τ , представляющей собой время прохождения информационным сигналом искомого расстояния в прямом и обратном направлениях.

В геодезических фазовых свето- и радиодальномерах используют несколько различных методов разрешения неоднозначности. При этом некоторые из них требуют не только проведения значительного количества дополнительных измерений, но и последующих вычислений величины N . Другие разновидности таких методов позволяют автоматизировать весь процесс разрешения неоднозначности, в результате чего с отсчетного устройства дальномера можно сразу снять полное значение измеряемого расстояния.

В связи с вышеизложенным в настоящем параграфе рассмотрены принципиальные особенности основных методов нахождения величины N или непосредственно полной длины измеряемой линии.

Один из методов разрешения неоднозначности, получивший достаточно широкое распространение в 50—60-х годах, но применяемый в отдельных типах дальномеров и в настоящее время, основан на использовании плавного изменения масштабной частоты в заданном диапазоне. Поскольку при изменении величины f изменяется в соответствии с формулой (45) и значение определяемой разности фаз, то на определенной частоте f_1 можно добиться того, чтобы $\Delta \varphi = 0$. При этом

$$D = N \frac{v}{2f_1} = N \frac{\lambda_1}{2}. \quad (46)$$

Для нахождения числа N будем продолжать изменять масштабную частоту (например, в сторону ее повышения). Если масштабная частота увеличивается, то длина волны колебаний, определяющих длину используемого нами «метра», уменьшается. Очередное выполнение условия $\Delta \varphi = 0$ будет наблюдаться тогда, когда в измеряемом расстоянии уложится на одну половину длины волны больше, т. е.

$$D = (N + 1) \frac{v}{2f_2} = (N + 1) \frac{\lambda_2}{2}. \quad (47)$$

Из совместного решения уравнений (46)) и (47) относительно N получим

$$N = f_1 / (f_2 - f_1). \quad (48)$$

Если подставить данное значение N в формулу (46), то последняя при этом принимает вид

$$D = \frac{v}{2(f_2 - f_1)}. \quad (49)$$

Полученная формула свидетельствует о том, что при регистрации двух соседних отсчетов фазометра, соответствующих $\Delta\varphi = 0$, и измерении масштабных частот f_1 и f_2 , вообще не возникает проблемы определения величины N . Физически это означает, что измерение на двух сравнительно высоких частотах f_1 и f_2 и последующее использование разности результатов этих измерений эквивалентно измерению на сравнительно низкой, разностной частоте $F = f_2 - f_1$, причем в измеряемом расстоянии D укладывается всего одна полуволна, соответствующая разностной частоте F , т. е. $\lambda_F = v/F$.

Принципиальный недостаток рассмотренного метода состоит в том, что при непосредственном использовании формулы (49) для вычисления значения D резко уменьшается точность определения этой величины. Действительно, для вычисления расстояния D по формуле (46) с погрешностью $(2 \div 5) 10^{-5}$ возникает необходимость измерения масштабных частот с погрешностью $1 \cdot 10^{-6}$. Если, например, в дальномере используется масштабная частота, равная 10 МГц, то указанная относительная погрешность соответствует абсолютной погрешности, равной ± 10 Гц. При измерениях на частотах f_1 и f_2 возможны случаи, когда погрешности их определения будут иметь противоположные знаки. Разностная частота $F = f_2 - f_1$ будет при этом определена с погрешностью ± 20 Гц, причем само значение F имеет сравнительно небольшую величину, которая в соответствии с формулой (49) зависит от величины измеряемого расстояния D . Так, при $D = 15$ км значение F оказывается равным 10 кГц. Если абсолютная погрешность данной величины равна ± 20 Гц, то соответствующая ей относительная погрешность равна $2 \cdot 10^{-3}$. Следовательно, и точность определения величины D по формуле (49) будет оцениваться отмеченной погрешностью.

Для преодоления указанного недостатка при использовании метода плавного изменения масштабной частоты регистрируют не соседние нулевые значения фазометра, а отстоящие друг от друга на целое число n . В этом случае формула (47) принимает вид

$$D = (N + n) \frac{v}{2f_2}, \quad (50)$$

а величину N находят по формуле

$$N = n \frac{f_1}{f_2 - f_1}. \quad (51)$$

Значение n в дальномерах с плавным изменением масштабной частоты определяется обычно непосредственным счетом числа нулевых значений измеряемой разности фаз, которые наблюдаются при изменении масштабной частоты в диапазоне от f_1 до f_2 .

Для исключения возможности неправильного разрешения неоднозначности, что при оценке точности результатов измерений эквивалентно промахам, вычисления ведут поэтапно. Вначале по формуле (51) определяют величину N , используя при этом то важное свойство данного числа, что оно целое, т. е. округляют полученное по формуле (51) значение N до ближайшего целого числа. Затем округленную величину N используют для вычисления расстояния D по формулам (46) или (50).

Другой метод разрешения неоднозначности, получивший более широкое распространение в современных фазовых дальномерах, основан на использовании нескольких фиксированных масштабных частот. Для пояснения принципиальных особенностей данного метода рассмотрим следующий пример.

Предположим, что в дальномере имеется три масштабные частоты: основная f и две вспомогательные f' и f'' , которые связаны между собой соотношениями

$$f = 10f' = 100f''. \quad (52)$$

Если на этих частотах последовательно производить измерения расстояния D , то для каждой из них справедлива рабочая формула (22), т. е.

$$\left. \begin{aligned} D &= (N + \Delta N) \frac{\lambda}{2} \\ D &= (N' + \Delta N') \frac{\lambda'}{2} \\ D &= (N'' + \Delta N'') \frac{\lambda''}{2} \end{aligned} \right\}, \quad (53)$$

где $\lambda = v/f$ — длина волны, соответствующая основной масштабной частоте f ; $\lambda' = v/f' = 10\lambda$ и $\lambda'' = v/f'' = 100\lambda$ — длины волн, соответствующие вспомогательным частотам f' и f'' .

В современных дальномерах очень часто выбирают основную масштабную частоту так, чтобы соответствующая ей полуволна

равнялась 1, 10 или 100 м. Пусть для определенности в нашем случае $\lambda/2=10$ м (при этом $f \approx 15$ МГц). Тогда значения $\lambda'/2$ и $\lambda''/2$ соответственно равны 100 и 1000 м.

Применительно к данному примеру величины N , N' и N'' представляют собой соответственно количество десяти-, сто- и тысячеметровых отрезков, укладываемых в измеряемой длине D , а ΔN , $\Delta N'$ и $\Delta N''$ — измеряемые фазометром дополнения к целочисленным значениям $N \frac{\lambda}{2}$, $N' \frac{\lambda'}{2}$ и $N'' \frac{\lambda''}{2}$ до конкретной интересующей нас величины D .

Поскольку левые части уравнений (53) равны, а правые умножаются соответственно на 10, 100 и 1000, то для каждого последующего уравнения в системе (53) запятая в величинах $N+\Delta N$, $N'+\Delta N'$ и $N''+\Delta N''$ сдвигается влево на один разряд, причем количество десятичных знаков в этих величинах, определяемых точностью выбранного фазометра, остается неизменным. Так, например, если измеряется линия длиной 675,34 м, то уравнения (53) будут иметь следующий числовой вид:

$$\left. \begin{aligned} D &= (\underline{67} + 0,534) 10 = \underline{675},34 \text{ м} \\ D &= (\underline{6} + 0,753) 100 = \underline{675},3 \text{ м} \\ D &= (0 + 0,675) 1000 = 675 \text{ м} \end{aligned} \right\}. \quad (54)$$

Подчеркнутые цифры в первом и втором числовых соотношениях, соответствующих использованию частот f и f' , являются неизвестными.

Рассматривая соотношения (54), нетрудно установить, что при понижении масштабной частоты (или эквивалентном увеличении длины волны) уменьшается точность измерения дальности D , но при этом открывается возможность получения дополнительной информации о первых цифрах в искомой величине D .

Если во всем диапазоне измеряемых дальностей выполняется условие $D \leq \lambda''/2$, то $N''=0$, т. е. неоднозначность разрешается целиком. В противном случае информацию о первых цифрах в значении D необходимо иметь из каких-либо других источников или использовать более низкие масштабные частоты, на которых выполняется упомянутое выше условие. Например, при измерении линии длиной 3624,75 м с использованием сетки частот, указанной в разобранный примере, необходимо предварительно знать количество единиц километров в искомой длине линии.

Произведенный выше подбор масштабных частот позволяет использовать удобную форму разрешения неоднозначности, не прибегая к применению каких-либо вычислительных устройств.

Из примера (54) непосредственно следует, что величины ΔN

связаны с отсчетами a , считываемыми со шкалы фазометра и проградуированными в единицах длины, соотношениями:

$$a = \Delta N \frac{\lambda}{2}; \quad a' = \Delta N' \frac{\lambda'}{2}; \quad a'' = \Delta N'' \frac{\lambda''}{2}.$$

Если шкала фазометра имеет 1000 делений, а величины $\lambda/2$, $\lambda'/2$ и $\lambda''/2$ выбраны соответственно равными 10, 100 и 1000 м, то цена одного деления шкалы при переходе с одной масштабной частоты на другую оказывается соответственно равной 1 см, 10 см и 1 м, т. е. масштаб шкалы изменяется последовательно в 10 раз.

Пусть, например, при измерении линии на частотах f'' , f' и f получены отсчеты: $a''=675$, $a'=753$ и $a=534$. Данные отсчеты с учетом вышеизложенного записывают в следующем виде:

$$\begin{array}{r} a'' = 675 \\ a' = 753 \\ a = 534 \\ \hline D_{\text{полн}} = 67534 \text{ см} = 675,34 \text{ м.} \end{array} \quad (55)$$

Из этого примера видно, что для получения полного значения длины измеряемой линии $D_{\text{полн}}$ необходимо произвести сравнение соответствующих разрядов в снятых с фазометра отсчетах с учетом отмеченного выше сдвига этих разрядов. При этом следует обратить внимание на тот факт, что из-за влияния различных источников погрешностей измерений достоверность отдельных цифр в значениях a'' , a' и a неодинакова (она понижается при переходе от более старшего разряда к младшему). Поэтому для надежного разрешения неоднозначности используют только наиболее достоверные цифры.

Анализ достоверности отдельных цифр основан на том положении, что при соотношении применяемых масштабных частот, различающихся в 10 раз, цифра более старшего разряда того отсчета, который в приведенном примере (55) записан ниже, должна соответствовать цифре, сдвинутой вправо на один разряд в отсчете, расположенном на одну строку выше. Для пояснения вышеизложенного рассмотрим пример.

Пусть в процессе измерения линии на масштабных частотах f'' , f' и f получены следующие отсчеты:

$$\begin{array}{r} a'' = 559 \\ a' = 602 \\ a = 935 \\ \hline D_{\text{полн}} = 55935 \text{ см} = 559,35 \text{ м.} \end{array} \quad (56)$$

Поскольку цифра старшего разряда отсчета a должна соответствовать цифре второго разряда отсчета a' , из которых первая является более достоверной, то отсчет a' должен быть от-

корректирован так, чтобы цифра второго разряда в нем равнялась 9, т. е. две первые цифры в отсчете a' должны соответствовать 59 или 69. В полученном из измерений отсчете a' первые две цифры равны 60, что ближе к откорректированному отсчету, у которого первые цифры равны 59. Поэтому при установлении значения $D_{\text{полн}}$ цифра второго разряда в нем принята равной 5, а не 6.

Из рассмотренного примера следует, что в тех случаях, когда вторая цифра вышерасположенного отсчета отличается от первой цифры нижерасположенного отсчета на 5 единиц, уверенно разрешить неоднозначность не представляется возможным.

При автоматизации процесса разрешения неоднозначности возникает необходимость установления аналитической зависимости между $D_{\text{полн}}$ и полученными из измерений отсчетами. С этой целью каждый трехзначный отсчет может быть представлен в виде $100b + 10c + d$, где b , c и d — цифры соответствующих разрядов. Если учесть, что для выбранной выше сетки масштабных частот переход от отсчета a к отсчету a' (и соответственно от отсчета a' к отсчету a'') сопровождается умножением на 10, то уравнение для $D_{\text{полн}}$ может быть записано в следующем виде:

$$D_{\text{полн}} = 10^4 b'' + 10^3 b' + 10^2 b + 10c + d, \quad (57)$$

где b'' и b' — цифры старшего разряда в отсчетах a'' и a' .

На основе использования такого подхода к разрешению неоднозначности нетрудно автоматизировать процесс получения полного значения искомой длины линии. С этой целью рассмотрим упрощенную функциональную схему дальномера, приведенную на рис. 16.

Особенность работы такой схемы состоит в том, что измерения последовательно выполняют на автоматически переключаемых частотах f'' , f' и f . Одновременно с переключением этих частот к выходу цифрового фазометра автоматическое подключение различные декады счетчика электрических импульсов.

Применительно к рассматриваемой схеме на частоте f'' к фазометру подключается только один старший разряд счетчика, на котором фиксируется количество десятых долей периода, соответствующего частоте f'' , т. е. первая цифра в отсчете a'' . На частоте f' к выходу фазометра подключается соседний по старшинству справа разряд счетчика, на котором соответственно фиксируется цифра старшего разряда отсчета a' . И наконец, на основной масштабной частоте f к фазометру подключаются последовательно соединенные младшие разряды счетчика, с помощью которых фиксируется полное значение отсчета a с точностью до той цифры, которая обеспечивается точностью работы всего дальномера.

Необходимость выполнения описанного выше анализа достоверности отдельных цифр в используемых отсчетах сущест-

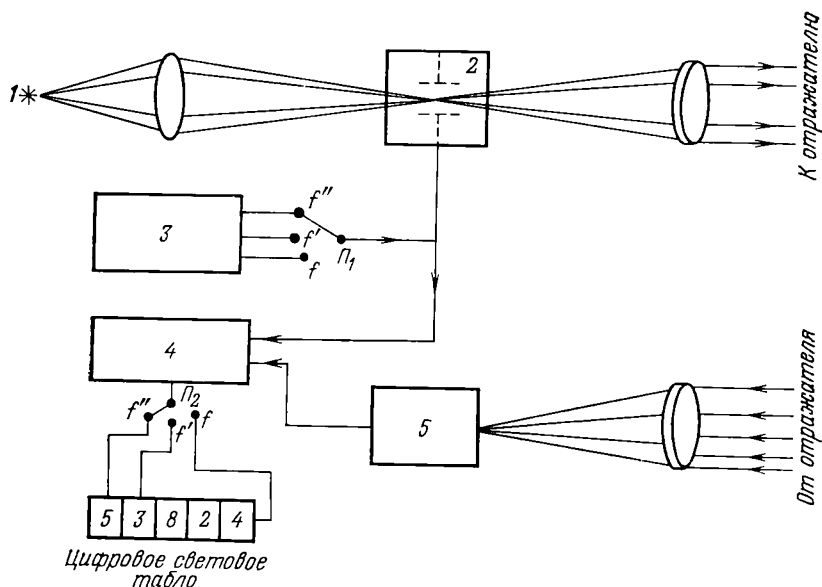


Рис. 16. Упрощенная функциональная схема дальномера с автоматическим получением значения измеряемого расстояния:

1 — источник света; 2 — модулятор света; 3 — генератор масштабных частот; 4 — электронный цифровой фазометр; 5 — фотоприемник; Π_1 и Π_2 — автоматические переключатели

венно осложняет методику автоматизированного нахождения величины $D_{\text{полн}}$ и, как следствие, схему практической реализации процесса разрешения неоднозначности величины измеряемого расстояния.

Степень последовательного понижения масштабных частот получила в дальномерной технике название коэффициента неоднозначности:

$$k_1 = f/f', \quad k_2 = f'/f'' \quad (58)$$

Наиболее надежно неоднозначность разрешается при равных ступенях такого понижения, т. е. при $k_1 = k_2 = k$, причем в современных дальномерах для упрощения вычисления $D_{\text{полн}}$ как в ручном, так и в автоматизированном режимах чаще всего используют величину k , равную 10.

Чем больше значение коэффициента k , тем меньшее количество масштабных частот необходимо для разрешения неоднозначности, но при этом предъявляются более высокие требования к точности фазовых измерений на вспомогательных масштабных частотах.

Количество необходимых вспомогательных частот зависит не только от приборной точности дальномера, но и от того, с какой точностью заранее известна нам измеряемая величина рас-

стояния. В рассмотренном выше примере было сделано предположение, заключающееся в том, что значение $D_{\text{прибл}}$ предварительно известно нам с точностью до нескольких сотен метров. Если же приближенная величина дальности известна с точностью выше, чем $\lambda/2$, то в дальномере вообще можно не использовать вспомогательные масштабные частоты. И наоборот, при измерениях линий значительной протяженности (десятки и сотни километров) и отсутствии какой-либо предварительной информации о значениях их длин возникает необходимость увеличения числа масштабных частот, которое в отдельных типах дальномеров доходит до пяти.

Технически не всегда удобно использовать в дальномере сетку масштабных частот, в которой данные частоты значительно отличаются друг от друга по своим номинальным значениям. Для устранения такого неудобства используют свойство фазовых измерений, когда разность отсчетов на двух близко расположенных масштабных частотах равна отсчету на более низкой масштабной частоте, соответствующей разности этих масштабных частот. Действительно, непосредственно из формулы (7а) имеем

$$\varphi_1 = 2\pi f_1 \frac{2D}{v}; \quad (59)$$

$$\varphi_2 = 2\pi f_2 \frac{2D}{v}.$$

Откуда

$$\varphi_{1-2} = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi (f_1 - f_2) \frac{2D}{v}. \quad (60)$$

Следовательно, в дальномере вместо сетки частот $f = 10f' = 100f''$ может быть использована эквивалентная сетка со следующими соотношениями:

$$f = 10(f - f_1) = 100(f - f_2), \quad (61)$$

т. е. применительно к рассмотренному выше примеру вместо частот $f = 15$ МГц, $f' = 1,5$ МГц и $f'' = 150$ кГц могут быть использованы частоты $f = 15$ МГц, $f_1 = 13,5$ МГц и $f_2 = 14,85$ МГц, причем в последнем случае используемые при разрешении неоднозначности отсчеты a'' и a' получают из разности отсчетов соответственно на частотах f и f_2 , а также f и f_1 .

§ 13. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ ДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Как уже отмечалось выше, измерение дальностей с использованием описанных фазовых или импульсных методов неизбежно связано с передачей электромагнитных излучений с одного

конца искомой длины линии на другой. При этом внешняя среда, и в частности атмосфера, оказывает существенное влияние на закономерность распространения используемых излучений. В зависимости от состояния атмосферы на пути прохождения электромагнитных волн в отдельных случаях может наблюдаться не только существенное понижение точности линейных измерений, но и полное нарушение работоспособности дальномерных систем.

В связи с вышеизложенным рассмотрим основные проблемы, связанные с влиянием атмосферы на дальномерные измерения, причем основное внимание уделим особенностям прохождения электромагнитных волн вблизи земной поверхности на линиях небольшой протяженности, ограниченной пределами прямой видимости, т. е. тем условием, в которых наиболее часто работают геодезические свето- и радиодальномеры.

Одним из важных параметров, оказывающим существенное влияние на работоспособность любой дальномерной системы, является прозрачность атмосферы для выбранного участка диапазона электромагнитных волн. Количественно этот параметр оценивается коэффициентом пропускания или обратным ему по смыслу коэффициентом ослабления. Последний параметр характеризует относительное уменьшение интенсивности излучения, выраженное в логарифмических единицах и отнесенное к единице длины пройденного пути (обычно к 1 км). Величина коэффициента ослабления определяется как поглощающими, так и рассеивающими свойствами атмосферы и зависит от ее состояния (и прежде всего от наличия в ней водяных паров, пыли и других примесей), а также от длины волны используемого излучения.

Для оптического диапазона хорошим критерием оценки степени прозрачности атмосферы может служить дальность видимости, оцениваемая визуально. Приближенная зависимость коэффициента ослабления σ от длины волны λ несущих колебаний приведена на рис. 17. При построении данных кривых поглощение, обусловленное влиянием водяных паров и углекислого газа, не учитывалось.

Из общей тенденции изменения этих кривых нетрудно заметить, что при переходе от коротковолнового участка оптического диапазона к длинноволновому затухание, вносимое атмосферой, уменьшается. Поэтому для повышения дальности действия дальномеров стремятся во многих случаях использовать излучения с длинами волн, лежащими в красной или инфракрасной частях оптического спектра. На рис. 17 указаны участки длин волн: *A* — арсенид-галлиевого излучателя, *Г* — гелий-неонового лазера, *B* — видимого спектра.

Для оценки влияния влажности воздуха на дальность действия светодальномеров на рис. 18 приведен график, характеризующий общую тенденцию изменений пропускания атмосферы

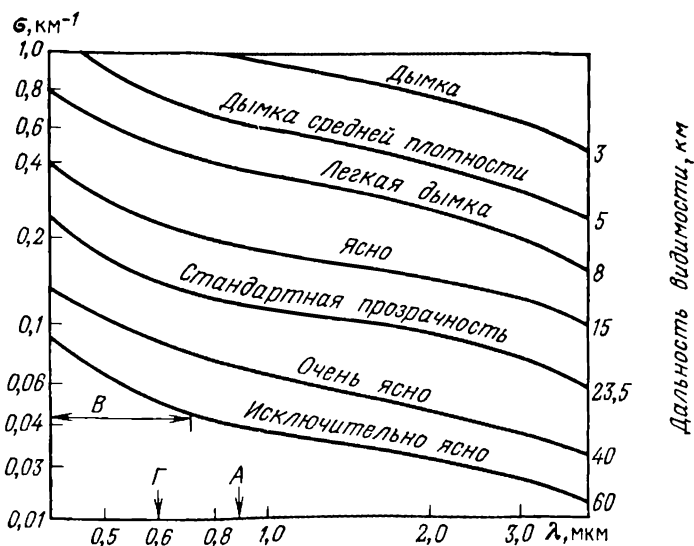


Рис. 17. График зависимости коэффициента ослабления сухого воздуха от длины волны при различных условиях видимости

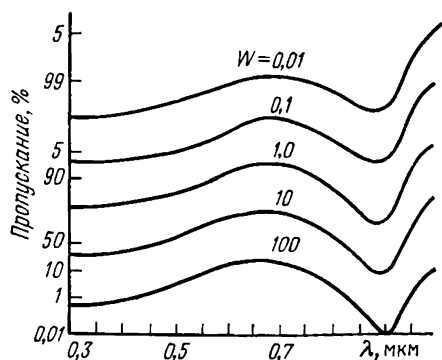


Рис. 18. График зависимости пропускания атмосферы от длины волны при различном содержании водяных паров

от содержания водяных паров в интервале длин волн от 0,3 до 1,0 мкм на уровне моря. Из графика видно, что для уменьшения влияния влажности воздуха W (выраженной в см через толщину слоя осажденного водяного пара на уровне моря) на дальность действия дальномеров целесообразно выбирать излучения с длиной волны около 0,7 мкм . Диапазон длин волн вблизи 0,9 мкм наиболее сильно подвержен такому влиянию. Однако в тех случаях, когда используются излучатели с очень узким частотным спектром, то в диапазоне около 0,9 мкм можно существенно ослабить это влияние при работе в пределах так называемых «окон прозрачности».

Дело в том, что при более детальном изучении спектральных свойств атмосферы зависимость прозрачности ее от длины волны носит более сложный характер, чем указано на рис. 17 и 18. Это обусловлено влиянием многочисленных молекулярных ре-

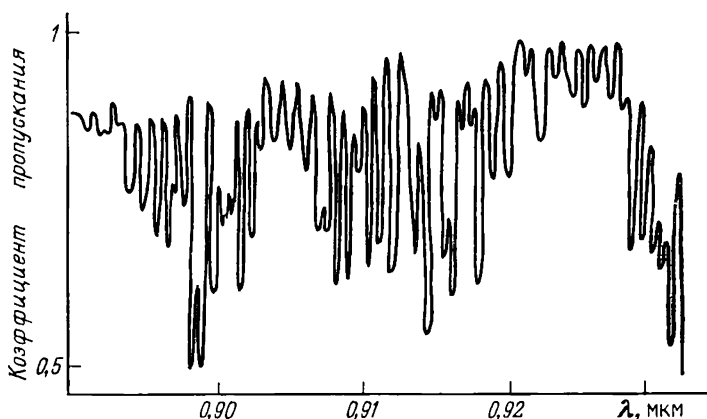


Рис. 19. График зависимости коэффициента пропускания атмосферы от длины волны, полученной с помощью высокоразрешающих анализаторов спектра

зонансов различных газовых компонентов, входящих в состав атмосферы.

При работе в зоне действия таких резонансов, которые наблюдаются на вполне определенных дискретных частотах, поглощение излучаемой электромагнитной энергии резко возрастает. Для иллюстрации на рис. 19 приведена зависимость изменения коэффициента пропускания атмосферы для интервала длин волн от 0,89 до 0,93 мкм, полученная с помощью высокоразрешающих анализаторов спектра. На тех участках спектра, где наблюдается резкое возрастание поглощающих свойств атмосферы (линии поглощения), дальность действия дальномеров существенно уменьшается. На участках, заключенных между упомянутыми линиями поглощения, влияние атмосферы на дальность действия дальномеров проявляется значительно меньше. Поэтому при выборе рабочего диапазона несущих частот для светодальномеров предпочтение отдают последним участкам, которые получили название «окон прозрачности».

Однако даже при принятии необходимых мер, направленных на оптимальный выбор рабочих участков оптического диапазона и применение соответствующих этим участкам источников излучения, светодальномеры оказываются мало пригодными для выполнения линейных измерений на местности при наличии густого тумана, дыма, сильной запыленности воздуха и при других неблагоприятных состояниях атмосферы на пути прохождения луча света. Поэтому при работе в таких условиях предпочтение отдают радиодальномерам. В этой связи проанализируем ослабляющие свойства атмосферы для радиоволн УКВ диапазона, которые наиболее широко используются в современных высокоточных геодезических радиодальномерах.

Таблица 2

Длина волны, см		23	10	3	1,25	0,86
Частота, соответствующая данной длине волны, ГГц		1,3	3	10	24	35
Затухание радиоволн в атмосфере	В децибелах на 1 км	0,005	0,007	0,01	0,25	0,1
	В процентах на 1 км	0,11	0,16	0,23	5,9	2,3

Так же как и для волн оптического диапазона, общее затухание радиоволн УКВ диапазона на пути их распространения обусловлено как поглощающими свойствами газов, входящих в состав атмосферы, так и рассеянием на неоднородностях. Для количественной оценки ослабления радиоволн из-за влияния атмосферы в табл. 2 приведены экспериментальные данные, характеризующие затухание различных длин волн, отнесенное к 1 км.

Из данной таблицы видно, что с уменьшением длины волны (что эквивалентно увеличению частоты) затухание радиоизлучений УКВ диапазона растет. Существенное увеличение затухания на длине волны 1,25 см обусловлено тем, что эта длина волны находится вблизи от одной из резонансных линий поглощения водяных паров ($\lambda_p = 1,35$ см). При увеличении влажности воздуха, а особенно при выпадении осадков отмеченный рост затухания с увеличением частоты становится еще более контрастным. Однако на основании приведенных данных преждевременно делать вывод о том, что для увеличения дальности действия радиодальномеров необходимо стремиться к использованию длинноволновой части УКВ диапазона. Дело в том, что при одинаковых размерах применяемых в дальномерах зеркальных антенн по мере уменьшения длины волны излучаемый пучок становится более узким, благодаря чему плотность энергии, проходящейся на единицу площади поперечного сечения этого пучка, в главном направлении излучения возрастает. Это, в свою очередь, способствует увеличению дальности действия радиодальномера.

Для оценки изменения максимальной дальности действия в зависимости от длины волны и условий погоды с учетом отмеченного выше изменения диаграммы направленности антенных устройств на рис. 20 приведено семейство кривых, построенных в предположении, что с изменением несущей частоты размеры антенной системы остаются постоянными.

Поскольку дальность действия дальномера зависит не только от условий прохождения радиоволн и направленных свойств

используемых антенн, но также от мощности передатчика и чувствительности приемника, то при построении графика предполагалось, что параметры приемопередатчиков таковы, что на длине волны $\lambda = 3$ см при благоприятных погодных условиях максимальная дальность действия радиодальномера равна 100 км.

Из приведенного графика видно, что в длинноволновой части указанного участка УКВ диапазона ($\lambda \approx 10$ см) максимальная дальность действия радиодальномера в зависимости от условий погоды изменяется в небольших пределах. По мере укорочения длины волны эти пределы изменений резко растут. Что же касается самих значений максимальной дальности действия, то при благоприятных условиях погоды, включая наличие небольшого дождя и умеренного тумана, заметный выигрыш в дальности наблюдается при использовании радиоволн с частотами 10—20 ГГц. Поэтому при решении вопроса о выборе оптимальной длины волны для высокоточных радиодальномеров предпочтение во многих случаях отдадут трехсантиметровому диапазону радиоволн.

Наряду с ограничениями, связанными с влиянием внешней среды на дальность действия рассматриваемых приборов, атмосфера оказывает существенное влияние и на точность измерений свето- и радиодальномерами. В этой связи проанализируем вначале влияние атмосферы на траекторию распространения электромагнитных волн.

В соответствии с требованиями, сформулированными в § 2, используемые при дальномерных измерениях излучения должны распространяться по известной, интересующей нас траектории. Наиболее полно этим требованиям отвечает траектория в виде прямолинейного отрезка, соединяющего конечные пункты измеряемого расстояния. Рассмотрим, насколько полно выполняются эти требования в реальных условиях.

Физические закономерности распространения электромагнитных волн в той или иной среде базируются на хорошо известном принципе Ферма. Согласно этому принципу электромагнитные волны распространяются в пространстве по такому пути, на прохождение которого затрачивается наименьшее время. В однородной среде такому условию соответствует прямолинейное распространение электромагнитных волн. К сожалению, приземный слой атмосферы представляет собой неоднородную среду, что

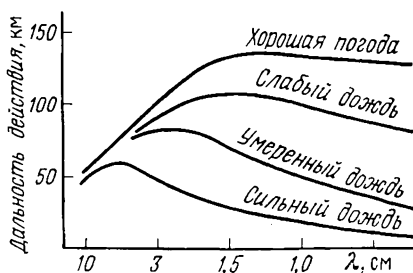


Рис. 20. График зависимости дальности действия радиодальномера от несущей длины волны при различных условиях погоды

обуславливает искривление интересующей нас траектории. При этом наибольшие искривления связаны с изменениями плотности воздуха с высотой.

На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что для большинства реально наблюдаемых метеорологических условий траекторию распространения электромагнитных волн оптического и УКВ диапазонов можно отождествить с дугой окружности, радиус которой примерно в четыре раза больше радиуса Земли. Поправка за искривление траектории электромагнитных волн может быть определена при этом по формуле

$$\Delta D = \frac{D^3}{24r^2}, \quad (62)$$

где D — величина измеряемого расстояния; r — средний радиус кривизны траектории используемого излучения.

Если принять $r = 25\,000$ км, то поправка ΔD на линии длиной 50 км составит величину 0,8 см, а на линии длиной 100 км — 7 см (или в относительной мере, соответственно, $0,16 \cdot 10^{-6}$ и $0,7 \cdot 10^{-6}$). Приведенные значения поправок за кривизну свидетельствуют о том, что на расстояниях до 100 км с их влиянием в большинстве случаев можно не считаться. Но при точном измерении более длинных линий упомянутые поправки приходится принимать в расчет.

Другим фактором, связанным с внешней средой и оказывающим большое влияние на точность измерений, является непостоянство скорости распространения электромагнитных волн в атмосфере. Этот фактор в общем комплексе вопросов обеспечения высокой точности измерений играет ведущую роль. Поэтому проблемы, связанные с определением скорости электромагнитных волн в приземных слоях атмосферы, рассмотрены в следующем параграфе более подробно.

§ 14. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

При всех косвенных методах определения длин линий, основанных на измерении времени прохождения электромагнитных волн, необходимо в момент выполнения измерений знать скорость распространения этих волн. Однако отмеченная скорость сохраняет свое постоянное значение только в вакууме. В реальной среде скорость электромагнитных волн зависит как от состояния атмосферы (температуры, давления и влажности воздуха), так и от длины волны используемых излучений. В этой связи рассмотрим основные методы определения интересующей нас скорости, которые нашли применение в дальномерной технике.

Следует заметить, что проблема определения скорости электромагнитных волн на протяжении нескольких сотен лет вызвала повышенный интерес у многих ученых различных стран мира. При этом многочисленные экспериментальные исследова-

ния были направлены прежде всего на получение наиболее точного значения этой важнейшей физической константы. Значительные успехи в данной области достигнуты за последние 15—20 лет. На основе прямых измерений длины волны оптических излучений и соответствующей ей частоты получено следующее значение скорости света в вакууме: $c = 299\,792\,458 \pm 1,2$ м/с. Это значение, характеризуемое относительной погрешностью $4 \cdot 10^{-9}$, принято в настоящее время как международное.

При распространении электромагнитных излучений в той или иной материальной среде (и, в частности, в атмосфере) приходится учитывать тот факт, что атомы и молекулы компонентов, входящих в состав этой среды, под воздействием внешнего электромагнитного поля сами становятся источниками излучения электромагнитных волн. Возникающие при этом так называемые вторичные волны распространяются с некоторым запозданием относительно первичных волн, что, в свою очередь, обуславливает уменьшение скорости результирующих волн, образующихся в результате взаимодействия первичных и вторичных волн. Количественно уменьшение скорости оценивается через показатель преломления среды

$$v = c/n, \quad (63)$$

где v — скорость распространения электромагнитных волн в интересующей нас среде; n — показатель преломления этой среды.

Величина показателя преломления зависит от электрических свойств атомов, входящих в состав среды, количества этих атомов в единице объема, а также от взаимной близости частоты используемого излучения относительно одной из резонансных частот отмеченных атомов. Зависимость показателя преломления от частоты получила название дисперсии.

Дисперсионные свойства воздуха наиболее контрастно проявляются вблизи резонансных частот электронов, которые расположены в ультрафиолетовой части оптического диапазона. В видимой и ближней инфракрасной областях, которые широко используются в современных светодальномерах, из-за влияния отмеченных резонансов зависимость показателя преломления воздуха от длины волны носит характер монотонно убывающей функции (рис. 21), аналитически описываемой формулой Коши:

$$(n-1) 10^8 = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (64)$$

где λ — длина волны излучения; A , B и C — постоянные коэффициенты, величины которых определяются экспериментально.

Поскольку для воздуха величина показателя преломления может принимать значения, ориентировочно равные 1,0003—1,0004, то на практике для удобства вычислений чаще оперируют не с показателем преломления n , а с индексом преломле-

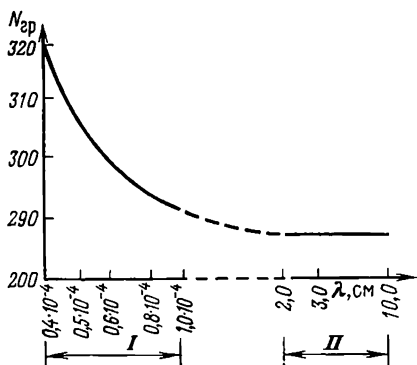


Рис. 21. График изменения группового показателя преломления воздуха в зависимости от длины волны несущих колебаний:

I — оптический диапазон; II — диапазон сантиметровых радиоволн

ния N , которые связаны между собой соотношением

$$N = (n - 1) 10^6. \quad (65)$$

В связи с тем, что показатель преломления воздуха зависит от состояния атмосферы, то числовые значения коэффициентов A , B и C определяют для стандартной атмосферы, характеризующейся вполне определенными величинами метеопараметров. Для вычисления показателя преломления в оптическом диапазоне при дальнометрических измерениях используют

формулу Эдлена, которая для сухого воздуха при температуре 0°C и давлении воздуха 760 мм рт. ст.¹ может быть представлена в следующем виде:

$$N = (n - 1) 10^6 = 287,569 + \frac{1,6206}{\lambda^2} + \frac{0,0139}{\lambda^4}, \quad (66)$$

где длина волны λ выражена в мкм.

При применении в дальнометрах модулированных колебаний спектр излучений, как было показано в § 9, состоит из целого ряда спектральных составляющих с различными длинами волн, которые при использовании оптического диапазона будут распространяться в воздухе с различной скоростью. Поэтому определение показателя преломления, а следовательно, и результирующей скорости распространения такой группы волн нуждается в пояснении.

При измерении расстояний светодальнометрами нас интересует скорость распространения модулированных колебаний и, в частности, скорость распространения «огibaющей» этих колебаний. Покажем, из каких предпосылок определяется эта скорость, для чего напишем уравнение для бегущих волн в форме ранее используемого соотношения (26):

¹ В настоящее время для измерения давления принята международная единица — паскаль (Па), а также производные от нее единицы — килопаскаль (кПа) и гектопаскаль (гПа). При этом давление воздуха в 760 мм рт. ст. соответствует 1013 гПа. Необходимость использования таких нестандартизованных единиц давления, как мм рт. ст., обусловлена тем, что в них проградуйрованы применяемые на практике барометры и составлены для многих типов дальнометров графики и номограммы.

$$y = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v_1} \right) + \varphi_0 \right] + \frac{mA}{2} \cos \left[(\omega + \Omega) \left(t - \frac{x}{v_2} \right) + \varphi_0 \right] + \frac{mA}{2} \cos \left[(\omega - \Omega) \left(t - \frac{x}{v_3} \right) + \varphi_0 \right], \quad (67)$$

где x — расстояния от излучателя; v_1 , v_2 и v_3 — скорости распространения отдельных составляющих излучаемого спектра. Остальные обозначения те же, что и в формуле (26).

Значения скорости v_1 , v_2 и v_3 представляют собой скорость перемещения фазового фронта гармонических колебаний определенной длины волны, причем под фазовым фронтом понимают поверхность, на которой лежат точки с одинаковым значением фазы. В связи с этим такую скорость называют фазовой.

Если учесть характер дисперсионной зависимости показателя преломления в оптическом диапазоне (см. рис. 21), то значения v_1 , v_2 и v_3 можно представить в следующем виде:

$$v_1 = v_\phi; \quad v_2 = v_\phi - \delta v_\phi'; \quad v_3 = v_\phi + \delta v_\phi'', \quad (68)$$

где v_ϕ — фазовая скорость центральной составляющей; $\delta v_\phi'$ и $\delta v_\phi''$ — отклонения значения фазовой скорости для боковых составляющих, которые обусловлены дисперсионными свойствами воздуха.

Для определения скорости распространения «огibaющей» приведем уравнение (67) к виду, представленному формулой (25). При этом с точностью, вполне достаточной для современных дальномерных измерений, «огibaющая» будет описываться уравнением

$$y_{\text{огиб}} = A_1 \cos \left[\Omega t - \frac{\Omega x}{v_\phi} - \frac{\omega x}{v_\phi^2} \left(\frac{\delta v_\phi' + \delta v_\phi''}{2} \right) \right]. \quad (69)$$

Откуда формула для скорости распространения «огibaющей» имеет вид

$$v_{\text{огиб}} = \frac{dx}{dt} = v_\phi - \frac{\omega}{\Omega} \left(\frac{\delta v_\phi' + \delta v_\phi''}{2} \right). \quad (70)$$

Если дисперсионная кривая в пределах рабочего участка спектра может быть аппроксимирована отрезком прямой, то $\delta v_\phi' = \delta v_\phi'' = \delta v$, и формула принимает вид

$$v_{\text{огиб}} = v_\phi - \frac{\omega}{\Omega} \delta v_\phi. \quad (70a)$$

В литературе скорость распространения «огibaющей» $v_{\text{огиб}}$ часто отождествляют с групповой скоростью $v_{\text{гр}}$, под которой понимают скорость распространения электромагнитной энергии группы волн. Вдали от молекулярных резонансов такое отождествление не приводит к заметным погрешностям измерения

дальностей. Поэтому при дальнейшем изложении материала также принято, что $v_{гр} = v_{огнб}$.

В связи с введением двух понятий для скорости распространения электромагнитных волн (фазовой и групповой) аналогичные определения применяют и для показателя преломления воздуха:

$$v_{гр} = c/n_{гр} \quad \text{и} \quad v_{ф} = c/n_{ф}.$$

При этом

$$n_{гр} = n_{ф} - \frac{\omega}{\Omega} \delta n_{ф}, \quad (71)$$

где $\delta n_{ф} = - \frac{\delta v_{ф}}{v_{ф}} n_{ф}$.

Если вместо несущей и модулирующих частот ω и Ω использовать соответствующие им длины волн λ и λ_m , то формула (71) для группового показателя преломления может быть записана в следующем виде:

$$n_{гр} = n_{ф} - \lambda \frac{\delta n_{ф}}{\delta \lambda}, \quad (71a)$$

где $\lambda = 2\pi c/\omega$ — длина волны колебаний оптического диапазона; $\delta \lambda = \lambda^2/\lambda_m$ — расхождение между центральной и боковыми составляющими, выраженное в длинах волн; $\lambda_m = 2\pi c/\Omega$ — длина волны модулирующих колебаний.

Учитывая малую ширину разброса боковых составляющих, характерную для дальномерных измерений, практически очень часто конечные приращения $\delta n_{ф}$ и $\delta \lambda$ заменяют дифференциалами $dn_{ф}$ и $d\lambda$. При этом

$$n_{гр} = n_{ф} - \lambda \frac{dn_{ф}}{d\lambda}. \quad (71б)$$

Последняя формула в литературе получила название формулы Рэлея. С использованием этого соотношения формула Эдлена для группового показателя преломления, отнесенного к стандартной атмосфере, принимает вид

$$\begin{aligned} N_{гр0} &= (n_{гр0} - 1) 10^6 = A + \frac{3B}{\lambda^2} + \frac{5C}{\lambda^4} = \\ &= 287,569 + \frac{4,8618}{\lambda^2} + \frac{0,0695}{\lambda^4}. \end{aligned} \quad (72)$$

Переход от группового показателя преломления $n_{гр}$ для стандартной атмосферы к соответствующему показателю преломления n_L для реальной атмосферы осуществляется посредством использования следующего математического соотношения:

$$(n_L - 1) = (n_{гр0} - 1) \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} - \left(0,0624 - \frac{0,00204}{\lambda^2} \right) \frac{T_0}{T} e 10^{-6}, \quad (73)$$

где T_0 и T — температура воздуха соответственно для стандартных и реальных условий в градусах Кельвина; p_0 и p — атмосферное давление для тех же условий, обычно выражаемое в мм рт. ст.; e — парциальное давление водяных паров в мм рт. ст.

При $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ($T_0 = 273,16\text{ K}$), $p_0 = 760$ мм рт. ст. и $\lambda = 0,63$ мкм формула (73) принимает вид

$$(n_L - 1) = \frac{n_{\text{гp}} - 1}{1 + \alpha t} \frac{p}{760} - \frac{0,57 \cdot 10^{-7}}{1 + \alpha t} e, \quad (73a)$$

где $\alpha = 1/T_0 = 0,003661$; t — температура воздуха в реальных условиях в $^\circ\text{C}$. Групповую скорость для излучений оптического диапазона в реальной атмосфере вычисляют при этом по формуле

$$v_{\text{гp}} = c/n_L.$$

При определении скорости распространения ультракоротких радиоволн, используемых в современных геодезических радиодальномерах, приходится учитывать следующие особенности.

Во-первых, на основании приведенного на рис. 21 графика нетрудно установить, что в радиодиапазоне величина показателя преломления практически не зависит от длины волны. Поэтому из-за отсутствия в этом диапазоне дисперсии понятия фазовой и групповой скорости совпадают.

Во-вторых, в УКВ диапазоне по сравнению с оптическим диапазоном резко возрастает влияние водяных паров. Это объясняется тем, что из-за инерционных свойств полярных молекул воды электромагнитные поля различных диапазонов оказывают на них различное влияние. В радиодиапазоне, т. е. на более низких частотах, полярные молекулы водяных паров приобретают не только электронную поляризацию, но и сами достаточно быстро ориентируются, следуя за изменениями внешнего поля. При этом они становятся заметным источником вторичных волн. В оптическом диапазоне, т. е. на более высоких частотах, из-за своей инерционности эти молекулы не успевают изменять ориентировку, вследствие чего интенсивность отмеченных вторичных излучений резко уменьшается.

На основе вышеизложенного формула для вычисления показателя преломления воздуха применительно к радиодальномерным измерениям имеет следующий обобщенный вид:

$$N = (n - 1) 10^8 = k_1 \frac{p_c}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}, \quad (74)$$

где p_c и e — парциальные давления сухого воздуха и водяного пара; T — температура воздуха; k_1 , k_2 и k_3 — экспериментально определяемые коэффициенты пропорциональности.

При практическом использовании формулы (74) для p_c и e , выраженных в мм рт. ст., а T — в градусах Кельвина, коэффи-

циенты k_1 , k_2 и k_3 принимают следующие значения: $k_1=103,49$; $k_2=86,26$; $k_3=495\,822,48$.

С учетом этого рабочая формула для вычисления показателя преломления радиоволн, получившая в литературе название формулы Фрума и Эссена, может быть представлена в следующем виде:

$$N = (n-1) 10^6 = \frac{103,49}{T} (p-e) + \frac{86,27}{T} \left(1 + \frac{5748}{T} \right) e, \quad (75)$$

где p — реально измеряемое атмосферное давление, включая и парциальное давление водяных паров ($p=p_c+e$). Остальные обозначения — те же, что и в формуле (74).

Следует заметить, что под температурой, давлением и влажностью воздуха во всех приведенных выше формулах для вычисления показателя преломления понимают средние значения этих величин вдоль всей длины измеряемой линии.

§ 15. ПРИБОРНЫЕ ПОПРАВКИ ДАЛЬНОМЕРОВ И МЕТОДЫ ИХ УЧЕТА

При рассмотрении принципов действия свето- и радиодальномеров, а также при выводе основных рабочих формул в предыдущих разделах не конкретизировалось положение начальной отсчетной точки в приборе, от которой начинается отсчет измеряемой разности фаз. Нужно отметить в дополнительных пояснениях и вопрос о положении эквивалентной отражающей поверхности в отражателе (или отсчетной точки в ретрансляторе радиодальномера), относительно которой регистрируется дальномером измеряемая длина линии.

Общие принципы нахождения положения начальной отсчетной точки, получившей название электрического центра дальногомера, нагляднее всего проиллюстрировать на схеме светодальномера, где пути прохождения сигналов внутри прибора можно во многих случаях отождествить с геометрическими путями прохождения оптических лучей. С этой целью проанализируем более детально схему дальногомера, представленную на рис. 2. Из этой схемы нетрудно установить, что два сигнала (информационный и опорный) начинают различаться по фазе после их разделения в точке a , а фазовое сравнение этих сигналов происходит в точке d на прозрачном диске с круговой шкалой, играющей роль фазоизмерительного устройства. Для определенности вместо изображенного на рис. 2 пучка световых лучей ограничимся рассмотрением пути прохождения одного луча. При этом опорный сигнал от точки a до d проходит путь $l_{ab}+l_{bc}+l_{cd}$. Соответственно информационный сигнал внутри прибора проходит путь l_{ae} в передающем тракте и $l_{gh}+l_{hd}$ в приемном тракте.

Следовательно, при точном измерении расстояний с учетом прохождения сигналов внутри прибора необходимо значение D дополнить величиной ΔD , которая применительно к рис. 2 может быть принята равной

$$\Delta D = \frac{(l_{ae} + l_{gh} + l_{hd}) - (l_{ab} + l_{bc} + l_{cd})}{2}, \quad (76)$$

т. е. путь, проходимый информационным сигналом внутри прибора, прибавляется к величине D , а путь, характерный для опорного сигнала, вычитается. Деление правой части уравнения (76) на два произведено потому, что каждый элемент измеряемого расстояния сигнал должен проходить дважды (в прямом и обратном направлениях).

Рассмотренная поправка получила в дальномерной технике название приборной поправки или поправки за положение нуля-пункта.

Практически обозначенная на рис. 2 величина D отсчитывается не от передней стенки дальномера, а от оси, проходящей через центр станového винта, с помощью которого дальномер закрепляется на штативе. Обычно эта точка, получившая название механического центра прибора, «привязывается» к закреплению на местности геодезическому центру (рис. 22). С учетом этого поправка K_d за положение нуля-пункта приемопередатчика дальномера представляет собой отрезок длины, равный смещению электрического центра относительно механического и редуцированный на направление измеряемого расстояния.

Применительно к отражателю светодальномера, который устанавливается на другом конце линии, поправка за положение его нуля-пункта определяется значительно проще. Если отражение света происходит непосредственно от поверхности плоского зеркала, то положение этой поверхности и определяет поправку $K_{отр}$ относительно центра станového винта, которым закрепляется отражатель на штативе (см. рис. 22). Поскольку чаще всего при светодальномерных измерениях применяют угловые отражатели, в которых падающий на них свет перед тем, как отразиться, проходит ломаный путь в стекле, то для определения $K_{отр}$ приходится вычислять этот путь и вводить в него поправки за различие скорости света в стекле и воздухе, а также принимать в расчет положение отражателя относительно его точки центрирования. Для различных типов отражателей величина $K_{отр}$ может иметь различные значения. Поэтому при замене отражателей следует использовать паспортное значение $K_{отр}$ того отражателя, который применялся при измерениях.

С учетом введенных поправок K_d и $K_{отр}$ нетрудно установить взаимосвязь между искомой длиной линии D и измеренным значением длины $D_{изм}$. Непосредственно из рис. 22 видно, что

$$D = D_{изм} + K_d + K_{отр}. \quad (77)$$

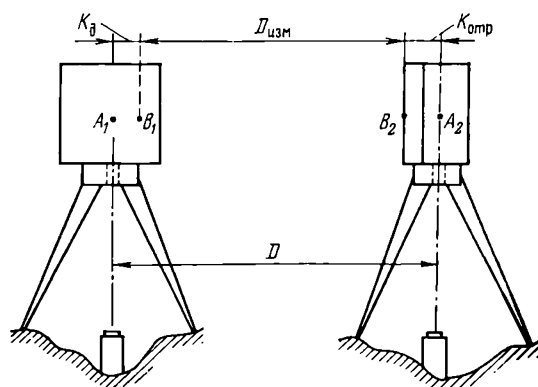


Рис. 22. Схема взаимосвязи между длиной линии D и ее измеренным значением $D_{\text{изм}}$:

A_1 и A_2 — положения механических центров приборов;
 B_1 и B_2 — положения электрических центров

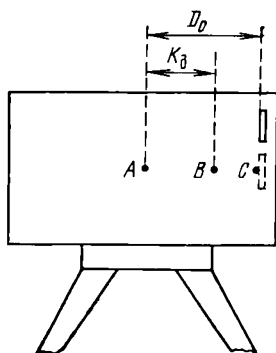


Рис. 23. Схема взаимного расположения точек относительности в дальномере:

A — механический центр;
 B — электрический центр;
 C — условное положение отражающей поверхности на линии ОКЗ

По поводу практического определения поправки K_d необходимо отметить, что геометрически предвычислить эту величину в большинстве случаев не представляется возможным. Во многих реальных схемах как опорный, так и информационный сигналы от точки их разветвления до той точки, где происходит их фазовое сравнение, проходят в виде электрических сигналов по сложным электрическим цепям, для которых невозможно с необходимой точностью рассчитать время прохождения интересующих нас сигналов. Кроме того, возникающие при этом задержки во многих случаях недостаточно стабильны во времени, в результате чего приходится не только отказываться от метода предрасчета величины K_d , но и разрабатывать специальные методы ее определения, позволяющие ослабить влияние отмеченных задержек на результаты дальномерных измерений.

Один из наиболее распространенных методов уменьшения влияния нестабильности поправки K_d на результаты измерений состоит в использовании специальной методики измерений, включающей в себя вспомогательные измерения с применением в дальномере линии оптического короткого замыкания (ОКЗ). При наличии ОКЗ, которое является неотъемлемой частью большинства современных светодальномеров, процесс измерения включает в себя два основных этапа: взятие отсчетов при посылке информационного сигнала на удаленный отражатель и взятие отсчетов при прохождении этого сигнала по короткому оптическому пути внутри приемопередатчика дальномера. При этом

расстояние D до удаленного отражателя может быть подсчитано по формуле

$$D = \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \frac{v}{2f} + K_d + K_{\text{отр}}, \quad (78)$$

где N — целое число полных периодов изменения фазы за время прохождения информационным сигналом искомого расстояния; $\Delta\varphi$ — измеряемая фазометром разность фаз при послылке сигнала на удаленный отражатель; v — групповая скорость света; f — масштабная частота.

При измерении расстояния D_0 от точки A до точки C (рис. 23) с использованием ОКЗ формула (78) принимает вид

$$D_0 = \frac{\Delta\varphi_0}{2\pi} \frac{v}{2f} + K_d, \quad (79)$$

где $\Delta\varphi_0$ — измеряемая фазометром разность фаз при прохождении информационного сигнала по ОКЗ.

Для разности отсчетов $\Delta\varphi - \Delta\varphi_0$ будем иметь

$$D = \left(N + \frac{\Delta\varphi - \Delta\varphi_0}{2\pi} \right) \frac{v}{2f} + D_0 + K_{\text{отр}}. \quad (80)$$

Непосредственно из формулы (80) видно, что при описываемой методике измерений, предусматривающей дополнительные измерения по ОКЗ и последующее использование разности отсчетов, нестабильная поправка K_d , в которую входят задержки как оптических, так и электрических сигналов, заменяется более стабильной величиной D_0 , представляющей собой расстояние от механического центра прибора (точка A) до точки C , соответствующей положению отражающей поверхности в устройстве ОКЗ. К поправке K_d , определяющей положение электрического центра B , предъявляются при этом требования сохранения постоянства своей величины только в течение того времени, которое проходит между снятием отсчетов $\Delta\varphi$ и $\Delta\varphi_0$.

Рассмотренная методика хотя и позволяет существенно стабилизировать работу дальномера, но не решает целиком проблему надежного и точного определения приборной поправки дальномера. Один из недостатков такой методики состоит в необходимости геометрического определения величины D_0 по чертежам прибора. Эта особенность указанного метода при большом разнообразии конструкций дальномеров и технических решений отдельных его узлов не позволяет разработать универсальный метод измерения величины D_0 . Кроме того, неидентичность условий работы дальномера при послылке сигнала на удаленный отражатель и при прохождении сигнала через ОКЗ может приводить к появлению систематических погрешностей измерений, не учитываемых описанной выше методикой.

Отмеченные недостатки привели к необходимости использования на практике метода определения приборных поправок, основанного на измерении линий известной длины.

Сушность данного метода весьма проста. Если расстояние между геодезическими центрами известно, т. е. $D=D_{\text{эт}}$ (см. рис. 22), то в соответствии с формулой (77) имеем

$$K_d = (D_{\text{эт}} - D_{\text{изм}}) - K_{\text{отр}}, \quad (81)$$

а для случая использования в схеме дальномера линии ОКЗ

$$D_0 = (D_{\text{эт}} - D_{\text{изм}}) - K_{\text{отр}}. \quad (81a)$$

В дальнейшем величину D_0 будем обозначать через $K_{\text{пр}}$, которую обычно называют приборной поправкой¹ приемопередатчика дальномера.

Следует заметить, что при определении $K_{\text{пр}}$ посредством измерения линии известной длины в значение этой поправки входит не только поправка за положение нуль-пункта дальномера, но и все систематические погрешности, которые свойственны исследуемому прибору, в условиях, характерных для выбранной эталонной линии, включая и состояние внешней среды во время проведения измерений.

Исходя из вышеизложенного, при разработке методики определения приборной поправки в большинстве случаев стремятся к тому, чтобы поправку $K_{\text{пр}}$ определять в условиях, характерных для последующей эксплуатации дальномера. Однако при этом приходится учитывать то обстоятельство, что к значению приборной поправки $K_{\text{пр}}$ предъявляются весьма жесткие требования в отношении точности ее определения. Действительно, непосредственно из формулы $D = D_{\text{изм}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{отр}}$ следует, что погрешность, допущенная при определении $K_{\text{пр}}$, будет входить во все последующие измерения как систематическая погрешность. В связи с вышеизложенным для повышения точности определения $K_{\text{пр}}$ применяют, как правило, усиленные программы измерений, а в качестве эталонных линий используют базисы небольшой длины (порядка нескольких сотен метров).

В отдельных случаях для тех светодальномеров, у которых достаточно детально изучены все основные источники систематических погрешностей, определение приборных поправок производят в лабораторных условиях с использованием специально оборудованной оптической скамьи, на которой устанавливается отражатель на небольшом (порядка нескольких метров) известном расстоянии от приемопередатчика. Обычно такая скамья позволяет плавно перемещать отражатель вдоль направляющих, снабженных штриховой шкалой. Это приспособление позволяет не только количественно определить значение величины $K_{\text{пр}}$, но и произвести исследование отдельных источников погрешностей, свойственных тому или иному дальномеру. Обоснованность ис-

¹ В литературе эту поправку часто называют также постоянной поправкой.

пользования такого удобного в организационном отношении метода, как правило, устанавливается на основе проведения предварительных специальных исследований, свидетельствующих о том, что значение $K_{пр}$, определенное в лабораторных условиях, не содержит дополнительных систематических погрешностей, обусловленных измерениями в отмеченных условиях.

Что касается радиодальномеров, то при рассмотрении характерных для этих приборов методов определения приборных поправок приходится учитывать ряд особенностей их работы.

Одна из особенностей состоит в том, что проследить по чертежу или схеме путь прохождения интересующего нас сигнала и точно предрассчитать величину этого пути невозможно, поскольку в радиодальномерах переносчиком информации являются электрические сигналы, для которых существующие методы расчета временных задержек при их прохождении по электрическим цепям не обеспечивают требуемой точности. Кроме того, из-за использования в радиодальномерах принципа работы с активным ответом исключается возможность применения каких-либо линий короткого замыкания, аналогичных линиям ОКЗ, используемым в светодальномерах. Не привели к положительным результатам и попытки разработки лабораторных методов определения приборных поправок для радиодальномеров. В связи с вышеизложенным единственным эффективным способом определения рассматриваемых поправок применительно к радиодальномерам является метод измерения базисных линий в полевых условиях. Однако и в этом случае приходится учитывать характерные для радиодальномеров условия работы.

Так, например, при эксплуатации светодальномеров очень часто используются различные типы отражателей, для которых значение $K_{отр}$ определяется независимо геометрическим способом. Поэтому в полевых условиях для светодальномеров определяют, как правило, только поправку для приемопередатчика $K_{пр}$. Что касается радиодальномеров, то для этой группы дальномеров отделить приборные поправки для основной и вспомогательной станций не всегда представляется возможным. Исходя из этого, для каждой конкретной пары станций радиодальномера чаще всего определяется суммарная приборная поправка, т. е. $D = D_{изм} + K$, где $K = K_M + K_R$; K_M — приборная поправка для основной (ведущей) станции; K_R — приборная поправка для вспомогательной (ведомой) станции.

Так же как и при светодальномерных измерениях, для повышения точности определения рабочей скорости распространения используемых электромагнитных волн в качестве базиса, на котором определяется приборная поправка радиодальномера, выбирается линия сравнительно небольшой длины (от нескольких сотен метров до одного-двух километров). На такой линии не должно проявляться заметное влияние отражений от подстилающей поверхности или от каких-либо других объектов, попадаю-

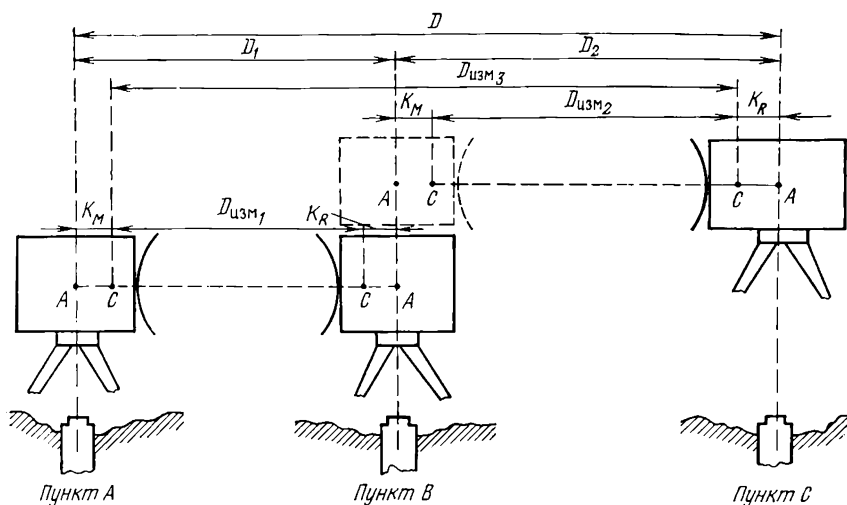


Рис. 24. Схема взаимосвязи между измеряемыми величинами при определении приборной поправки на линиях неизвестной длины

ших в зону облучения. Измерения, связанные с определением приборной поправки, производят по усиленной программе.

Наряду с методом нахождения приборных поправок на линиях известной длины ограниченное применение находит и другой метод, базирующийся на измерении нескольких линий неизвестной длины (рис. 24). Этот метод может быть использован как при работе со светодальномерами, так и с радиодальномерами.

Для пояснения сущности данного метода предположим, что на местности выбраны расположенные на одной прямой три пункта А, В и С (см. рис. 24). Если с помощью одного и того же комплекта дальномера, состоящего из приемопередатчика и отражателя или из основной и вспомогательной станций радиодальномера, последовательно измерить все три дальности D_1 , D_2 и D , то с учетом суммарной приборной поправки K будем иметь

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= D_{изм1} + K \\ D_2 &= D_{изм2} + K \\ D &= D_{изм3} + K \end{aligned} \right\}, \quad (82)$$

где D_1 , D_2 и D — расстояния между геодезическими центрами, значения которых неизвестны; $D_{изм1}$, $D_{изм2}$ и $D_{изм3}$ — значения длин линий, полученные из показаний дальномеров; K — суммарная приборная поправка ($K = K_{пр} + K_{отр}$ — для светодальномеров и $K = K_M + K_R$ — для радиодальномеров).

Учитывая, что $D = D_1 + D_2$, из совместного решения уравнений (82) имеем

$$K = D_{\text{изм}_3} - (D_{\text{изм}_1} + D_{\text{изм}_2}). \quad (83)$$

Приведенная формула свидетельствует о том, что при выполнении указанных выше условий приборная поправка может быть вычислена непосредственно из показаний дальномера.

В более общем случае этот метод может быть распространен и на большее число пунктов.

К основному недостатку данного метода следует отнести требование независимости величины приборной поправки исследуемых дальномеров от длины измеряемой линии. Для пояснения сделанного замечания выведем формулу для приборной поправки описанным выше методом в предположении, что значение K зависит от длины измеряемой линии в соответствии с формулой

$$K = a + bD + cD^2, \quad (84)$$

где a , b и c — постоянные коэффициенты.

Из совместного решения уравнений (82) будем иметь

$$a - 2cD_{\text{изм}_1}D_{\text{изм}_2} = D_{\text{изм}_3} - (D_{\text{изм}_1} + D_{\text{изм}_2}). \quad (85)$$

Анализ полученного соотношения позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

1. При использовании рассмотренного выше метода из значения K автоматически выпадает масштабирующая составляющая bD , которая принципиально не может быть учтена этим методом.

2. Измеренное значение приборной поправки оказывается отягощенным дополнительными поправками из-за влияния нелинейных составляющих (в частности, составляющей cD^2), величина которых зависит не только от длины измеряемых линий, но и от положения промежуточного пункта B (см. рис. 24). Практически закономерность зависимости K от D заранее неизвестна, вследствие чего определить величину отмеченной дополнительной поправки из измерений линий неизвестной длины не представляется возможным.

К другим недостаткам рассмотренного метода следует отнести как большую трудоемкость организации и проведения полевых работ, так и требование обеспечения высокой точности измерений на всех используемых при таком методе линиях.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Охарактеризуйте основные особенности косвенного метода измерения расстояний.

2. Какая физическая величина подвергается измерениям при косвенном методе определения расстояний, основанном на ис-

пользовании прямолинейного равномерного движения материального тела?

3. Каким требованиям должны отвечать носители информации, используемые при выполнении высокоточных измерений длин линий на местности?

4. Назовите причины, препятствующие использованию звуковых волн для точного измерения расстояний на земной поверхности.

5. Какие особенности распространения электромагнитных волн следует учитывать при использовании их для измерения расстояний на местности?

6. Поясните основные принципы импульсного метода измерения расстояний.

7. Почему в формуле (2) введено удвоенное значение измеряемого расстояния?

8. Объясните принцип действия устройства, изображенного на рис. 2.

9. Покажите на рис. 2 путь прохождения информационного и опорного сигналов.

10. Чем определяется показанная на рис. 2 величина угла φ ? В каких пределах она может изменяться и измеряться?

11. В каких единицах измеряют угловую частоту ω , частоту f и период T ? Какая связь между этими величинами?

12. Напишите уравнение гармонического колебания в общем виде. Объясните различие между текущей и начальной фазой. Какое понятие фазы используют при выполнении измерений фазометром?

13. Определите длину волны колебаний, если их частота равна 15 МГц (скорость распространения можно принять равной $3 \cdot 10^8$ м/с).

14. Вычислить фазовый сдвиг, который приобретают колебания с частотой 15 МГц после прохождения расстояния 10 км в прямом и обратном направлениях.

15. Разность фаз между информационным и опорным сигналами на входе фазометра равна $813,5^\circ$. Какой фазовый сдвиг будет измерен фазометром?

16. Поясните необходимость использования в дальнометрах несущих колебаний. Какие из параметров несущих колебаний оказывают влияние на точность дальнометрных измерений?

17. Перечислите основные способы управления несущими колебаниями, используемые в дальнометрах. Объясните различие между длиной волны несущих и масштабных (модулирующих) колебаний.

18. Какие методы измерения разности фаз находят применение в современных дальнометрах?

19. Каковы особенности компенсационного метода фазовых измерений?

20. Объясните принцип действия электронного цифрового фазометра, схема которого приведена на рис. 13.

21. Как взаимосвязаны показания счетного устройства электронного цифрового фазометра с измеряемой разностью фаз?

22. Как зависит цена деления электронного цифрового фазометра от соотношения частоты фазосравняваемых сигналов и частоты генератора счетных импульсов?

23. Поясните необходимость использования в современных дальномерах низкочастотного метода фазовых измерений. Какие функции в схеме, изображенной на рис. 14, выполняют гетеродин и смесители?

24. Какие основные причины обусловили необходимость применения в современных дальномерах импульсно-фазового гетеродинного метода?

25. Объясните принцип действия схемы, приведенной на рис. 15.

26. В чем общность и различие импульсно-фазового и фазового методов?

27. Из-за чего возникает неоднозначность значений длин линий, измеряемых фазовыми методами? Какой физический смысл имеет понятие «разрешение неоднозначности»?

28. Перечислите методы разрешения неоднозначности, которые используются в дальномерной технике.

29. При измерениях на трех фиксированных масштабных частотах, находящихся в соотношении $f_A : f_B : f_C = 100 : 10 : 1$, фазометром зафиксированы следующие отсчеты: $a_C = 832$, $a_B = 403$ и $a_A = 966$. Определите полное значение измеренного расстояния, если шкала фазометра на основной масштабной частоте A проградуирована в сантиметрах, а длина измеряемой линии не превышает 1 км?

30. Выполните вычисления, аналогичные предыдущему примеру, для соотношения частот $f_A : (f_A - f_B) : (f_A - f_C) = 100 : 10 : 1$, и снятых с фазометра значений отсчетов: $a_C = 532$, $a_B = 402$ и $a_A = 876$.

31. Сформулируйте основные отличительные признаки, характеризующие влияние атмосферы на электромагнитные волны оптического и УКВ диапазонов. Как количественно оценивается ослабление излучений указанных диапазонов при прохождении через атмосферу?

32. Поясните физический смысл понятия «окно прозрачности».

33. От каких параметров атмосферы зависит скорость распространения электромагнитных волн?

34. На каких участках спектра электромагнитных волн проявляется влияние дисперсионных свойств воздуха на скорость распространения этих волн?

35. Из каких основных этапов состоит последовательность определения рабочей скорости распространения света и радио-

волн? Что понимают под термином «стандартная атмосфера»?

36. Что принято понимать под фазовой и групповой скоростями распространения электромагнитных волн, а также под фазовым и групповым показателями преломления воздуха?

37. Поясните физическую сущность понятия приборной поправки.

38. Для чего в светодальномерах вводят линию оптического короткого замыкания (ОКЗ)?

39. Какие методы определения приборных поправок используют в практике дальномерных измерений?

40. Объясните характерные особенности метода определения приборных поправок на линиях неизвестной длины.

Глава II

ОБОБЩЕННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ДАЛЬНОМЕРОВ И ИХ ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

§ 16. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При выполнении современных топографо-геодезических работ находят применение различные типы геодезических свето- и радиодальномеров. Такое различие определяется, как правило, спецификой решаемых геодезических задач. В то же время, несмотря на отмеченное различие, все упомянутые выше дальномеры базируются на общих, рассмотренных в предыдущей главе принципах работы, что позволяет построить для них обобщенные функциональные схемы. На основе анализа таких схем открывается возможность выявления тех общих для всех дальномеров компонентов, без которых невозможна работа дальномерных устройств, изучить их взаимосвязь, сформулировать требования к этим компонентам, а также установить соответствие реально используемых компонентов данным требованиям. Кроме того, обобщенные функциональные схемы не только существенно облегчают изучение особенностей работы конкретных типов дальномеров, но и позволяют сделать критическую оценку тем принципам построения схемы, которые заложены в том или ином дальномере.

Все современные разновидности геодезических свето- и радиодальномеров могут быть объединены в две основные группы. Первую из них составляют дальномеры, базирующиеся на принципе пассивного ответа. В нее входит подавляющее большинство светодальномеров, работающих в сочетании с пассивными отражателями. Вторая группа объединяет дальномеры, у которых в качестве ответчика используют активные ретрансляторы. К этой группе относятся различные модификации фазовых радиодальномеров.

Исходя из вышеизложенного, в последующих разделах настоящей главы изложены принципы построения обобщенных функциональных схем для каждой из этих групп дальномеров и рассмотрены особенности входящих в отмеченные схемы основных компонентов.

§ 17. ОБОБЩЕННАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ДАЛЬНОМЕРА С ПАССИВНЫМ ОТВЕТОМ

Общие подходы к построению простейших функциональных схем светодальномеров, у которых в качестве отражателя используется зеркало той или иной конструкции, описаны в предыдущей главе. При практической реализации таких схем возникает необходимость их усложнения, что связано, как правило, со стремлением улучшения эксплуатационных характеристик создаваемых дальномеров (таких, например, как точность измерений, дальность действия, удобство работы с прибором и др.). Исходя из этого, рассмотрим прежде всего требования, которые предъявляются к основным составным частям современного светодальмера, включающего в себя передающее и приемное устройства.

Основное назначение передающей части любого светодальмера состоит в том, чтобы обеспечить излучение модулированного сигнала в виде узкого светового луча в направлении на удаленный отражатель. Эта задача независимо от особенностей конструкции того или иного светодальмера решается с помощью таких основных компонентов, как источник излучения, модулятор света, генератор масштабной частоты и передающая оптическая система.

Для удовлетворения требования работоспособности дальмера в дневных условиях в качестве источников света используют такие излучатели, которые обеспечивали бы высокую интенсивность излучаемой энергии в узком спектральном диапазоне. Этим требованиям наиболее полно отвечают лазерные источники излучения, которые почти повсеместно пришли на смену таким излучателям, как лампы накаливания и различного рода газосветные источники света.

Поскольку для осуществления фазовых измерений в рассматриваемых типах дальномеров необходимы модулированные колебания, то во всех разновидностях светодальномеров излучаемый источником световой поток подвергается тем или иным периодическим изменениям с помощью модулятора света, работой которого управляет генератор масштабной частоты. Взаимодействие перечисленных компонентов показано на рис. 25, где направления прохождения оптических сигналов условно обозначены штриховыми линиями, а электрических — сплошными.

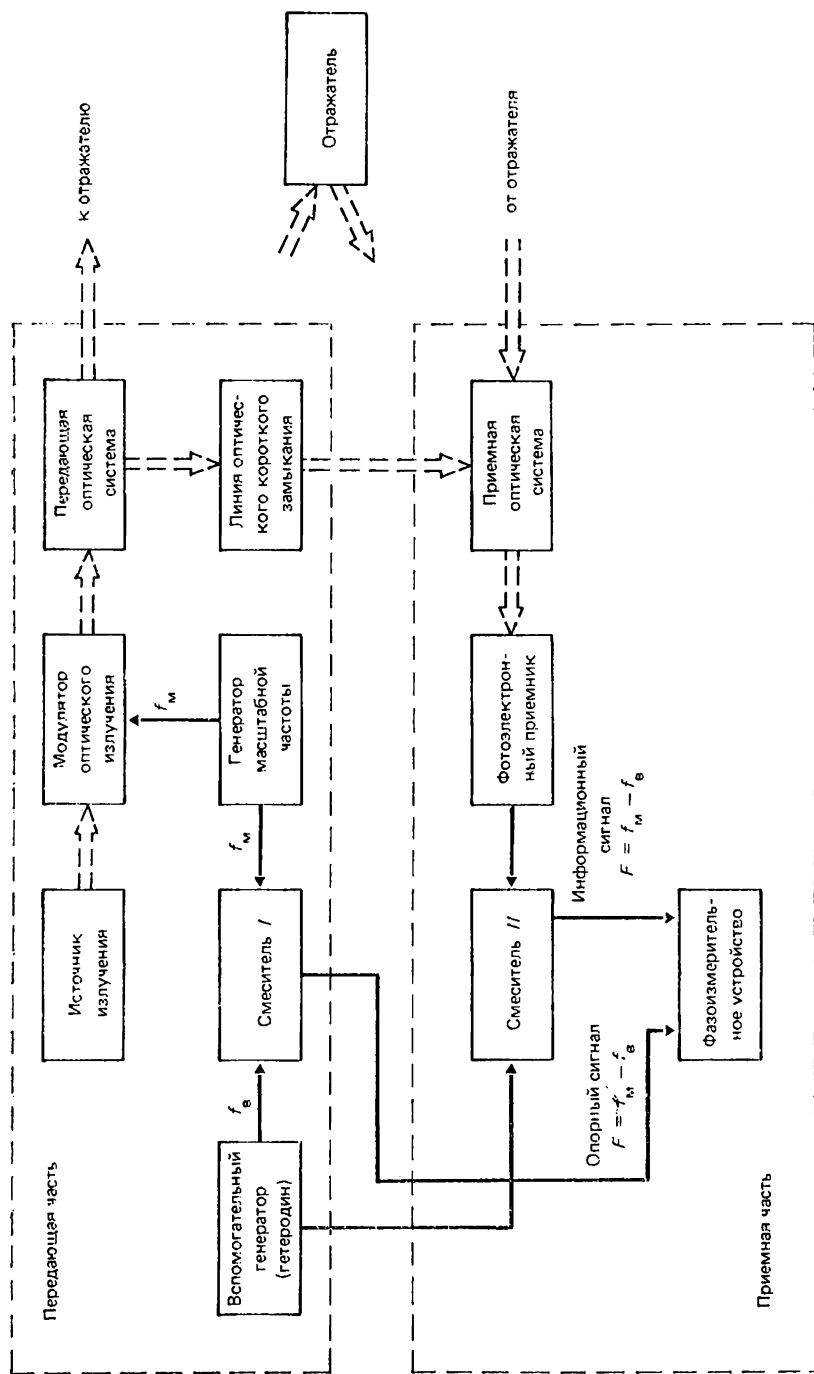


Рис. 25. Обобщенная функциональная схема фазового светодальномера

Для обеспечения высокой точности измерений свет модулируют с частотой в десятки мегагерц. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к модулятору, является требование малой инерционности его работы. Кроме того, необходимо, чтобы потери света в модуляторах были минимальны, а глубина модуляции светового потока была максимальной. При создании портативных светодальномеров стремятся к тому, чтобы функции источника излучения и модулятора света органически объединить в одном узле.

Как уже отмечалось ранее, масштабная частота определяет длину того «метра», которым измеряется расстояние. Поэтому ее нестабильность непосредственно влияет на точность выполняемых линейных измерений. Исходя из вышеизложенного, основное требование, которое предъявляется к генератору масштабной частоты, состоит в том, чтобы обеспечить генерирование стабильных по частоте электрических колебаний в заданном частотном диапазоне. Эта задача успешно решается с помощью современных радиоэлектронных схем, причем для стабилизации частоты, как правило, используют кварцевые резонаторы.

Основное назначение включенной на выходе модулятора передающей оптической системы состоит в том, чтобы сконцентрировать излучаемый световой поток в узкий луч с малым углом расходимости, который в процессе выполнения измерений направляется на удаленный отражатель. Кроме того, как было отмечено в § 15, для повышения стабильности приборной поправки в состав светодальномера вводят линию оптического короткого замыкания (ОКЗ). В связи с этим дополнительная функция передающей оптической системы состоит в том, чтобы обеспечить необходимую коммутацию излучаемого сигнала при работе на удаленный отражатель и на линию ОКЗ.

Наряду с вышеизложенным передающая часть любого светодальномера должна быть связана с приемной частью канала для прохождения опорного сигнала. В соответствии со схемой, приведенной на рис. 25, этот сигнал в современных дальномерах передается в большинстве случаев от генератора масштабной частоты в фазометр по электрическим цепям, причем для реализации рассмотренного в § 10 низкочастотного метода фазовых измерений в указанном тракте происходит преобразование частоты с f_m на $F = f_m - f_v$, для чего в обобщенной функциональной схеме предусмотрены такие узлы, как гетеродин, генерирующий колебания с частотой f_v , и смесительное устройство (смеситель I).

Основное назначение приемной части светодальномера состоит в том, чтобы принять поступающий с дистанции или по линии ОКЗ оптический информационный сигнал, преобразовать его в электрический и произвести фазовое сравнение с опорным сигналом. Эта задача решается с помощью таких

основных узлов, как приемная оптическая система, фотоэлектронный приемник и фазоизмерительное устройство, взаимодействие которых показано на рис. 25.

К приемной оптической системе предъявляются требования концентрации оптического излучения, поступающего или с дистанции, или по линии ОКЗ на входе фотоприемника. В конструктивном отношении приемная и передающая оптические системы имеют много общих технических решений, что создает предпосылки для их совмещения. В современных светодальномерах сравнительно часто применяют совмещенные оптические системы, что позволяет не только сделать конструкцию дальномера более компактной, но и устранить трудности эксплуатации дальномеров на линиях небольшой длины, обусловленные несовмещением траекторий, по которым распространяются излучаемые и принимаемые световые сигналы.

Фотоэлектронные приемники, применяемые в светодальномерах, предназначены для преобразования принимаемого модулированного оптического сигнала в электрический с последующим выделением информационного сигнала. К фотоприемникам предъявляются такие основные требования, как высокая чувствительность к слабым световым сигналам используемого спектра излучения, способность выделения с минимальным ослаблением информационного сигнала на фоне различного рода шумов и других побочных компонент спектра излучения. Кроме того, при реализации низкочастотной методики фазовых измерений фотоприемник, как правило, выполняет и функции смесителя (на рис. 25 — смеситель *II*). С помощью такого смесителя информационный сигнал масштабной частоты должен быть преобразован в низкочастотный сигнал с частотой F , которую имеет и опорный сигнал, поступающий в фазометр.

Что касается фазоизмерительного устройства, в которое поступают как опорный, так и информационный сигналы, то в современных светодальномерах это устройство используется не только для измерения разности фаз между упомянутыми сигналами, но и принимает на себя функции по предварительной обработке результатов измерений. В частности, применяемые в большинстве светодальномеров последних лет цифровые фазометры в сочетании со встроенными в дальномер микропроцессорами позволяют автоматически на цифровом табло получать полное значение искомого расстояния, автоматически корректировать исходную информацию и автоматически управлять всем процессом измерений.

§ 18. ОБОБЩЕННАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ДАЛЬНОМЕРА С АКТИВНЫМ ОТВЕТОМ

Дальность действия любого дальномера, основанного на использовании распространяющихся в пространстве электромагнитных волн, существенно зависит от того, какая часть излу-

чаемой энергии перехватывается на удаленном конце и переизлучается в обратном направлении. Чем больше поверхность отражателя и чем меньше угловая расходимость выходящего из передатчика потока электромагнитной энергии, тем дальность действия дальномера при прочих равных условиях становится больше. В свою очередь, угловая расходимость зависит от длины волны используемых несущих колебаний, возрастающая с увеличением последней. Поэтому переход из оптического диапазона в ультракоротковолновый неизбежно связан с увеличением угловой расходимости излучаемой энергии. Такое увеличение приводит не только к значительному уменьшению дальности действия дальномера, но и к опасности получения «ложных» сигналов, отраженных от сторонних объектов, попадающих в зону облучения. В связи с вышесказанным при разработке современных фазовых радиодальномеров вместо пассивных отражателей преимущественно используют активные ответчики.

Основное требование, предъявляемое к таким ответчикам, состоит в том, чтобы обеспечить необходимое усиление переизлучаемых сигналов, причем время, которое затрачивают сигналы на прохождение по каналам активного ответчика, должно быть достаточно стабильным или исключаться из результатов дальномерных измерений за счет использования соответствующей методики.

Активный ответчик, применяемый в геодезических фазовых радиодальномерах и получивший название ведомой станции, в конструктивном отношении подобен основной станции радиодальномера, на которой выполняют фазовые измерения и которая получила название ведущей станции. В современных радиодальномерах очень часто обе станции делают одинаковыми, т. е. каждая станция может работать как в режиме «ведущей», так и в режиме «ведомой».

Основой для построения обобщенной функциональной схемы современного высокоточного дальномера с активным ответом послужила схема, предложенная в начале 30-х годов советскими учеными Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси. Эта схема является логическим развитием схемы, приведенной на рис. 14 для пояснения принципа низкочастотного метода фазовых измерений. Непосредственно из этой схемы видно, что при размещении на одной из станций радиодальномера генератора, возбуждающего колебания с частотой ω_1 , смесителя *I* и фазоизмерительного устройства, а на другой станции — вспомогательного генератора с частотой ω_2 и смесителя *II*, может быть создан дальномер, схема которого приведена на рис. 26.

Рассмотрим принцип действия такой схемы и выведем для нее рабочую формулу, по которой вычисляют величину измеряемого расстояния *D*.

Генератор ведущей станции на данной схеме представляет

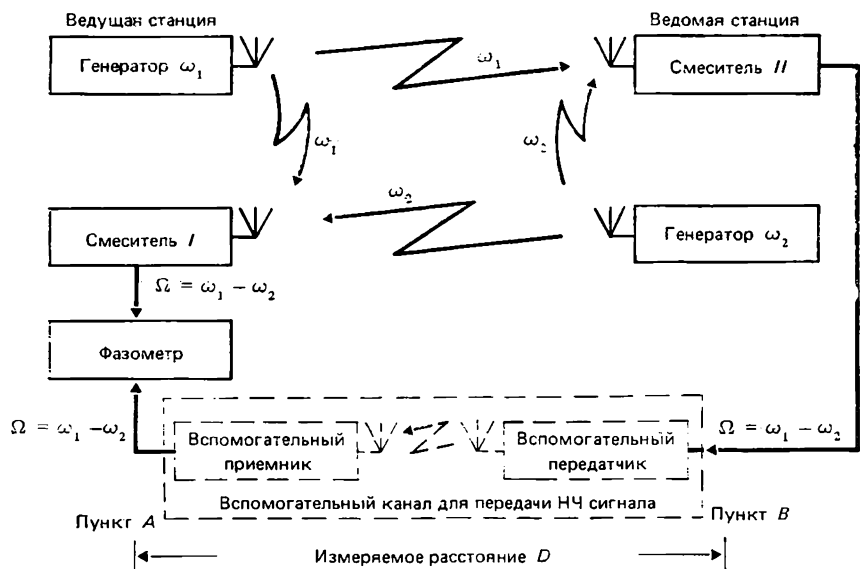


Рис. 26. Упрощенная схема радиодальномера, базирующаяся на низкочастотном методе фазовых измерений

собой источник гармонических колебаний, текущая фаза которых в общем виде описывается формулой (16),

$$\theta_1(t) = \omega_1 t + \varphi_{01}, \quad (86)$$

где ω_1 и φ_{01} — угловая частота и начальная фаза этих колебаний; t — текущее время.

С помощью антенной системы гармонические колебания излучаются в направлении удаленной станции, а частично попадают и на вход собственной приемной антенны. Следовательно, передающая антенна ведущей станции является в данном случае тем разделительным узлом, в котором информационный сигнал отделяется от опорного.

Для информационного сигнала, прошедшего путь от ведущей станции до ведомой, текущая фаза на входе смесителя II в соответствии с формулой (17) определяется соотношением

$$\theta_{1B}(t) = \omega_1 \left(t - \frac{D}{v} \right) + \varphi_{01}, \quad (87)$$

где D — измеряемая дальность; v — скорость распространения радиоволн на участке от ведущей станции до ведомой.

В состав удаленной ведомой станции также входит независимо работающий генератор гармонических колебаний, частота которого несколько отличается от частоты генератора ведущей станции. Если обозначить частоту генератора ведомой станции

через ω_2 , а начальную фазу — через φ_{0_2} , то по аналогии с уравнением (86) можно записать

$$\theta_2(t) = \omega_2 t + \varphi_{0_2}. \quad (88)$$

Антенная система ведомой станции, в свою очередь, излучает колебания с частотой ω_2 в направлении ведущей станции, причем частично эти колебания попадают на вход приемного устройства собственной станции, т. е. на вход смесителя II.

Поскольку генерирование колебаний с частотами ω_1 и ω_2 соответственно на ведущей и ведомой станциях происходит одновременно, то поступающие на вход смесителя II колебания с этими частотами смешиваются, и на выходе данного смесителя выделяются колебания разностной частоты с текущей фазой, равной разности текущих фаз колебаний, поступающих на вход смесителя:

$$\alpha_B(t) = \theta_{1B}(t) - \theta_2(t) = \Omega t - \omega_1 \frac{D}{v} + \varphi_{0_1} - \varphi_{0_2}, \quad (89)$$

где $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ — разностная частота.

Аналогичный процесс происходит и на входе приемного устройства ведущей станции, где опорный сигнал с частотой ω_1 смешивается с пришедшими с дистанции колебаниями с частотой ω_2 , имеющими текущую фазу:

$$\theta_{2A}(t) = \omega_2 \left(t - \frac{D}{v} \right) + \varphi_{0_2}. \quad (90)$$

Текущая фаза для колебаний разностной частоты на выходе смесителя I определяется при этом соотношением

$$\alpha_A(t) = \theta_1(t) - \theta_{2A}(t) = \Omega t + \omega_2 \frac{D}{v} + \varphi_{0_1} - \varphi_{0_2}. \quad (91)$$

Из анализа уравнений (89) и (91) нетрудно заметить, что колебания, текущая фаза которых описывается данными уравнениями, имеют одинаковую частоту и содержат составляющую фазового сдвига, пропорциональную величине измеряемого расстояния. Поэтому по измеренной разности фаз между указанными колебаниями нетрудно вычислить интересующую нас величину D . Однако отмеченные колебания существуют на удаленных друг от друга станциях. В связи с этим возникает необходимость передачи одного из низкочастотных сигналов с одной станции на другую. Обычно такую передачу осуществляют с ведомой станции на ведущую по специальному радиоканалу. На рис. 26 этот канал, в состав которого входят вспомогательные передатчик и приемник, условно показан штриховыми линиями. Следует заметить, что при такой передаче низкочастотные колебания получают дополнительные фазовые сдвиги, обусловленные временем прохождения по электрическим цепям ведомой станции, измеряемого расстояния от vedo-

мой станции до ведущей и временем прохождения по электрическим цепям ведущей станции от входа вспомогательного приемника до фазометра. В результате в фазоизмерительное устройство со стороны вспомогательного приемника поступают колебания разностной частоты Ω с текущей фазой, равной

$$\beta_B(t) = \alpha_B(t) - \Delta\varphi_B - \Omega \frac{D}{v} - \Delta\varphi_A', \quad (92)$$

где $\Delta\varphi_B$ — дополнительный фазовый сдвиг, обусловленный временем прохождения колебаний с частотой Ω от смесителя II до выхода вспомогательного передатчика на ведомой станции; $\Delta\varphi_A'$ — дополнительный фазовый сдвиг, характерный для тех же колебаний на участке от входа вспомогательного приемника до фазометра ведущей станции.

Если учесть, что $\Omega = \omega_1 - \omega_2$, и раскрыть значение $\alpha_B(t)$, определяемое формулой (89), то соотношение (92) принимает вид

$$\beta_B(t) = \Omega t - 2\omega_1 \frac{D}{v} + \omega_2 \frac{D}{v} + \varphi_{01} - \varphi_{02} - \Delta\varphi_B - \Delta\varphi_A'. \quad (92a)$$

Для колебаний, поступающих на другой вход фазометра со стороны смесителя I, имеем

$$\beta_A(t) = \alpha_A(t) - \Delta\varphi_A = \Omega t + \omega_2 \frac{D}{v} + \varphi_{01} - \varphi_{02} - \Delta\varphi_A, \quad (93)$$

где $\Delta\varphi_A$ — дополнительный фазовый сдвиг, который приобретают колебания с частотой Ω на участке от смесителя I до фазометра на ведущей станции. С помощью фазометра измеряют разность фаз колебаний, текущие фазы которых определяются соотношениями (92 а) и (93):

$$\psi' = \beta_A(t) - \beta_B(t) = 2\omega_1 \frac{D}{v} + \gamma, \quad (94)$$

где $\gamma = \Delta\varphi_B + \Delta\varphi_A' - \Delta\varphi_A$ — суммарная фазовая поправка, возникающая за счет задержек сигналов при их прохождении по электрическим цепям ведущей и ведомой станций.

На основании соотношения (94) нетрудно получить исходную формулу для вычисления расстояния D :

$$D = \frac{v}{2\omega_1} (\psi' - \gamma) = \frac{\lambda_1}{2} \frac{\psi' - \gamma}{2\pi}, \quad (95)$$

где $\lambda_1 = 2\pi \frac{v}{\omega_1}$ — длина волны колебаний с частотой ω_1 .

Отметим основные особенности рассмотренной схемы дальнометра:

1. Фазометр в данной схеме работает на разностной частоте Ω , а измеряемая разность фаз ψ' пропорциональна более

высокой частоте ω_1 генератора ведущей станции, т. е. частоте той станции, на которой выполняются фазовые измерения.

2. Измеряемая разность фаз ψ' не зависит ни от частоты ω_2 генератора ведомой станции, ни от начальных фаз колебаний, возбуждаемых генераторами обеих станций.

3. В качестве «метра», которым измеряется расстояние, используется длина волны λ_1 , определяемая частотой ω_1 ведущей станции. В связи с этим данную частоту часто называют масштабной и к ней предъявляют высокие требования в отношении стабильности ее значения. Что же касается частоты ω_2 генератора ведомой станции, то она может иметь более низкую стабильность.

4. Для реализации рассмотренной схемы необходимо между удаленными станциями иметь три канала для передачи интересующей нас информации, в то время как в дальномерах с пассивным ответом нужно только два таких канала.

Из других особенностей анализируемой схемы следует отметить свойственную этой схеме условность понятия опорного и информационного сигналов, так как в соответствии с формулами (92 а) и (93) оба поступающих в фазометр сигнала несут в себе информацию о величине измеряемого расстояния D . Кроме того, роль приведенной на рис. 26 ведомой станции как активного ответчика не сводится лишь к переизлучению принимаемого сигнала. Эта станция не только переизлучает принятый сигнал на преобразованной низкой частоте Ω , но и независимо излучает собственные колебания на частоте ω_2 .

Однако, несмотря на отмеченные особенности работы ведомой станции, приведенная на рис. 26 схема дальномера с полным основанием может быть отнесена к схемам с активным ответом, так как в отличие от схем с пассивными отражателями, где излучаемые колебания обязательно проходят измеряемое расстояние дважды, в этой схеме все излучаемые колебания проходят искомое расстояние только в одном направлении.

Рассмотрим принцип учета поправки γ , которая должна быть или измерена каким-либо независимым способом, или исключена из результатов измерений за счет применения соответствующей методики. В современных радиодальномерах нашел широкое применение последний метод.

Сущность этого метода состоит в том, что на ведомой станции вместо одного генератора с частотой ω_2 используют два генератора с частотами ω_2 и ω'_2 , для которых выполняется соотношение

$$\omega'_2 - \omega_1 = \omega_1 - \omega_2 = \Omega, \quad (96)$$

т. е. $\omega'_2 > \omega_1$, а $\omega_2 < \omega_1$ на одну и ту же величину Ω .

Проанализируем, каким изменениям подвергается рабочая формула (94), если измерения выполняются с использованием частоты ω'_2 . Прежде всего основное отличие состоит в том, что

отдельные слагаемые текущей фазы для колебаний с частотой Ω , образующихся на выходах смесителей I и II, меняют свои знаки. Это обусловлено тем, что в качестве уменьшаемого в разностях, используемых в формулах (89) и (91), всегда служит текущая фаза тех колебаний, частота которых выше. В связи с этим формулы (89) и (91) при использовании частоты ω'_2 принимают вид

$$\alpha_B'(t) = \theta_2(t) - \theta_{1B}(t) = \Omega t + \omega_1 \frac{D}{v} + \varphi'_{02} - \varphi_{01};$$

$$\alpha_A'(t) = \theta_{2A}(t) - \theta_1(t) = \Omega t - \omega_2 \frac{D}{v} + \varphi'_{02} - \varphi_{01},$$

где $\Omega = \omega'_2 - \omega_1$; φ'_{02} — начальная фаза колебаний с частотой ω'_2 .

По аналогии с выполненными выше математическими выкладками получим исходную формулу для измеряемой фазометром разности фаз, которая при использовании частоты ω'_2 принимает вид

$$\psi'' = \beta_A(t) - \beta_B(t) = -2\omega_1 \frac{D}{v} + \gamma.$$

Сопоставление этой формулы с формулой (94) (которые отличаются тем, что на ведомой станции использованы различные частоты) свидетельствует о том, что при выполнении условия (96) составляющая фазового сдвига, пропорциональная величине измеряемого расстояния, изменяет свой знак на противоположный, а поправка γ сохраняет при этом свой знак. В результате при последовательных измерениях с использованием на ведомой станции частот ω_2 и ω'_2 и последующем взятии полуразности отсчетов ψ' и ψ'' будем иметь

$$\psi = \frac{\psi' - \psi''}{2} = 2\omega_1 \frac{D}{v}. \quad (97)$$

Из полученного соотношения следует, что полуразность измеренных значений ψ' и ψ'' оказывается свободной от дополнительных фазовых сдвигов, характеризуемых величиной γ .

Решая уравнение (97) относительно искомого расстояния D и дополняя его значением приборной поправки K , физический смысл которой раскрыт в § 15, получим

$$D = \frac{v}{2\omega_1} \psi + K. \quad (98)$$

или с учетом того, что $\psi = \omega_1 \tau$,

$$D = \frac{v\tau}{2} + K, \quad (99)$$

где τ — время, которое затрачивают радиоволны на прохождение искомого расстояния в прямом и обратном направлениях.

Соотношение (99) наиболее часто используется в качестве основной рабочей формулы при радиодальномерных измерениях.

Один из основных недостатков приведенной на рис. 26 схемы состоит в том, что в ней совмещены функции несущих и масштабных колебаний. Такое совмещение создает значительные трудности при реализации схем высокоточных фазовых дальномеров. Кроме того, наличие в данной схеме дополнительных передатчика и приемника существенно усложняет конструкцию станций радиодальномера и их эксплуатацию.

В современных высокоточных фазовых радиодальномерах отмеченные недостатки устраняются посредством разделения функций несущих и масштабных колебаний. При этом в качестве несущих колебаний используются колебания УКВ диапазона, а в качестве масштабных — колебания с оптимальными для фазовых измерений частотами (от 1,5 до 100—150 МГц). Несущие колебания, излучаемые ведомой станцией, используются в таких дальномерах для одновременной передачи двух сигналов: сигнала с частотой ω_2 , а также низкочастотного сигнала с частотой Ω . При этом отпадает необходимость использования вспомогательных передатчика и приемника. Обобщенная функциональная схема, удовлетворяющая перечисленным выше требованиям, приведена на рис. 27.

Непосредственно из рисунка видно, что передающая часть как ведущей, так и ведомой станции состоит из тех же основных узлов, что и передающая часть дальномера с пассивным ответом, т. е. из источника несущих колебаний, модулятора и генератора масштабной частоты (на ведомой станции роль последнего выполняет генератор вспомогательной частоты). Основные требования, которые предъявляются к этим узлам в дальномерах с активным и пассивным ответами, также имеют много общего. В частности, к источнику несущих СВЧ колебаний предъявляется, прежде всего, такое требование, как обеспечение генерирования колебаний необходимой амплитуды в заданном диапазоне частот. Модулятор должен с высокой скоростью эффективно управлять одним из параметров несущих колебаний под воздействием колебаний, поступающих от генератора масштабной или вспомогательной частот.

В современных фазовых УКВ радиодальномерах значительно чаще, чем в светодальномерах, объединяют функции источника излучения с модулятором. В таких случаях к источнику СВЧ колебаний предъявляются все те требования, которым должен удовлетворять модулятор.

В качестве основного вида модуляции в радиодальномерах рассматриваемого типа используют, как правило, частотную модуляцию.

К входящему в состав передатчика ведущей станции генератору масштабной частоты предъявляются те же требования, что и к аналогичным генераторам, используемым в дальних с пассивным ответом. Что же касается генератора вспомогательной частоты, входящего в состав ведомой станции, то требования к стабильности его частоты определяются, прежде всего, необходимостью сохранения в процессе проведения дальномерных измерений постоянства разностной частоты $\Omega = \omega_1 - \omega_2$, так как при уходах упомянутой частоты может нарушаться градуировка фазометра, а также неполностью исключаться задержки сигналов в электрических цепях станций за счет использования рассмотренной выше методики с применением частот ω_2 и ω'_2 .

Поступающие с выхода передатчиков ведущей и ведомой станций модулированные колебания проходят через разветвитель, где часть энергии этих колебаний ответвляется в собственный приемник для создания опорного сигнала, а основная часть этой энергии излучается с помощью антенной системы в направлении удаленной станции.

К антенным системам, используемым в высокоточных УКВ радиодальномерах, предъявляются те же требования, что и к передающим оптическим системам светодальномеров, т. е. сконцентрировать излучаемый поток по возможности в узкий пучок, ориентированный на удаленную станцию. Однако из-за различия в длинах волн угол расходимости такого луча в радиодальномерах значительно больше, чем в светодальномерах, и оценивается величиной в несколько градусов.

Конструктивно функции передающей и приемной антенных систем в радиодальномерах рассматриваемого типа всегда объединяются, т. е. одна и та же антенна одновременно используется и для передачи, и для приема интересующих нас сигналов.

Что касается приемных устройств ведущей и ведомой станций, то их назначение несколько различно.

Основное назначение приемного устройства ведомой станции состоит в том, чтобы смешать принимаемый от ведущей станции сигнал масштабной частоты ω_1 с собственным сигналом вспомогательной частоты ω_2 , выделить образующиеся при этом колебания разностной частоты Ω и передать этот сигнал на ведущую станцию.

Следует отметить, что при наличии несущих частот процесс смешения получается более сложным, чем на схеме, изображенной на рис. 26. Для его реализации частотно-модулированные колебания УКВ диапазона как от своей, так и от удаленной станций поступают с выхода разветвителя (см. рис. 27) на вход СВЧ смесителя, с помощью которого производится выделение колебаний промежуточной частоты, равной разности несущих частот $\omega_{пр} = \omega_{н2} - \omega_{н1}$, причем эти колебания оказы-

ваются модулированными по амплитуде информационным сигналом разностной частоты Ω . Для того чтобы выделить этот сигнал из модулированных колебаний промежуточной частоты, применяют амплитудный детектор, нормальный режим работы которого требует подачи на него колебаний определенного уровня. В связи с этим возникает необходимость усиления колебаний промежуточной частоты, для чего используется усилитель промежуточной частоты (УПЧ).

Образующийся на выходе амплитудного детектора информационный сигнал с частотой Ω необходимо передать на ведущую станцию, для чего этот сигнал поступает в модулятор, на который одновременно поступают и колебания от генератора вспомогательной частоты ω_2 . Таким образом, два различных сигнала с частотой ω_2 и Ω передаются с ведомой станции на ведущую на одной несущей частоте, вследствие чего на ведущей станции возникает необходимость разделения информации, которую несут эти два сигнала.

Для облегчения такого разделения сигнал разностной частоты Ω на пути от амплитудного детектора до модулятора ведомой станции подвергается дополнительному кодированию с помощью соответствующего кодирующего устройства. Сущность кодирования сводится, как правило, к преобразованию сигнала разностной частоты в модулированные колебания поднесущей частоты, а иногда к изменению формы или частоты этого сигнала.

На основе вышензложенного приемное устройство ведомой станции радиодальномера должно включать такие основные узлы, как СВЧ смеситель, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), амплитудный детектор и кодирующее устройство. Взаимосвязь этих узлов показана на рис. 27.

Функции приемного устройства ведущей станции несколько шире, так как оно должно не только обеспечить рассмотренный выше процесс смешения, усиления и выделения сигнала разностной частоты по той же схеме, что и на ведомой станции, но и осуществить прием и восстановление сигнала с частотой Ω , передаваемого с ведомой станции на ведущую, а также выполнить фазовые измерения, на основе которых определяется величина искомого расстояния. В этой связи в состав приемного устройства ведущей станции наряду с такими уже рассмотренными узлами, как СВЧ смеситель, УПЧ и амплитудный детектор, которые характерны для обеих станций радиодальномера, входят и такие, свойственные только ведущей станции основные узлы, как частотный детектор, декодирующее устройство и фазометр.

С помощью первых двух узлов происходит восстановление низкочастотного сигнала, который передается с ведомой станции на ведущую. Назначение фазоизмерительного устройства

полностью совпадает с функциями аналогичного устройства, входящего в состав дальномера с пассивным ответом.

Взаимодействие основных узлов, из которых состоит приемное устройство ведущей станции, показано на обобщенной функциональной схеме УКВ радиодальномера (см. рис. 27).

Более подробно назначение и принцип действия перечисленных выше основных узлов, входящих в состав дальномеров как с пассивным, так и с активным ответом, рассмотрены в последующих параграфах настоящей главы, а также при разборе конкретных схем свето- и радиодальномеров.

§ 19. ИСТОЧНИКИ НЕСУЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Поскольку во всех дальномерах рассматриваемого типа перенос информационных сигналов масштабной частоты с одного конца измеряемой линии на другой осуществляется с помощью несущих колебаний, то источник таких колебаний является неотъемлемой частью любого геодезического свето- и радиодальномера.

Оптический и ультракоротковолновый диапазоны несущих колебаний, которые используются соответственно в дальномерах с пассивным и активным ответом, различаются между собой прежде всего длинами волн. Для оптического диапазона длины волн применяемых несущих колебаний измеряются десятками долями микрометра, а рассматриваемого нами УКВ диапазона — сантиметрами и реже миллиметрами. Такое существенное количественное различие в длинах волн приводит к глубоким качественным изменениям во многих свойствах и особенностях распространения электромагнитных волн отмеченных диапазонов. Качественно изменяются при этом и способы возбуждения электромагнитных колебаний различных диапазонов. Поэтому для удобства изучения особенностей работы интересующих нас возбудителей несущих колебаний рассмотрим эти две разновидности источников отдельно.

Источники излучения оптического диапазона

В современной классификации к оптическому диапазону относятся электромагнитные колебания с длинами волн от 0,001 мкм до 1 мм. Однако не все волны данного диапазона в одинаковой степени удовлетворяют тем требованиям, которые предъявляются к ним при выполнении дальномерных измерений.

При прохождении колебаний оптического диапазона через приземные слои атмосферы предпочтения заслуживают красный и ближний к нему инфракрасный участки оптического спектра. Но при решении вопроса, связанного с выбором оптимальных длин волн несущих колебаний, приходится прини-

мать в расчет не только условия прохождения этих колебаний через атмосферу, но и наличие соответствующих источников излучения с требуемыми техническими характеристиками. В этой связи в дополнение к информации, содержащейся в § 2, рассмотрим основные требования, которые предъявляются к источникам излучения, используемым в современных светодальномерах.

Поскольку основное назначение несущих колебаний состоит в том, чтобы обеспечить перенос информационных сигналов с одного конца измеряемой линии на другой и обратно, то одно из основных требований, предъявляемых к излучателям, состоит в том, чтобы обеспечить необходимый энергетический уровень излучаемых колебаний. Этот уровень выбирается из тех соображений, чтобы излучаемый сигнал несущей частоты после его прохождения до отражателя и обратно был достаточен для уверенной работы приемного устройства дальномера.

Количественно энергетические способности излучателя оцениваются величиной лучистого потока, под которым понимают среднюю мощность излучения за время, существенно превышающее период генерируемых электромагнитных колебаний оптического диапазона. Обычно этот параметр обозначают через Φ или P и измеряют его в ваттах [или в производных этой величины единицах — милливаттах (мВт), мегаваттах (МВт) и т. д.].

Наряду с указанным энергетическим параметром в оптическом диапазоне мощность излучения традиционно оценивают и по той реакции, которую она производит на глаз человека, обладающий различной чувствительностью к электромагнитным колебаниям различной частоты. Такой подход привел к созданию своей системы световых величин, имеющих свои условные обозначения и единицы измерения. Так, аналогом лучистого потока (или мощности излучения) в световой системе единиц является световой поток, измеряемый в люменах. Применительно к рассматриваемой дальномерной технике мы в дальнейшем будем преимущественно пользоваться системой энергетических единиц и лишь в отдельных случаях прибегать к аналогам, входящим в систему световых единиц.

Возвращаясь к рассмотрению требований, которые предъявляются к используемым в дальномерной технике излучателям, отметим, что для обеспечения максимальной дальности действия дальномера важно не просто излучать в окружающее пространство достаточно интенсивные электромагнитные колебания, но и сформировать излучение в узконаправленный луч, ориентированный на удаленный отражатель. На такое формирование потока излучения в пространстве существенное влияние оказывает не только используемая в дальномерах оптическая система, но и характерные особенности самого излучателя. В частности, с увеличением размеров площади светящегося

тела увеличивается и его изображение в плоскости отражателя, т. е. увеличивается расходимость посылаемого пучка света. При этом значительная часть лучистого потока будет бесполезно проходить мимо отражателя. Для устранения этого нежелательного явления стремятся использовать в дальномерах излучатели с небольшой поверхностью излучения. Параметр, учитывающий не только величину мощности излучения, но и размеры излучающей поверхности, получил название поверхностной плотности потока излучения. Этот параметр измеряется в ваттах на квадратный метр (или в производных единицах — $\text{мВт}/\text{мм}^2$, $\text{мВт}/\text{см}^2$ и т. д.).

Наряду с размерами поверхности излучения важным показателем излучателя являются его направленные свойства, для чего вводится оценка величины лучистого потока в единичном телесном угле в интересующем нас направлении. Параметр, характеризующий величину поверхностной плотности потока излучения в единичном телесном угле, называют энергетической яркостью излучающей поверхности и измеряют в единицах мощности, отнесенных к единице поверхности и к единичному телесному углу. Аналогом этого параметра в световой системе единиц является яркость.

Из перечисленных выше параметров яркость излучающей поверхности наиболее полно характеризует ту полезную часть лучистого потока, которая участвует в переносе информационного сигнала и которая достигает приемного устройства дальномера. Поэтому при расчете дальности действия светодальномера используют упомянутый параметр.

Следующей важной физической характеристикой излучателя, существенно влияющей на эксплуатационные характеристики дальномера, является спектр излучения используемого источника, под которым понимают распределение мощности излучения в зависимости от длины волны (или от частоты). Различают источники с широким и узким спектром излучения. При выполнении дальномерных измерений предпочтения заслуживают узкополосные источники излучения. Это объясняется тем, что для обеспечения работоспособности дальномера не только в ночных, но и в дневных условиях необходимо уметь отделять в приборе полезный сигнал от мешающего воздействия широкополосного солнечного излучения. Такая задача решается достаточно успешно при использовании источников с узким спектром излучения в сочетании со светофильтрами. Последние представляют собой оптические приспособления, пропускающие через себя излучения только той части спектра, которая попадает в полосу пропускания применяемых светофильтров.

Концентрация используемого в светодальномере излучения в узком спектральном диапазоне существенно облегчает также и решение задачи, связанной с определением рабочей скорости распространения несущих колебаний оптического диапазона.

В этой связи напомним, что в оптическом участке спектра электромагнитных волн скорость распространения излучений с различными длинами волн из-за влияния дисперсии имеет различные значения. Если для переноса информационного сигнала используется оптическое излучение с большим набором различных длин волн, то вопрос о том, какая же длина волны должна быть применена при расчете интересующей нас скорости, нуждается в пояснении. Для решения отмеченной проблемы прибегают к замене всего набора длин волн одной, так называемой «эффективной» длиной волны. Методика расчета такой длины волны во многих случаях приводит к появлению дополнительных погрешностей измерения длин линий.

Помимо рассмотренных выше требований к ширине спектра излучения важным фактором является также поляризованность излучаемых колебаний. Для пояснения этого физического параметра напомним, что электромагнитные колебания относятся к колебаниям поперечного типа, т. е. характеризующие эти колебания векторы напряженности электрического и магнитного поля лежат в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения колебаний. В естественном или неполяризованном свете упомянутые векторы могут занимать в такой плоскости произвольное бессистемное положение. В отличие от этого в поляризованном свете положение отмеченных векторов подчиняется вполне определенной закономерности. Так, для линейно поляризованного света вектор напряженности электрического (а следовательно, и магнитного) поля фиксирован строго в одном направлении. Плоскость, проходящая через этот вектор и направление распространения света, получила название плоскости поляризации.

Следует заметить, что для обеспечения нормальной работоспособности модуляторов света, применяемых в светодальномерах, необходимо использовать поляризованный свет. Естественный неполяризованный свет, который излучают такие широко распространенные источники, как лампы накаливания, может быть преобразован в поляризованный с помощью специальных оптических устройств, получивших название поляроидов. Однако такое преобразование неизбежно связано с большими потерями света. Поэтому весьма желательно, чтобы используемые в дальномерах источники излучали поляризованный свет.

Наряду с рассмотренными выше параметрами излучателей, характеризующими их физические особенности работы, значительный интерес представляют и эксплуатационные характеристики таких источников, определяющие технико-экономическую целесообразность их использования. В частности, для создания легких, портативных и экономичных дальномеров немаловажными являются такие показатели излучателя как его габарит, масса, коэффициент полезного действия, представляющий собой отношение мощности излучения к той мощности, которую

потребляет излучатель от источника питания, а также целый ряд других вспомогательных факторов.

Для того чтобы оценить, насколько полно удовлетворяют всем перечисленным выше требованиям реально используемые в современных дальномерах излучатели, охарактеризуем вкратце состояние развития интересующих нас источников излучения.

Исторически сложилось так, что в конце 50-х и начале 60-х годов, когда фазовые светодальномеры стали широко применяться в геодезической практике, излучателями в них служили лампы накаливания и газоразрядные источники света. Широкий спектр излучения этих источников, перекрывающийся со спектром солнечного освещения, не позволял эффективно эксплуатировать светодальномеры тех лет в дневных условиях. Сравнительно малая яркость ламп накаливания существенно ограничивала дальность действия дальномера, а низкий коэффициент полезного действия обуславливал значительное потребление электроэнергии от источников питания.

Перечисленные выше недостатки привели к тому, что во второй половине 60-х годов упомянутые источники излучения были заменены в светодальномерах разработанными к тому времени оптическими квантовыми генераторами (лазерами) и светодиодами.

Не останавливаясь в этой связи на анализе таких перспективных излучателей, как лампы накаливания и газоразрядные источники света, рассмотрим основные особенности работы тех типов лазеров и светодиодов, которые находят преимущественное распространение в современных геодезических светодальномерах.

Переходя к краткому анализу особенностей работы таких излучателей, как лазеры, необходимо отметить, что эти источники света по своему принципу действия существенно отличаются от тепловых излучателей, к которым относятся лампы накаливания. Исходя из этого, рассмотрим в самых общих чертах механизм излучения электромагнитных колебаний в оптическом диапазоне.

Как известно, излучение света в окружающее пространство неразрывно связано с внутриатомными процессами, и в частности, с переходом атома из одного энергетического состояния в другое. При поглощении энергии наблюдается переход атома на более высокий энергетический уровень. Такое состояние атома называют возбужденным. Как правило, указанное состояние является нестабильным. Обратный переход атома на основной нижний энергетический уровень сопровождается в большинстве случаев выделением энергии в виде кванта (фотона). Энергия кванта, а также свойственная ему частота электромагнитного излучения зависят от разности энергетиче-

ских уровней, между которыми осуществляется переход. Количественно эта зависимость определяется соотношением $h\nu = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$, где ε_1 и ε_2 — упомянутые выше энергетические уровни атома, ν — частота излучаемых колебаний, h — постоянная Планка. Из приведенного соотношения следует, что переход между двумя вполне определенными энергетическими уровнями сопровождается излучением строго определенной частоты, а следовательно, и длины волны, что визуально воспринимается нами как излучение соответствующего данной частоте цвета.

В нагретых телах возбуждение атомов осуществляется, в основном, за счет взаимного столкновения. При этом в зависимости от величины полученной энергии атом может занять один из разрешенных вышележащих энергетических уровней. Поскольку возбуждение атомов при нагревании вещества происходит хаотически, то и обратные переходы с различных вышележащих уровней также осуществляются хаотически, т. е. бессистемно. Возникающее при этом излучение называют спонтанным (или самопроизвольным). Вследствие того, что в излучении участвуют кванты с различной энергией, причем возникновение их не согласовано во времени, то частотный спектр излучения получается при этом широким, а яркость излучения, как правило, невысокой. Рассмотренный механизм возбуждения характерен для таких источников излучения, как лампы накаливания.

Наряду со спонтанным излучением существует другой вид излучения, получивший название стимулированного (или индуцированного) и нашедший применение в лазерах.

Отличительная особенность такого вида излучения состоит в том, что возбуждение атомов осуществляется вспомогательными источниками энергии (генераторами накачки). При этом атомам сообщается такое количество энергии, чтобы они преимущественно переходили на один и тот же вышележащий энергетический уровень. В результате происходит постепенное заселение этого уровня. Если количество атомов на данном уровне превышает число атомов, находящихся на основном нижнем уровне, то такое состояние называют инверсией населенности.

Характерная черта отмеченного состояния излучающего (или, как его называют в лазерной технике, активного) вещества состоит в том, что оно приобретает свойство усиливать свет. Так, если в результате спонтанного излучения одного из возбужденных атомов образуется фотон с энергией, равной разности используемых энергетических уровней, то он, попадая в сферу влияния другого возбужденного атома, не только не поглощается, но стимулирует излучение второго фотона с той же энергией. Вследствие этого при наличии в активной среде достаточного количества возбужденных атомов начинает развиваться лавинообразный процесс образования фотонов, энер-

гия которых одинакова, а соответствующие им частоты электромагнитного излучения совпадают. Однако направления движения этих фотонов произвольны, и без принятия специальных мер они очень быстро выходят за пределы активной среды.

Для того чтобы сделать лавинообразный процесс более интенсивным, а излучение направленным, активное вещество помещают между двумя зеркалами, при отражении от которых создаются условия для многократного прохождения фотонов через активную среду. Такое устройство получило название оптического резонатора. Заметим, что обычно для создания резонирующего объема используют объемные резонаторы, охватывающие со всех сторон интересующий нас объем. В оптическом резонаторе отсутствуют боковые отражающие поверхности, из-за чего такие резонаторы называют открытыми.

С целью согласования по фазе электромагнитных излучений, обусловленных движущимися навстречу друг другу фотонами, необходимо создать в резонаторе условия для установления стоячей волны. Это достигается подбором расстояния между зеркалами, которое должно быть точно согласовано с длиной волны излучения.

Для вывода излучения в окружающее пространство одно из зеркал резонатора делают полупрозрачным. Узкая направленность луча обеспечивается за счет установления строгой параллельности между отражающими поверхностями, в результате чего в образовании лавинообразного процесса участвуют только те фотоны, направление движения которых совпадает с продольной осью резонатора.

Более детальное изучение свойств индуцированного излучения свидетельствует о том, что такое излучение происходит не на одной строго определенной частоте, а в некотором интервале частот. Графически зависимость интенсивности индуцированного излучения от частоты представляет собой спектральную зону определенной ширины (рис. 28, а). При помещении активного вещества в резонатор условия возбуждения выпол-

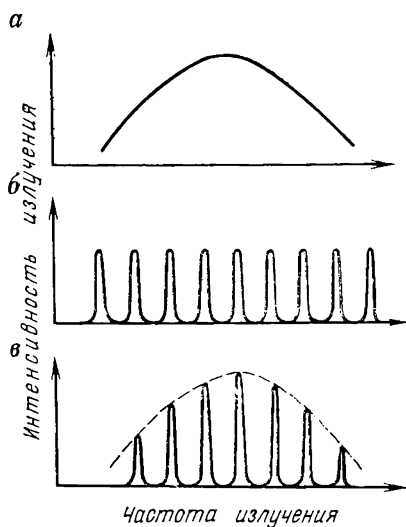


Рис. 28. Спектральное распределение интенсивности излучения лазерных источников:

а — изменение интенсивности излучения в пределах спектральной зоны; б — зоны, соответствующие условиям образования стоячих волн в резонаторе; в — спектр излучения лазера

няются не во всем показанном на рисунке интервале частот, а лишь на отдельных более узких участках (рис. 28, б), соответствующих условиям образования стоячей волны в резонаторе. В результате этого спектр излучения лазера представляет собой набор узких спектральных линий (рис. 28, в). Количество таких спектральных линий в излучаемом световом потоке зависит от физических свойств активного вещества, особенностей конструкции лазера и режима его работы.

В зависимости от типа возбуждаемых в резонаторе колебаний различают одномодовый и многомодовый режимы работы лазера.

При одномодовом режиме в поперечном сечении резонатора создаются условия для возникновения только одного типа колебаний. В то же время вдоль продольной оси резонатора, как правило, выполняются условия для возбуждения ряда колебаний различных частот, которые получили название аксиальных типов колебаний. В результате при одномодовом режиме работы спектр излучения состоит из набора равномерно отстоящих друг от друга монохроматических, т. е. одночастотных, колебаний (рис. 29, а). При длине резонатора в несколько десятков сантиметров частотный разнос между такими колебаниями составляет несколько сотен мегагерц. Если в лазере приняты специальные меры для селекции одного из аксиальных типов монохроматических колебаний, то такой режим работы называется одночастотным, который является частным случаем одномодового режима работы.

Характерная особенность многомодового режима состоит в том, что в объемном резонаторе одновременно выполняются условия для возбуждения различных типов колебаний как в поперечном, так и в продольном сечениях резонатора. Количество спектральных линий в рабочей зоне излучения при этом резко возрастает (рис. 29, б).

Сопоставление двух рассмотренных выше режимов работы лазера свидетельствует о том, что одномодовый режим заслуживает предпочтения в тех случаях, когда к источнику излучения предъявляются повышенные требования в отношении монохроматичности излучаемых колебаний. Что касается светодальномеров, то в них с успехом используются как одномодовые, так и многомодовые лазеры.

На основе рассмотренных выше особенностей работы лазеров представляется возможным сделать выводы о том, что данные источники обеспечивают высокую направленность излучения, а также позволяють сосредоточить излучаемую электромагнитную энергию в узком частотном спектре. Наряду с этим характерное для стимулированного излучения согласованное генерирование большого количества фотонов открывает возможность получения значительной мощности излучения, что в сочетании с небольшими поперечными размерами и направленностью вы-

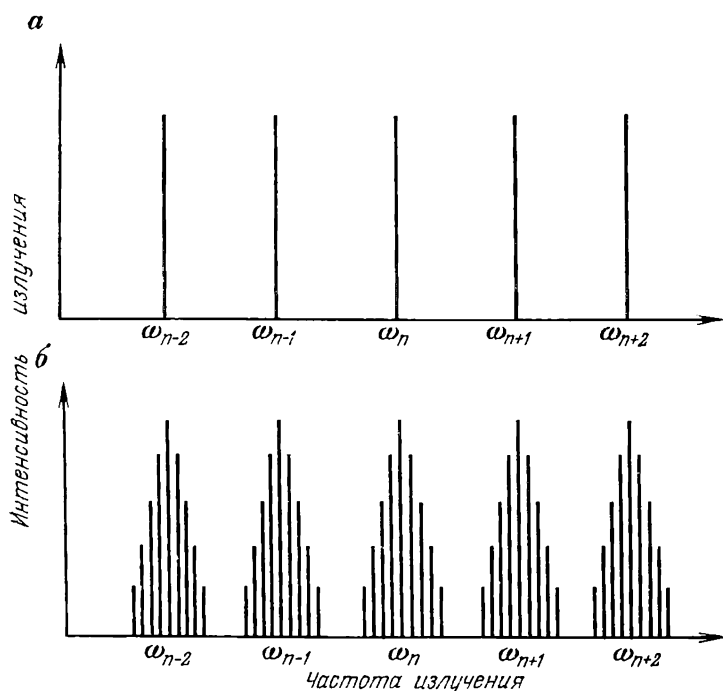


Рис. 29. Спектры излучения для одномодового (а) и многомодового (б) режимов работы лазера

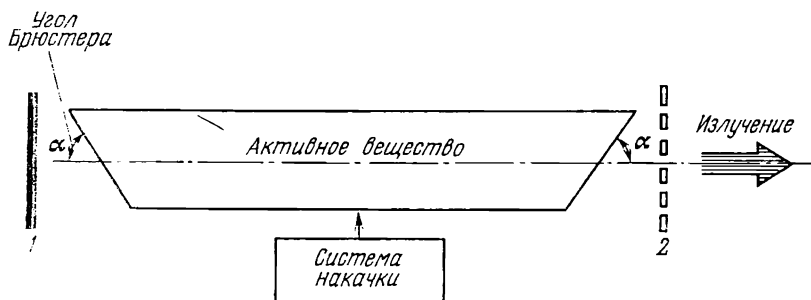


Рис. 30. Схема взаимодействия основных составных частей лазера

ходящего луча света обуславливает высокую энергетическую яркость.

Лазерные источники позволяют также решить задачу получения поляризованного излучения. Один из наиболее распространенных методов поляризации выходящего из лазера лучистого потока состоит в том, что для создания в резонаторе благоприятных условий прохождения только для колебаний с вполне

определенной плоскостью поляризации граничные поверхности активной среды делают наклонными по отношению к оси резонатора. Если угол наклона выбран равным углу Брюстера, который отличается тем свойством, что излучение, плоскость поляризации которого совпадает с плоскостью падения на поверхность раздела двух сред, проходит во вторую среду без отражения, то именно для такого излучения и будут созданы условия для свободного распространения в пределах резонатора. Для всех других излучений с произвольно ориентированными плоскостями поляризации поверхность раздела двух сред будет в той или иной степени отражающей, вследствие чего условия образования стоячих волн для таких излучений будут нарушаться.

Приведенный выше краткий анализ основных физических процессов, происходящих в лазерных источниках, позволяет без труда установить взаимодействие основных элементов, входящих в состав лазера. Схема такого взаимодействия изображена на рис. 30.

Показанное на этой схеме активное вещество составляет основу лазера, так как именно оно является источником индуцированного излучения. Система накачки используется для создания в активном веществе инверсионной населенности, порождающей индуцированное излучение. Оптический резонатор, состоящий из двух зеркал (непрозрачного 1 и полупрозрачного 2), служит для обеспечения многократного прохождения индуцированного излучения через активное вещество. Наклон под углом Брюстера торцевых поверхностей, ограничивающих активное вещество, обеспечивает получение поляризованного излучения.

В зависимости от вида используемого активного вещества лазеры подразделяют на твердотельные, жидкостные и газовые. В отдельную группу обычно выделяют полупроводниковые лазеры.

В современных свотодалномерах наиболее часто применяют газовые и полупроводниковые лазеры.

Характерная особенность всех газовых лазеров состоит в том, что в них используется газообразное активное вещество. В зависимости от специфики протекающих в таких средах физических процессов различают атомарные, ионные и молекулярные лазеры.

В дальномерной технике наиболее широкое распространение получил атомарный гелий-неоновый лазер (рис. 31). Основу такого лазера составляет заполненная смесью гелия и неона стеклянная или кварцевая трубка 3. Длина трубки в зависимости от мощности излучения выбирается достаточно протяженной (от 20—30 см до 1—2 м), что является одним из существенных недостатков всех газовых лазеров. К торцам трубки приваривают плоскопараллельные стеклянные или

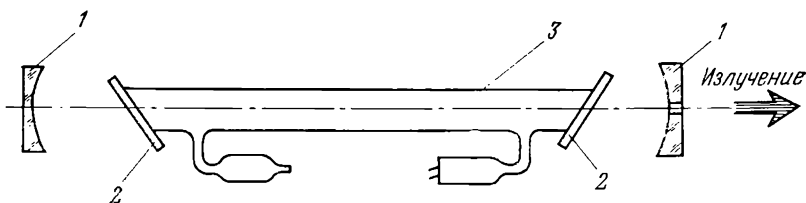


Рис. 31. Схематический вид конструкции гелий-неонового лазера

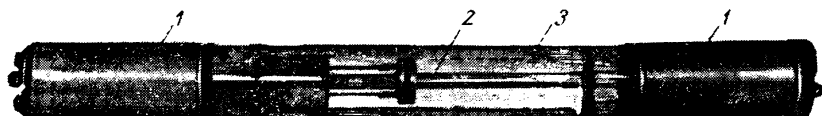


Рис. 32. Гелий-неоновый лазер ЛГ-78:

1 — отсеки, в которых смонтированы зеркала оптического резонатора и другие вспомогательные компоненты лазера; 2 — газоразрядная трубка, заполненная активной смесью (гелий с неоном); 3 — наружная стеклянная трубка

кварцевые пластинки 2, расположенные относительно оси трубки под углом Брюстера. По обе стороны от трубки размещают вогнутые или плоские зеркала 1, образующие оптический резонатор. Одно из этих зеркал, через которое световой луч выходит наружу, делают полупрозрачным или предусматривают в нем центральное отверстие. Система зеркал снабжается юстировочными приспособлениями для тщательной регулировки взаимного расположения зеркал.

Возбуждение активного вещества в гелий-неоновых лазерах обычно осуществляется с помощью тлеющего электрического разряда. Для создания такого разряда, образующегося в активном веществе за счет протекания через него постоянного тока, внутрь трубки вводят специальные электроды (анод и катод). К этим электродам подводят высокое напряжение (более тысячи вольт). Иногда тлеющий разряд в трубке получают за счет высокочастотного электромагнитного поля. На трубку при этом снаружи одевают кольцевые электроды, к которым подключают высокочастотный генератор.

Индукированное излучение в гелий-неоновом лазере создается атомами неона, а примесные атомы гелия играют вспомогательную роль. С их помощью осуществляется избирательное заселение только вполне определенных энергетических уровней атомов неона.

Атомы неона позволяют возбудить в резонаторе колебания с длинами волн 0,63; 1,15 и 3,39 мкм. Наибольшее распространение в дальномерной технике получило излучение с длиной волны 0,63 мкм, соответствующее красной части оптического спектра электромагнитных волн.

К настоящему времени разработано значительное количество различных модификаций гелий-неоновых лазеров. Применительно к светодальномерной технике наибольший интерес представляют лазеры, обеспечивающие мощность излучения не менее нескольких милливатт и имеющие минимальные размеры. В качестве примера приведем основные технические характеристики гелий-неонового лазера ЛГ-78, используемого в современных светодальномерах: режим работы — многомодовый, мощность излучения — 2 мВт, расходимость выходящего из лазера пучка — $10'$ при диаметре пучка 2,5 мм, длина лазера — 330 мм, его диаметр — 35 мм, масса прибора — 0,7 кг. На рис. 32 показан внешний вид лазера ЛГ-78 (без защитного кожуха).

Наряду с такими положительными характеристиками газовых лазеров, как высокая направленность выходящего светового пучка и концентрация излучения в узком спектральном диапазоне, рассмотренным источникам света свойственны и такие существенные недостатки, как значительные габариты и масса, отсутствие эффективных методов внутренней модуляции излучаемого лучистого потока, а также низкий коэффициент полезного действия (при мощности излучения, равной 2—5 мВт, потребляемая от источников питания мощность составляет 15—40 Вт, т. е. коэффициент полезного действия газового лазера характеризуется величинами порядка $1 \cdot 10^{-4}$). Из-за отмеченных выше недостатков газовые лазеры получили преимущественное распространение в светодальномерах, предназначенных для измерения линий значительной протяженности (от 3—5 до 60—80 км). Что касается портативных светодальномеров ближнего действия, то в них в качестве излучателей широко применяют полупроводниковые лазеры и светодиоды.

Отличительная особенность полупроводникового лазера состоит в том, что активным веществом в нем служит кристалл полупроводника. Этот кристалл формируется из двух составных частей с различными видами проводимости: электронной (*n*-типа) и дырочной (*p*-типа), т. е. представляет собой своеобразный полупроводниковый диод. Образующийся в таком диоде *p-n* переход обладает той особенностью, что при пропускании через него электрического тока в прямом направлении (т. е. в направлении, соответствующем низкому омическому сопротивлению) освобождающаяся при рекомбинации (соединении) электрона с дыркой энергия лишь частично передается кристаллической решетке полупроводника. Другая часть этой энергии излучается в виде квантов оптической части спектра. Соотношение между отмеченными видами энергии существенно зависит от выбора материала полупроводника. В настоящее время в качестве такого вещества с резко выраженными излучательными свойствами широкое распространение получило соединение галлия с мышьяком — арсенид галлия (GaAs).

Инверсия населенностей, необходимая для создания собственного лазера индуцированного излучения, образуется в полупроводниковых источниках в тех случаях, когда количество электронов, находящихся на дне зоны проводимости, превышает количество электронов, находящихся у потолка валентной зоны. Для заселения отмеченного участка зоны проводимости, которая в сравнении с валентной зоной характеризуется более высокими энергетическими уровнями, в полупроводниковых лазерах применяют различные методы накачки. К настоящему времени наибольшее распространение получил метод инжекции, под которым понимают «впрыскивание» носителей тока (дырок или электронов) в область электронно-дырочного перехода. Такая инжекция осуществляется за счет протекания через *p-n* переход электрического тока значительной величины. Наименьшая величина тока, при которой еще выполняются условия для создания инверсии населенности, получила название пороговой. Плотность порогового тока, необходимая для обеспечения лазерного режима работы, при комнатной температуре характеризуется тысячами ампер на квадратный сантиметр, причем при понижении температуры эта величина уменьшается.

Излучение, создаваемое полупроводниковыми арсенид-галлиевыми лазерами, соответствует ближней инфракрасной части оптического спектра (диапазон длин волн 0,8—0,9 мкм). Ширина спектра излучения существенно зависит от величины протекающего через *p-n* переход тока, а также от температуры, до которой нагревается кристалл полупроводника. Ориентировочно эта ширина оценивается величинами порядка $1 \cdot 10^{-4} \div 1 \times 10^{-3}$ мкм.

Основу конструкции используемых в дальномерной технике полупроводниковых инжекционных лазеров составляет кристалл из арсенида галлия, имеющий две зоны проводимости (рис. 33). Излучающей поверхностью в нем является *p-n* переход, ширина которого измеряется десятками долями миллиметра, а толщина — единицами микрометра. Передняя и задняя грани кристалла выполняют роль зеркальных поверхностей оптического резонатора, для чего эти грани тщательно полируются. Отражение света от таких поверхностей возникает за счет разности в коэффициентах преломления полупроводника и воздуха. Коэффициент отражения при этом составляет величину около 30%, что оказывается вполне достаточным для обеспечения в оптическом резонаторе условий генерации. Для подключения кристалла к источнику электрической энергии к наружным его граням привариваются проводники, образующие с телом полупроводника омические контакты.

Углы расхождения луча инжекционного лазера в плоскости *p-n* перехода составляют несколько градусов, а в перпендикулярной плоскости — около 10°.

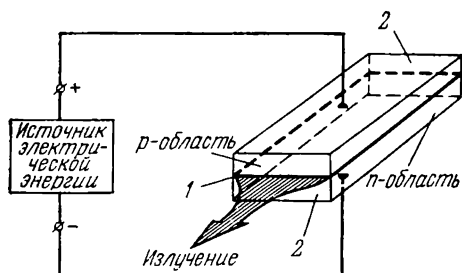


Рис. 33. Схематический вид конструкции полупроводникового лазера:

1 — p - n переход (активная область); 2 — зеркальные поверхности оптического резонатора

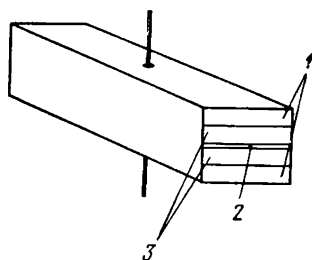


Рис. 34. Полупроводниковый лазер с переходами сложной структуры

1 — токопроводящие области из арсенида галлия p -типа и n -типа; 2 — активный излучающий слой арсенида галлия p -типа; 3 — области комплексного соединения $(Ga+Al)As$ p -типа и n -типа

Полупроводниковые лазеры характеризуются малыми габаритами и массой, небольшой потребляемой мощностью, а также сравнительно высоким коэффициентом полезного действия. Кроме того, за счет изменения протекающего через такой излучатель электрического тока имеется возможность управлять величиной интенсивности излучения, т. е. осуществлять модуляцию несущих колебаний без использования какого-либо внешнего модулятора света.

Основная трудность эксплуатации лазеров рассматриваемого типа состоит в том, что из-за больших плотностей порогового тока без принятия специальных мер наблюдается недопустимый перегрев кристалла. Во избежание такого перегрева полупроводниковый лазер или подвергают принудительному охлаждению, или ограничиваются использованием импульсного режима работы, при котором ток через кристалл протекает только в течение сравнительно коротких интервалов времени.

Проблема охлаждения полупроводниковых лазеров, применяемых в портативных полевых приборах, до настоящего времени не нашла достаточно эффективного технического решения. Поэтому при создании светодиономеров с полупроводниковыми излучателями стремятся использовать или импульсный режим работы, или создать условия, при которых удастся избежать перегрева излучателей.

В связи с вышеизложенным поиски методов, позволяющих существенно облегчить тепловой режим работы полупроводниковых излучателей, представляют значительный интерес.

Один из наиболее эффективных методов существенного снижения плотности порогового тока состоит в использовании кристаллов более сложной структуры. Следует заметить, что в рассмотренных выше кристаллах с простым p - n переходом (гомоструктурные лазерные диоды) длина свободного пробега

электронов во многих случаях превышает толщину этого перехода. В результате часть электронов не участвует в процессе создания стимулированного излучения. Кроме того, далеко не все образующиеся в процессе рекомбинации фотоны возникают в пределах активной зоны. Частично такой процесс наблюдается и в прилегающих к ней областях, где коэффициент поглощения света значительно больше, чем в активной области.

Отмеченные нежелательные явления в значительной степени устранены в инжекционных лазерах с гетеропереходами, т. е. с переходами сложной структуры. Активным слоем в лазерах такого типа служит тонкий слой арсенида галлия с дырочной проводимостью толщиной около одного микрометра. При использовании двусторонних гетероструктур активный слой заключается между двумя областями *n*- и *p*-типов комплексного соединения, в состав которого наряду с галлием и мышьяком входит алюминий — $(\text{Ga} + \text{Al}) \text{As}$ (рис. 34). Один из образующихся при этом переходов (типа *p-n*) служит для инъекции электронов, а другой переход (типа *p-p*) для отражения инжектированных электронов, препятствуя тем самым прохождению их за пределы активного слоя.

Применение рассмотренной сложной структуры позволяет уменьшить длину свободного пробега электронов, а также ограничить область распространения света активной зоной. В результате плотность порогового тока в полупроводниковых лазерах удается снизить в несколько десятков раз.

Другой метод, открывающий возможность эксплуатации полупроводниковых излучателей в непрерывном режиме на открытом воздухе, состоит в том, что плотность протекающего через диод тока не доводится до пороговой, а ограничивается допустимой для конкретного типа диода величиной. При этом вместо характерного для лазеров индуцированного излучения наблюдается спонтанное излучение, получившее название рекомбинационной люминесценции. В связи с этим полупроводниковые излучатели, работающие в таком режиме, называют люминесцентными светодиодами.

К существенным недостаткам нелазерных источников следует отнести прежде всего значительное уменьшение предельной мощности (на два-три порядка). Кроме того, у светодиодов существенно расширяется спектр излучения (до $1 \cdot 10^{-2} \div 3 \cdot 10^{-2}$ мкм).

Несмотря на недостатки, светодиоды широко используются в светотехнике как миниатюрные и экономичные источники света, обладающие малой инерционностью управления величиной излучаемого потока за счет изменения протекающего через такой источник электрического тока. В зависимости от условий эксплуатации спектр излучения различных светодиодов может существенно различаться (в настоящее время разработан широкий ассортимент светодиодов для работы в зеле-

ной, красной и ближней инфракрасной частях оптического спектра). Применительно к светодальномерной технике решающим фактором является величина излучаемой энергии. По данному параметру предпочтения заслуживают арсенид-галлиевые светодиоды, работающие, так же как и рассмотренные выше полупроводниковые лазеры, в ближней инфракрасной области оптического спектра.

В конструктивном отношении светодиоды и полупроводниковые лазеры имеют много общего. Одна из отличительных особенностей состоит в том, что в светодиодах отсутствует необходимость в оптическом резонаторе, вследствие чего соответствующие грани кристалла светодиода могут не подвергаться тщательной полировке. Вывод света в светодиодах может осуществляться не только из зоны расположения *p-n* перехода, но и через объем полупроводника, для чего используется специальная технология изготовления кристалла, а диоду придается соответствующая геометрическая форма (например, при выводе излучения через область с электронной проводимостью последней придается форма полусферы).

Один из наиболее существенных недостатков используемых в дальномерной технике полупроводниковых излучателей состоит в том, что из-за неизбежных дефектов формирования кристалла с требуемыми техническими характеристиками в нем возникают отдельные локальные участки, где условия для создания оптического излучения менее благоприятны (в светодиодах такие условия называют эффектом деградации электролюминесценции).

Обусловленная указанными причинами неоднородность интенсивности излучения в поперечном сечении пучка вызывает не только изменения величины принимаемого сигнала в зависимости от того, какой участок поперечного сечения пучка проектируется на удаленный отражатель, но и порождает наиболее заметные и трудноучитываемые ошибки светодальномерных измерений. Механизм возникновения таких ошибок, получивших в литературе название ошибок из-за «фазовости» светового пучка, до настоящего времени изучен недостаточно полно. Однако есть все основания полагать, что ошибки связаны с дополнительными временными задержками, возникающими в процессе модуляции несущих световых сигналов на упомянутых выше дефектных участках излучающей поверхности полупроводника, где наиболее ярко проявляется деградация оптического излучения.

Источники несущих колебаний сантиметрового и миллиметрового диапазонов

В современных высокоточных радиодальномерах в качестве несущих колебаний используются электромагнитные колебания с частотами от 3 до 36 ГГц, что соответствует длинам волн от

10 см до 8 мм. Источники колебаний отмеченного диапазона, получившие название сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов, по своему принципу действия существенно отличаются от рассмотренных выше источников несущих колебаний оптического диапазона. При этом несколько видоизменяются и параметры, по которым оцениваются интересующие нас генераторы несущих колебаний применительно к использованию их в дальномерной технике. Так, например, возбуждаемые в СВЧ генераторе электромагнитные колебания канализируются к передающей антенной системе с помощью специальных соединительных устройств — волноводов или коаксиальных линий. При таком способе передачи энергии к источнику СВЧ колебаний не предъявляют каких-либо требований в отношении направленности и поверхностной плотности потока излучения. При этом основным энергетическим параметром, характеризующим используемые в дальномерной технике СВЧ генераторы, является мощность излучения, измеряемая в ваттах или милливаттах.

Что касается спектральных свойств источников СВЧ колебаний, в радиодиапазоне значительно проще решается проблема получения интересующих нас монохроматических колебаний, т. е. колебаний одной определенной частоты. Кроме того, в отличие от источников оптического диапазона имеется возможность плавно изменять частоту генерируемых несущих колебаний, в результате чего реализация рассмотренной выше схемы дальномера с активным ответом не вызывает затруднений.

Многие типы СВЧ генераторов позволяют управлять одним из параметров несущих колебаний, т. е. одновременно выполняют роль и генератора, и модулятора. В этой связи возникает необходимость создания в генераторе и во всем последующем передающем тракте условий для прохождения как основной несущей частоты, так и боковых спектральных составляющих (см. § 9). Поскольку частота модулирующих колебаний в высокоточных дальномерах оценивается десятками мегагерц, то и полоса пропускания как СВЧ генератора, так и всего передающего тракта также должна быть не менее нескольких десятков мегагерц.

Основным элементом, ограничивающим полосу пропускания передающего тракта радиодальномера, является резонансная система СВЧ генератора, представляющая собой объемный резонатор. Обычно такие резонаторы имеют достаточно высокую добротность, обуславливающую сравнительно узкую полосу пропускания. Поэтому в отличие от светодальномеров, где стремятся, как правило, использовать узкополосные излучатели, в УКВ радиодальномерах иногда приходится принимать специальные меры по расширению полосы пропускания передающего тракта дальномера, включая и СВЧ генератор.

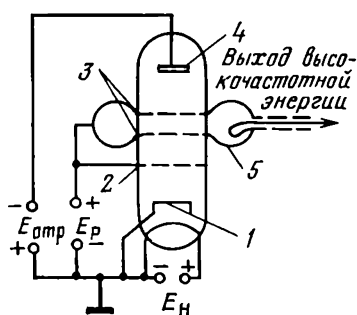
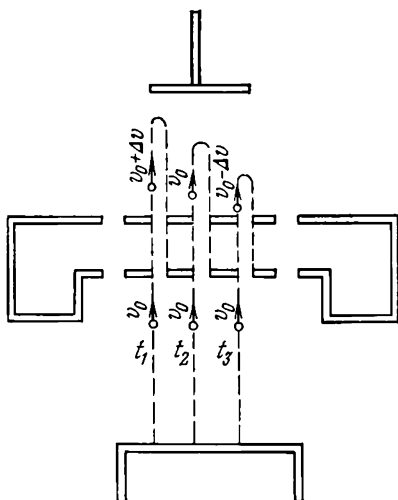


Рис. 35. Схематическое изображение отражательного клистрона

Рис. 36. Схема, поясняющая процесс группировки электронов в отражательном клистроне



Важными показателями применяемых в радиодальномерной технике СВЧ генераторов являются их эксплуатационные параметры. По данным показателям к СВЧ генераторам предъявляются те же требования, что и к излучателям оптического диапазона. В частности, СВЧ генераторы должны быть малогабаритными, экономичными по потреблению электрической энергии, а также обеспечивать необходимую величину мощности излучения. Желательно, чтобы выбранные для использования в дальномерной технике типы генераторов обеспечивали не только генерирование, но и возможность управления одним из параметров несущих колебаний, т. е. выполняли бы одновременно роль и источника СВЧ колебаний, и модулятора.

Среди широкого ассортимента разработанных к настоящему времени различных типов СВЧ генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов в современных высокоточных радиодальномерах наибольшее распространение получили отражательные клистроны и генераторы на диодах Ганна.

Отражательный клистрон представляет собой электровакуумный прибор специальной конструкции. Для пояснения принципа действия на рис. 35 приведено схематическое изображение отражательного клистрона. Основными составными элементами данного прибора являются катод 1, две сетки 3 с дисковыми выводами, которые являются неотъемлемой частью объемного резонатора 5, и отражательный электрод 4. Во многих типах отражательных клистронов между катодом и первой сеткой помещается вспомогательный электрод 2, называемый ускоряющим.

Так же как и в обычных электронных лампах, катод в клистроне служит источником электронов. Две сетки с дисковыми

выводами органически сочетаются с объемным резонатором, представляющим собой металлическую коробку той или иной конфигурации. В клистронных генераторах с длиной волны излучаемых колебаний, лежащей в диапазоне около 10 см, применяется наружный объемный резонатор, а при генерировании колебаний с длиной волны 3 см и короче объемный резонатор представляет собой единое целое с отражательным клистроном. На резонатор, а следовательно, и на обе упомянутые выше сетки с дисковыми выводами подается постоянное положительное относительно катода напряжение. Вспомогательный ускоряющий электрод соединяется с резонатором, т. е. имеет тот же положительный потенциал, что и сетки резонатора. Отражательный электрод клистрона внешне похож на анод обычной электронной лампы. Однако его принципиальное отличие состоит в том, что на него подается отрицательное напряжение, величину которого можно регулировать.

Благодаря тому что ускоряющий электрод и сетки резонатора имеют положительный потенциал, электроны, излучаемые катодом, летят с ускорением в направлении этих сеток. При этом следует заметить, что внутренний объем резонатора находится в сфере влияния электрического поля, при флуктуациях которого внутри резонатора возникают свободные затухающие колебания с частотой, близкой к резонансной частоте используемого резонатора. Последняя определяется внутренними размерами резонатора, которые обычно соизмеримы с длиной волны возбуждаемых колебаний.

Упомянутые выше свободные затухающие колебания высокой частоты создают между первой и второй сетками объемного резонатора переменное электрическое поле, которое дополнительно влияет на скорость электронов, пролетающих пространство между сетками резонатора в направлении от катода к отражательному электроду клистрона.

Для иллюстрации на рис. 36 показаны три последовательно возникающие ситуации, при которых происходит пролет электрона между сетками резонатора, в частности: в момент времени, когда электрическое поле, созданное свободными колебаниями в резонаторе, ускоряет пролетающие между сетками электроны; в момент времени, когда величина этого поля равна нулю, и в момент времени, когда электрическое поле оказывает тормозящее воздействие на электроны, летящие в направлении к отражательному электроду клистрона.

В результате рассмотренного взаимодействия скорость электронов, пролетающих сетки резонатора в указанные выше моменты времени, на выходе из этих сеток оказывается различной. Попадая в тормозящее электрическое поле, создаваемое отрицательно заряженным отражательным электродом клистрона, электроны постепенно теряют свою скорость и возвращаются обратно к сеткам резонатора. Однако из-за разли-

чия в скорости углубление электронов, соответствующих разным моментам времени, а следовательно, и время их пребывания в пространстве между верхней сеткой резонатора и отражательным электродом оказываются различными. Посредством изменения тормозящего воздействия за счет изменения отрицательного потенциала на отражателе можно добиться того, чтобы электроны, соответствующие указанным выше различным моментам времени, возвращались к сеткам резонатора одновременно, образуя при этом группы или так называемые сгустки.

Если такая возвращающаяся группа электронов будет пролетать пространство между сетками резонатора в тот момент времени, когда высокочастотное поле оказывает на них тормозящее воздействие, то электроны, теряя скорость, будут отдавать свою кинетическую энергию электрическому полю объемного резонатора, которая расходуется на покрытие необратимых потерь энергии СВЧ колебаний в резонаторе. В результате такой компенсации колебания в объемном резонаторе становятся незатухающими.

Следует заметить, что условия для образования групп электронов, отдающих свою энергию электрическому полю в резонаторе, могут быть созданы при нескольких отличающихся друг от друга по величине напряжениях на отражательном электроде клистрона. Вследствие этого в клистронном генераторе существует несколько зон генерации, каждая из которых соответствует вполне определенному отрицательному напряжению на отражателе клистрона, причем мощность СВЧ колебаний в различных зонах получается различной. На рис. 37, а приведена графическая зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}$ от напряжения на отражателе $U_{\text{отр}}$, причем через n на данном рисунке обозначен номер соответствующей зоны генерации.

Частоту генерируемых несущих колебаний в отражательных клистронах можно плавно изменять двумя путями: либо за счет изменения внутренних размеров объемного резонатора (механическая настройка), либо за счет изменения в небольших пределах напряжения на отражательном электроде клистрона (электронная настройка). Последний способ обычно используется также для управления частотой несущих колебаний. С этой целью на отражатель клистрона наряду с отрицательным постоянным напряжением подают и переменное модулирующее напряжение, которое изменяет частоту несущих колебаний в соответствии с графиками, приведенными на рис. 37, б.

Для отбора энергии электромагнитных колебаний из объемного резонатора и передачи ее в антенную систему в радиодальномерной технике в зависимости от диапазона несущих частот используются различные методы. В радиодальномерах десятисантиметрового диапазона связь источника СВЧ колебаний с антенной обычно осуществляется с помощью коаксиаль-

а

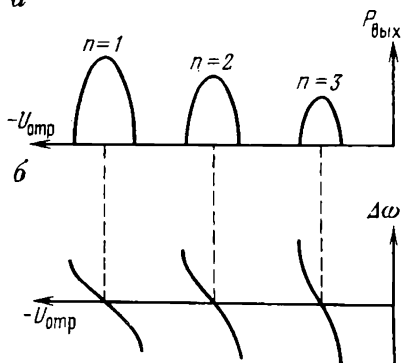


Рис. 37. Зоны генерации, характерные для отражательного клистрона:

а — график изменения мощности от напряжения на отражателе; **б** — график изменения частоты генератора в зависимости от напряжения на отражателе

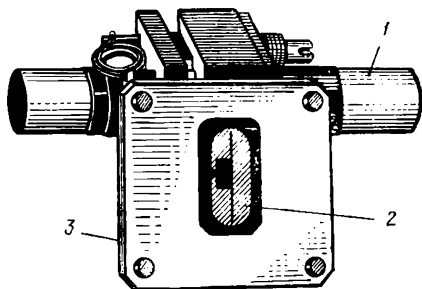


Рис. 38. Клистронный генератор трехсантиметрового диапазона:

1 — отражательный клистрон; **2** — отверстие для вывода СВЧ энергии; **3** — фланец для соединения с волноводным фидером

ной линии. При этом отбор энергии из объемного резонатора производится с использованием петли связи. В радиодальномерах трехсантиметрового и восьмимиллиметрового диапазонов в качестве соединительных линий (фидеров), как правило, применяют волноводы, для подключения которых к клистронным генераторам предусматривают специальный волноводный выход, представляющий собой отверстие прямоугольного сечения. На рис. 38 показан внешний вид одного из клистронных генераторов трехсантиметрового диапазона, применяемого в геодезических фазовых УКВ радиодальномерах.

Рассмотренным выше СВЧ генераторам на отражательных клистронах свойствен ряд существенных недостатков, из-за которых в последних разработках высокочастотных радиодальномеров они находят ограниченное применение. Один из таких недостатков состоит в том, что отражательный клистрон, как и любая электронная лампа, требует для своей работы несколько различных напряжений питания, причем напряжения на сетках объемного резонатора и отражательном электроде клистрона составляют несколько сотен вольт. Для создания таких напряжений приходится разрабатывать специальные, значительные по размерам блоки питания. Кроме того, в приборе приходится принимать соответствующие меры по технике безопасности. К другому существенному недостатку следует отнести сравнительно невысокий коэффициент полезного действия, оцениваемый как отношение величины мощности излучения к мощности, потребляемой от источников питания. Так, при мощности излучения 50—100 мВт на питание клистронного генератора затрачивается 20—25 Вт, т. е. коэффициент полез-

ного действия такого генератора оценивается величиной порядка $3 \cdot 10^{-3}$. Вследствие того, что значительное количество подводимой энергии переходит в тепло, для многих типов клистронов приходится принимать меры по их принудительному охлаждению, что также вызывает дополнительные эксплуатационные неудобства.

Большинства из перечисленных выше недостатков лишены полупроводниковые СВЧ генераторы на диодах Ганна, которые в последние годы находят преимущественное распространение в УКВ радиодальномерах рассматриваемого типа.

Основу диода Ганна составляет однородная полупроводниковая пластинка с приваренными к ней двумя омическими контактами. Отсутствие в таком диоде p - n перехода свидетельствует о том, что диод Ганна не обладает выпрямляющими свойствами. Поэтому само название «диод» применительно к рассматриваемому устройству весьма условно и связано лишь с наличием у диода Ганна двух электрических выводов. По аналогии с электронными лампами электрод, подключаемый к положительному выводу источника питания, называется анодом, а другой, соединенный с отрицательным выводом, — катодом.

Наиболее распространенным полупроводником для изготовления диодов Ганна служит арсенид галлия, т. е. тот же материал, который применяется и в рассмотренных выше полупроводниковых источниках света.

Специфическая особенность такого полупроводника состоит в том, что зона проводимости в нем не является однородной, а состоит из двух подзон, получивших название долин. Свойства этих долин, различающихся энергетическим уровнем находящихся в них электронов, неодинаковы. В нижней долине подвижность электронов значительно выше, чем в верхней.

При отсутствии внешнего электрического поля электроны способны заселять только нижнюю долину. Если же к пластине из арсенида галлия приложить постоянное напряжение соответствующей величины, то электроны, приобретая в созданном внешнем электрическом поле кинетическую энергию, будут частично переходить в верхнюю долину с малой подвижностью. Переход, сопровождающийся снижением скорости их перемещения, обуславливает возникновение в полупроводнике объемного электрического заряда, вблизи которого резко возрастает напряженность электрического поля, стимулирующая дальнейшее развитие лавинообразного процесса, связанного с «забросом» электронов в верхнюю долину. Эта область высокого значения напряженности электрического поля получила название домена.

Обычно в полупроводниковой пластине возникает всего один домен, зарождающийся возле катода. При этом он сразу же начинает дрейфовать в направлении анода, достигая которого он исчезает, обуславливая импульс тока в электрической цепи,

в которую включен полупроводник. Вслед за этим наблюдается зарождение вблизи катода нового домена, и рассматриваемый процесс повторяется. Частота повторения импульсов зависит от рабочей длины полупроводниковой пластинки и величины дрейфовой скорости домена. При длине пластинки в 100 мкм и дрейфовой скорости $1 \cdot 10^5$ м/с частота повторения импульсов составляет величину, равную 10 ГГц.

Если диод Ганна поместить в объемный резонатор, резонансная частота которого близка к частоте повторения отмеченных импульсов, то энергия электрического поля, создаваемая этими импульсами, может быть использована для компенсации потерь энергии СВЧ колебаний, возникающих в резонаторе за счет различного рода флуктуаций электрического поля. В результате внутри объемного резонатора с находящимся в нем диодом Ганна удастся создать условия для поддержания незатухающих СВЧ колебаний.

При необходимости изменения частоты возбуждаемых колебаний в генераторах на диодах Ганна применяют те же методы, что и в клистронных генераторах, т. е. за счет изменения внутренних размеров объемного резонатора (механическая настройка) и за счет изменения напряжения питания диода Ганна (электронная настройка).

Следует заметить, что принципиально последний метод может быть использован и для модуляции несущих колебаний. Однако такое управление во многих случаях порождает нежелательные искажения формы информационного сигнала и сопровождается значительным уровнем побочных шумов. В связи с этим в радиодальномерах с генераторами на диодах Ганна модуляция СВЧ колебаний осуществляется, как правило, за счет введения в объемный резонатор дополнительного элемента — варактора. Последний представляет собой миниатюрный диод, междуэлектродная емкость которого зависит от величины приложенного к нему напряжения. В свою очередь, эта емкость оказывает влияние на резонансную частоту объемного резонатора, изменяя ее в такт с приложенным модулирующим напряжением.

Генераторы на диодах Ганна выгодно отличаются от генераторов на отражательных клистронах прежде всего величиной коэффициента полезного действия. Так, если для клистронных генераторов этот параметр оценивается десятками долями процента, то для генераторов на диодах Ганна теоретические значения к. п. д. могут достигать 20—40%. Практически из-за потерь, связанных с необходимостью стабилизации напряжения питания, а также с использованием удобных для модуляции режимов работы генератора, величина отмеченного к. п. д. оценивается несколькими процентами.

К другим преимуществам генераторов на диодах Ганна сле-

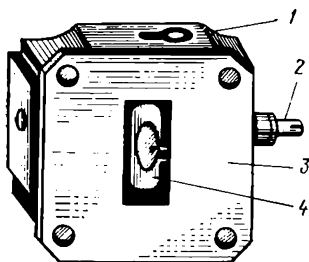


Рис. 39. СВЧ генератор на диоде Ганна:

1 — корпус объемного резонатора, внутри которого размещены диод Ганна и варактор; 2 — винт для изменения частоты генерации; 3 — фланец для присоединения волноводного фидера; 4 — отверстие для вывода СВЧ энергии

дует отнести отсутствие нежелательных высоких напряжений питания и принудительного охлаждения.

Одним из существенных недостатков генераторов рассматриваемого типа является большой разброс параметров и прежде всего такого важного для дальномерной техники параметра, как величина излучаемой мощности.

Генераторы на диодах Ганна преимущественно используются для работы в сантиметровом диапазоне радиоволн. Внешний вид одного из таких генераторов, применяемого в отечественных радиодальномерах, показан на рис. 39.

§ 20. ИСТОЧНИКИ КОЛЕБАНИЙ МАСШТАБНОЙ ЧАСТОТЫ

Из анализа обобщенных функциональных схем свето- и радиодальномеров следует, что наряду с несущими колебаниями в таких дальномерах возникает необходимость получения целого ряда более низкочастотных колебаний. Среди них особого внимания заслуживают колебания масштабной частоты, которые, как уже отмечалось выше, определяют длину «метра», используемого для измерения искомых расстояний. Поскольку указанными колебаниями осуществляется модуляция излучений несущей частоты, то в литературе их часто называют также модулирующими колебаниями.

Радиотехнические устройства, в которых создаются колебания масштабной частоты, получили название автогенераторов. Применительно к рассматриваемым схемам свето- и радиодальномеров отмеченные устройства чаще всего называют просто генераторами.

Детальный анализ общих принципов действия таких широко распространенных устройств, как генераторы, выходит за рамки рассматриваемого нами круга задач. В этой связи заметим только, что основными составными частями большинства используемых схем генераторов являются колебательная система, источник питания, усилительный элемент и цепь обратной связи. Взаимодействие этих частей показано на рис. 40.

При подключении к резонансной колебательной системе источника электрической энергии в такой системе могут возникать затухающие электрические колебания с частотой, равной резонансной частоте упомянутой системы. Для того чтобы

колебания сделать незатухающими, часть энергии этих колебаний отбирается из колебательной системы, усиливается с помощью усилительного элемента и в соответствующей фазе по цепи обратной связи возвращается обратно в колебательную систему. В результате такого взаимодействия удастся создать условия для возбуждения незатухающих гармонических колебаний.



Рис. 40. Схема взаимодействия основных составных частей генератора с самовозбуждением

Основными параметрами таких колебаний являются амплитуда и частота. Величина амплитуды рассматриваемых колебаний определяет глубину модуляции несущих колебаний и в конечном счете влияет на дальность действия дальномера. Что касается масштабной частоты модулирующих колебаний, то она оказывает непосредственное влияние на точность измерений.

Обеспечение необходимой для выбранного типа модулятора амплитуды модулирующих колебаний не вызывает, как правило, существенных технических трудностей. В то же время к стабильности частоты масштабных колебаний в соответствии с основной рабочей формулой (19) предъявляются весьма жесткие требования. Так, для обеспечения относительной погрешности линейных измерений не ниже $(3 \div 5) \cdot 10^{-6}$ относительная нестабильность масштабной частоты должна быть $1 \cdot 10^{-6}$ и выше в течение сравнительно длительного интервала времени (как правило, в течение всего полевого сезона, составляющего в среднем 5—6 мес). При этом технические средства и методы, используемые для стабилизации масштабной частоты, должны отличаться простотой, компактностью, экономичностью по потреблению электрической энергии. Кроме того, технические средства должны обеспечивать установление рабочего режима генератора за период времени, не превышающий 10—20 мин.

В связи с вышеизложенным рассмотрим основные методы стабилизации масштабной частоты, которые находят применение в дальномерной технике.

Прежде всего заметим, что в интересующем нас диапазоне масштабных частот от 1,5 до 100 МГц (см. § 8) колебательная система чаще всего состоит из катушки индуктивности L и емкости C . Из курса физики известно, что частота колебаний в такой колебательной системе определяется следующим математическим выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}. \quad (100)$$

Из приведенного соотношения нетрудно установить, что стабильность частоты генерируемых колебаний в данной коле-

бательной системе зависит прежде всего от стабильности параметров L и C , которые при изменении внешних условий не остаются постоянными. Многочисленные эксперименты по изучению стабильности частоты LC -генераторов свидетельствуют о том, что даже при использовании в схеме специально отобранных катушек индуктивности и конденсаторов с наиболее стабильными параметрами не удается обеспечить стабильность частоты выше, чем $1 \cdot 10^{-5}$, в течение длительного времени и в условиях значительных изменений температуры окружающей среды. Поэтому с целью достижения более высокой стабильности частоты вместо обычного колебательного контура в современных высокостабильных генераторах чаще всего применяют кварцевые резонаторы. Применительно к дальномерной технике кварцевые генераторы, т. е. генераторы, у которых в качестве колебательной системы используется кварцевый резонатор, являются неотъемлемой частью большинства свето- и радиодальномеров.

Основу кварцевого резонатора составляет кварцевая пластинка, обладающая свойствами прямого и обратного пьезоэффекта. Сущность прямого пьезоэффекта состоит в том, что при деформации кварцевой пластинки (изгибе или сжатии) на ее гранях появляются электрические заряды (рис. 41). Величина этих зарядов прямо пропорциональна приложенной силе, причем при изменении направления воздействия этой силы изменяется и знак электрических зарядов. Если же к граням пластинки с помощью специальных электродов подключить какой-либо источник электрической энергии, то в пластинке возникают упругие деформации (пластинка изгибается или сжимается). Это явление получило название обратного пьезоэффекта.

Если кварцевую пластинку заставить колебаться, то она ведет себя как упругая металлическая пластинка, но при этом на ее гранях возникает переменная разность потенциалов. Частота механических колебаний, а следовательно, и частота переменного напряжения на приложенных к ней электродах зависят от размеров этой пластинки. Чем меньше размеры, тем выше собственная резонансная частота такой пластинки.

Кварцевая пластинка с нанесенными на ее грани электродами обычно укрепляется с помощью специальных держателей внутри стеклянного или металлического баллона. Вся эта конструкция получила название кварцевого резонатора.

Различают вакуумные и герметизированные кварцевые резонаторы. В вакуумированных резонаторах воздух из баллона выкачивается, а в герметизированных — баллон просто запаивается. На рис. 42, а показана конструкция вакуумного кварцевого резонатора, а на рис. 42, б — герметизированных кварцевых резонаторов. В свето- и радиодальномерах применяют как вакуумные, так и герметизированные кварцевые резонаторы.

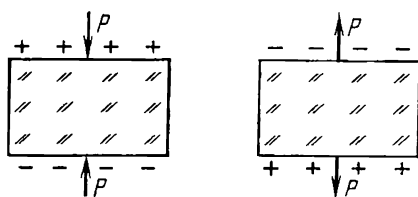


Рис. 41. Схематическое представление пьезоэлектрического эффекта, возникающего в кварцевой пластине

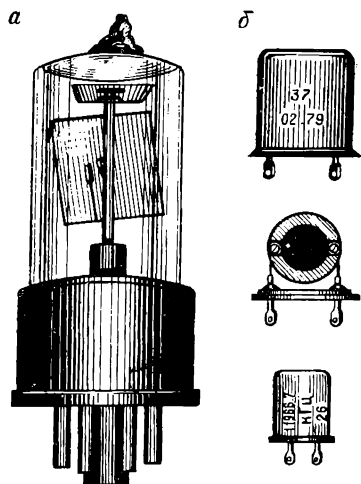


Рис. 42. Различные конструкции кварцевых резонаторов

Кварцевый резонатор по своим электрическим свойствам эквивалентен электрической схеме, которая приведена на рис. 43. Такая схема на различных частотах ведет себя как индуктивность, емкость или активное сопротивление. В схемах кварцевых генераторов, применяемых в геодезических дальномерах, как правило, используется такой режим работы, при котором кварцевый резонатор эквивалентен индуктивности с очень стабильными параметрами.

Параллельно кварцевому резонатору обычно подключают подстроечный конденсатор, с помощью которого можно в небольших пределах изменять частоту возбуждаемых колебаний (не более сотых долей процента). Такая регулировка необходима для точной установки частоты в номинальное значение.

Несмотря на то что кварц относится к природным минералам с очень стабильными параметрами, однако и его технические характеристики под воздействием изменений температуры окружающей среды изменяются. Поэтому при работе в полевых условиях, где изменения температуры воздуха значительны, без принятия специальных мер даже при использовании кварцевых резонаторов не удастся получить требуемую стабильность частоты.

Для преодоления указанной трудности в дальномерной технике применяют несколько различных методов стабилизации частоты кварцевых генераторов. С этой целью прежде всего выбирают такие электрическую схему и режим работы генератора, которые обеспечивали бы минимальное влияние изменений питающих напряжений и параметров элементов этой схемы на частоту колебаний кварцевого резонатора. Кроме того, применяют такие типы кварцевых резонаторов, которые имеют

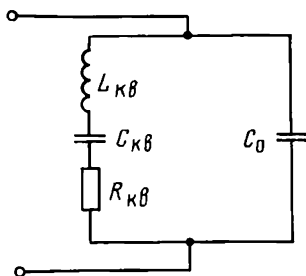


Рис. 43. Эквивалентная электрическая схема кварцевого резонатора

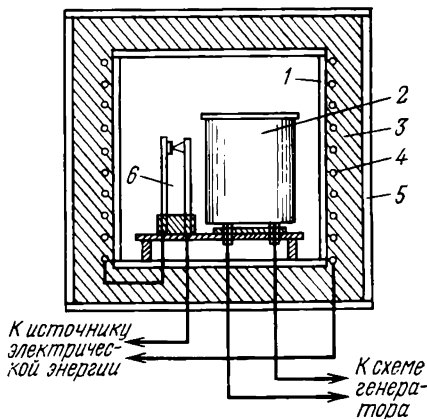


Рис. 44. Схема термостата

малую величину температурного коэффициента частоты. Под последним понимают величину ухода частоты возбуждаемых колебаний при изменении на один градус Цельсия температуры окружающего воздуха.

Наряду с вышеизложенными мерами по стабилизации частоты в дальномерной технике широкое распространение получили методы термокомпенсации и термостатирования.

Сущность метода термокомпенсации состоит в том, что в схему кварцевого генератора вводят компенсирующие элементы (обычно конденсаторы), оказывающие влияние на частоту возбуждаемых колебаний. При использовании данного метода стремятся к тому, чтобы компенсирующие элементы вызвали такой уход частоты, который равен по величине, но противоположен по знаку уходу частоты, обусловленному изменениями всех других параметров кварцевого генератора, включая и кварцевый резонатор. Преимущество рассматриваемого метода состоит в том, что стабилизация частоты не связана с дополнительным расходом электроэнергии. Кроме того, в термокомпенсированной (но не термостатированной) схеме установка частоты генератора в номинал после подключения дальномера к источнику питания происходит за сравнительно короткое время. Существенный недостаток метода термокомпенсации заключается в том, что закономерность изменения частоты с температурой для кварцевого резонатора носит гистерезисный характер, т. е. частота не возвращается к своему исходному значению при циклических изменениях температуры. К тому же эта закономерность имеет сложный характер и индивидуальна для каждого конкретного резонатора. Поэтому каждую схему кварцевого генератора приходится термокомпенсировать индивидуально, причем скомпенсировать удастся, как правило, лишь общие тенденции ухода частоты. Несмотря на недостатки, ме-

тод термокомпенсации находит широкое применение в современных высокоточных дальномерах.

Наиболее эффективным способом температурной стабилизации частоты кварцевых генераторов является способ термостатирования, основанный на использовании термостата.

Под термостатом понимают устройство, позволяющее сохранять во внутреннем его объеме постоянную температуру с заданной степенью точности. Применяемые в дальномерах термостаты (рис. 44) в большинстве случаев состоят из внутреннего металлического стакана 1, образующего внутренний рабочий объем термостата, где размещают один или несколько кварцевых резонаторов 2. На этот стакан наматывается обмотка подогрева термостата 4, иногда называемая нагревателем. Нагрев регулируется термопрерывателем 6, включаемым в цепь обмотки непосредственно или через реле того или иного типа. В термостатах последних лет вместо позиционного режима (включено-выключено) часто используется режим плавного регулирования. Характерная особенность такого режима состоит в том, что из схемы термостата исключается термопрерыватель, а в качестве датчика, реагирующего на изменения температуры, применяется мостовая схема с терморезисторами.

Внутренний стакан с обмоткой подогрева изолируется от окружающего пространства слоем теплоизоляции 3, с внешней стороны которого размещается наружный кожух термостата 5.

Термостаты рассмотренной конструкции работают на охлаждение за счет естественного теплообмена. Вследствие этого температура в термостатируемом объеме выбирается выше максимально возможной температуры окружающей среды. Точность поддержания температуры в данном объеме оценивается десятными долями градуса.

Использование описанных выше нагревательных термостатов позволяет создавать сравнительно малогабаритные кварцевые генераторы с относительной нестабильностью частоты не ниже $(1 \div 10) \cdot 10^{-7}$ за весь полевой сезон. К недостаткам таких термостатированных генераторов следует отнести дополнительный расход электроэнергии, идущий на нагрев термостата, причем удельный вес отмеченных затрат электроэнергии весьма значителен (во многих случаях на нагрев термостата расходуется от 20 до 50% энергии, которую потребляет весь дальномер). Кроме того, время, необходимое для начального прогрева термостата, составляет, как правило, не менее нескольких минут, что приводит не только к увеличению общего расхода электроэнергии, но и к увеличению времени, необходимого для выполнения измерений искомой длины линии.

Другой разновидностью термостатов, применяемых в дальномерной технике, является так называемый пассивный термостат. Данное устройство представляет собой хорошо теплоизо-

лированную от внешней среды камеру, стенки которой обладают большой теплоемкостью и теплопроводностью. Камера такого термостата постепенно принимает ту температуру окружающей среды, в которой длительное время находится дальномер. Поэтому пассивный термостат способен лишь предохранять помещаемые в него кварцевые резонаторы от резких перепадов внешней температуры.

Термостаты этого типа отличаются простотой конструкции, надежностью работы и отсутствием потребления электроэнергии. Такой существенный недостаток, как неопределенность значения установившейся в термостате температуры, удается сгладить за счет использования термокомпенсированной схемы генератора.

Генераторы, в которых использован метод термокомпенсации в сочетании с пассивными термостатами, отличаются экономичностью и быстротой готовности схемы к работе. С помощью таких генераторов, применяемых в портативных дальномерх, удается обеспечить относительную стабильность частоты генерируемых колебаний не ниже $(1 \div 5) \cdot 10^{-6}$ в течение всего полевого сезона.

§ 21. МОДУЛЯТОРЫ

Рассмотренные выше общие принципы действия свето- и радиодальномеров базируются на использовании модулированных колебаний. Поэтому в состав любого из анализируемых дальномеров помимо источников несущих и модулирующих колебаний входит специальное устройство, позволяющее осуществлять управление одним из параметров несущих колебаний. Такие устройства, имеющие или самостоятельную конструкцию, или органически входящие в состав источников несущих колебаний, получили название модуляторов.

Одно из основных требований, которые предъявляются к модуляторам, состоит в том, что модулятор должен быть достаточно быстродействующим, так как для управления с частотой в несколько десятков мегагерц и более модулятор должен успевать реагировать на изменения управляющего сигнала, исчисляемые миллиардными долями секунды (наносекундами). Кроме того, модулятор не должен существенно ослаблять проходящие через него несущие колебания, а также сильно нагружать генератор модулирующих колебаний. Немаловажными факторами являются также и такие общепринятые эксплуатационные показатели, как размеры, масса, надежность работы и стабильность основных технических характеристик.

Конструкция и принцип действия модуляторов существенно изменяются при переходе из оптического диапазона в ультракоротковолновый. Исходя из этого, особенности работы модуляторов света и УКВ колебаний рассмотрены отдельно.

Модуляторы оптического излучения

Модуляция света в современных светодиодах осуществляется как с помощью специальных устройств, так и за счет использования в излучателях соответствующих режимов работы.

Для создания легких, портативных и экономичных дальномеров наиболее рационально использовать в качестве модулятора несущих колебаний непосредственно источник излучения. Такой способ управления оптическим излучением получил название внутренней модуляции. Он нашел широкое распространение в тех типах светодиодов, у которых источниками несущих колебаний служат полупроводниковые излучатели.

Внутренняя модуляция излучаемого потока в полупроводниковых источниках света основана на использовании зависимости характерного для таких источников рекомбинационного излучения от величины протекающего через p - n переход электрического тока. Изменяя с помощью колебаний масштабной частоты величину тока через диод, удается получить модулированное по амплитуде излучение. Типичный для светодиодов и полупроводниковых лазеров характер зависимости лучистого потока от величины электрического тока, получившей название модуляционной характеристики, проиллюстрирован на рис. 45. Как видно из приведенных графиков, зависимость величины лучистого потока Φ от мгновенного значения протекающего через диод тока i близка к линейной, т. е. нелинейные искажения огибающей потока оптического излучения, как правило, невелики.

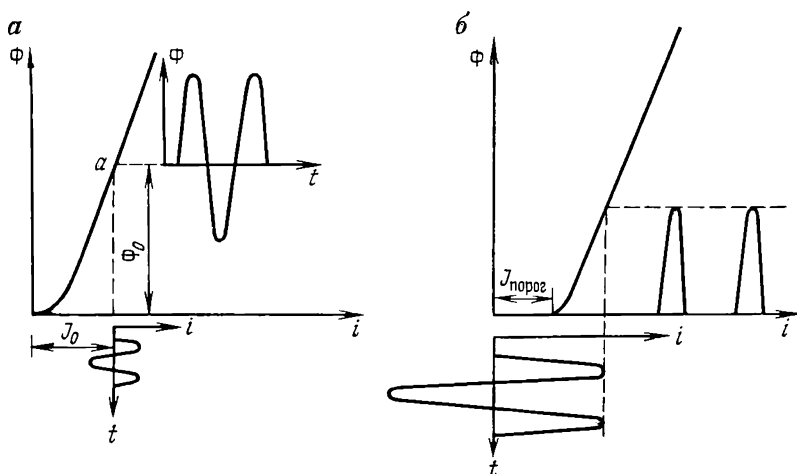


Рис. 45. Модуляционные характеристики люминесцентного и лазерного светодиодов

Для того чтобы обеспечить непрерывные гармонические изменения лучистого потока Φ , соответствующие изменениям переменной составляющей тока i , через диод наряду с переменной составляющей пропускают и постоянный ток I_0 , за счет которого осуществляется смещение начальной рабочей точки a на линейный участок модуляционной характеристики, где не происходит отсечки огибающей модулированного лучистого потока (рис. 45, a).

Указанный режим работы чаще всего используется в тех случаях, когда излучателем является люминесцентный светодиод. Если же в дальномере источником оптического излучения служит полупроводниковый лазер, то такой режим приводит к недопустимому перегреву диода. Во избежание этого для лазерных светодиодов применяют режим работы, при котором излучаемый поток представляет собой последовательность отдельных импульсных сигналов (рис. 45, b). При таком режиме работы приходится отказываться от фазового метода измерения расстояний и переходить на импульсно-фазовый.

Исследование инерционных свойств рассмотренного метода модуляции свидетельствует о том, что верхняя граница частотного диапазона модуляции полупроводниковых излучателей составляет величину $10^9 \div 10^{10}$ Гц. Практически к настоящему времени разработаны светодиодномеры с полупроводниковыми излучателями, у которых частота модуляции достигает 750 МГц.

Отличительная особенность данного вида модуляции — исключительная простота реализации. В этом отношении внутренняя модуляция полупроводниковых излучателей не имеет конкуренции.

Попытки использования внутренней модуляции в газовых лазерах, которые применяются в качестве источников оптического излучения в светодиодномерах дальнего действия, пока не дали положительных результатов. Поэтому в дальномерам с газовыми лазерами, как правило, применяют внешние модуляторы света. Исключение составляют лишь дальномеры, у которых в качестве масштабной частоты используется разность частот, соответствующих соседним спектральным линиям при одномодовом режиме работы газового лазера (см. рис. 29). Однако из-за ряда свойственных этим дальномерам существенных недостатков (и прежде всего из-за невозможности разрешения неоднозначности за счет применения нескольких различных масштабных частот) они не получили широкого распространения в геодезической практике.

Среди большого разнообразия модуляторов света, позволяющих осуществлять внешнюю модуляцию, т. е. управлять оптическим излучением после его выхода из излучателя, в светодиодномерной технике нашли широкое распространение модуляторы, основанные на использовании эффекта двойного лучепреломления.

Явление двойного лучепреломления свойственно широкому классу кристаллов и отдельным видам жидкостей. Одна из характерных особенностей отмеченных веществ состоит в том, что они являются анизотропной средой для распространяющегося в них света. Анизотропия проявляется в том, что скорость распространения колебаний оптического диапазона зависит как от направления падающего на них света, так и от положения плоскости поляризации.

В твердотельных модуляторах света, применяемых в дальномерной технике, чаще всего используют одноосные кристаллы, характеризующиеся двумя показателями преломления, а следовательно, и двумя значениями скорости распространения света в кристалле. Если на кристалл падает поляризованный свет, то из-за различия в скорости распространения лучи, ориентированные во взаимно перпендикулярных плоскостях, на выходе из кристалла имеют различные фазовые сдвиги.

В зависимости от значения разности фаз между ними изменяется характер поляризации результирующих колебаний оптического диапазона, формирующихся после прохождения кристалла. При сдвиге фаз, равном 0 или π , свет на выходе из кристалла представляет собой плоскополяризованное излучение. Если разность фаз равна $\pi/2$, а амплитуды колебаний рассматриваемых компонент равны, то конец результирующего вектора напряженности электрического поля описывает окружность. Во всех других случаях наблюдается эллиптически поляризованный свет, особенность которого состоит в том, что конец результирующего вектора описывает в пространстве эллипс.

Различают естественную и искусственную анизотропию кристаллов. При естественной анизотропии рассмотренные выше физические процессы протекают в кристалле при отсутствии каких-либо внешних воздействий на него. Искусственная анизотропия связана с внешними воздействиями на кристалл, и в частности, с помещением кристалла во внешнее электрическое поле. При разработке модуляторов наибольший интерес представляет искусственная анизотропия, позволяющая управлять физическими свойствами кристалла в соответствии с интересующим нас характером изменения модулирующего сигнала. Зависимость изменения показателя преломления кристалла под воздействием внешнего электрического поля получила название электрооптического эффекта.

Если изменения показателя преломления кристалла (а следовательно, и изменения скорости распространения света в нем) линейно связаны с величиной создаваемой в кристалле напряженности электрического поля, то такой эффект получил название линейного (или эффекта Поккельса). Наряду с ним получил распространение и квадратичный электрооптический эффект (или эффект Керра), характеризующийся квадратичной

зависимостью изменения показателя преломления от величины напряженности поля, создаваемого внешними источниками электрической энергии.

Рассмотрим вначале основные особенности работы модуляторов света, базирующихся на использовании эффекта Поккельса, который свойствен только твердым телам. В модуляторах такого типа, применяемых в светодальномерах, чаще всего применяют искусственно выращиваемые кристаллы дигидрофосфата калия (KDP), дигидрофосфата аммония (ADP) и ниобата лития. Под воздействием внешнего электрического поля в таких кристаллах возникает фазовая модуляция, т. е. в такт с изменением электрического поля изменяется фаза проходящей через кристалл электромагнитной волны оптического диапазона (в частности, фаза электрического вектора этой волны).

В зависимости от ориентации внешнего электрического поля, направления распространения света и его поляризации различают продольный и поперечный электрооптические эффекты.

При продольном эффекте направления распространения света и напряженности внешнего электрического поля совпадают. Для иллюстрации на рис. 46 приведена схема реализации модулятора, базирующегося на использовании продольного эффекта. Основу модулятора составляет кристалл 3, к торцевым граням которого с помощью электродов 1 прикладывают электрическое напряжение. При наличии электрического поля в кристаллах типа ADP и KDP их показатели преломления по осям x и y

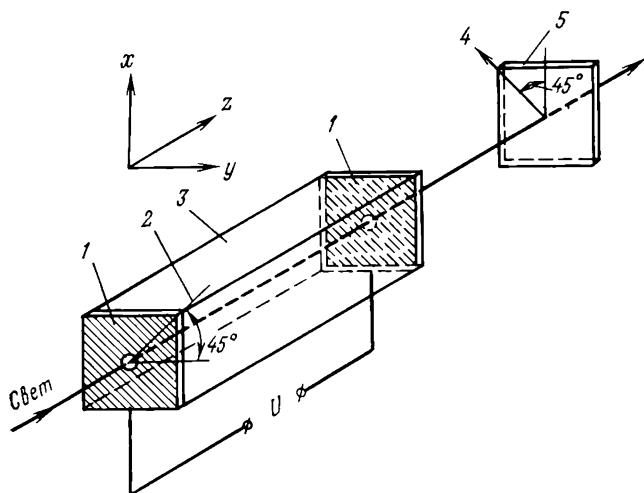


Рис. 46. Схема кристаллического модулятора, базирующегося на продольном эффекте Поккельса

становятся различными. Если направление осей x и y относительно положения плоскости поляризации 2 подающего на кристалл света выбрано так, что это различие максимально, то

$$n_x = n_0(1 - kE); \quad (101)$$

$$n_y = n_0(1 + kE),$$

где n_x и n_y — показатели преломления для лучей, электрический вектор которых ориентирован соответственно по осям x и y , при наличии внешнего электрического поля, направленного по оси z ; n_0 — тот же параметр, но при отсутствии внешнего электрического поля; $E = U/l$ — напряженность электрического поля, создаваемая за счет приложения к кристаллу напряжения U ; l — длина кристалла по оси z ; k — коэффициент пропорциональности, зависящий от типа выбранного кристалла.

Различие в скорости распространения по осям x и y приводит к возникновению разности фаз у компонент оптического излучения, ориентированных по данным осям.

Если к кристаллу приложено напряжение u , описываемое уравнением

$$u = U_0 + U_m \cos \omega t, \quad (102)$$

где U_0 — постоянная составляющая приложенного напряжения (напряжение смещения); U_m и ω — амплитуда и круговая частота переменного модулирующего напряжения, а на кристалл падает поляризованный монохроматический свет с плоскостью поляризации под углом в 45° к осям x и y , то разность фаз $\Delta\phi$ между упомянутыми компонентами оптического излучения на выходе из кристалла определяется формулой

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{U_{\lambda/2}} (U_0 + U_m \cos \omega t), \quad (103)$$

где $U_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение, при котором разность фаз равна π .

Уравнение (103) свидетельствует о том, что в рассматриваемом устройстве под воздействием модулирующего напряжения изменяется фаза несущих колебаний оптического диапазона, т. е. имеет место фазовая модуляция. В отдельных типах светодиодных устройств удастся непосредственно реализовать данный вид модуляции. Однако в приемном устройстве приходится при этом использовать специальный тип демодулятора, который по своему принципу действия аналогичен модулятору. Такое техническое решение приводит во многих случаях к усложнению приемного устройства и поэтому не всегда оправдано.

Значительно чаще в современных светодиодах используют амплитудную модуляцию оптического излучения, на которую непосредственно реагируют фотоэлектронные устрой-

ва, устанавливаемые на входе приемной части дальномера. В связи с этим возникает необходимость преобразования рассмотренной выше фазовой модуляции в амплитудную. Эта задача решается посредством введения в схему модулятора дополнительного оптического элемента — поляроида, который помещается на пути прохождения света после кристалла. Такой элемент по месту своего расположения получил название анализатора.

Принцип действия большинства используемых в дальномерной технике поляроидов основан на рассмотренном выше явлении двойного лучепреломления, в связи с чем в качестве поляроидов используют те или иные кристаллы. Как уже отмечалось выше, падающий на такой кристалл луч расщепляется на две составляющие. Отличительная особенность поляроида состоит в том, что в нем создаются условия для поглощения одной из составляющих. В результате из поляроида выходит плоскополяризованный свет.

В тех случаях, когда в дальномере используется источник неполяризованного света, то аналогичный поляроид устанавливается не только на выходе модулятора, но и на его входе. При этом его обычно называют поляризатором.

Введение в схему модулятора анализатора 5 (см. рис. 46) позволяет видоизменить закономерность изменения несущих колебаний оптического диапазона. Если плоскость поляризации данного анализатора, характеризуемая положением электрического вектора 4, перпендикулярна к плоскости поляризации входящего в модулятор светового потока, то значение последнего на выходе из анализатора определяется формулой

$$\Phi = \Phi_m \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} = \frac{\Phi_m}{2} (1 - \cos \Delta\varphi), \quad (104)$$

где Φ_m — величина лучистого потока на входе в кристаллический модулятор.

Полученное уравнение связывает между собой выходящий из модулятора лучистый поток Φ с разностью фаз $\Delta\varphi$. Компоненты этого потока ориентированы по осям x и y . Отмеченная величина, в свою очередь, в соответствии с формулой (103) линейно связана с величиной приложенного к кристаллу модулирующего напряжения. Результирующая зависимость значения выходящего из модулятора лучистого потока от приложенного к модулятору напряжения получила название модуляционной характеристики. Приведенный на рис. 47 вид модуляционной характеристики для рассматриваемого типа модулятора свидетельствует о том, что эта зависимость нелинейная. Поэтому во избежание искажений формы передаваемого информационного сигнала стремятся использовать линейный участок модуляционной характеристики, имеющий максимальную крутизну и обеспечивающий тем самым максималь-

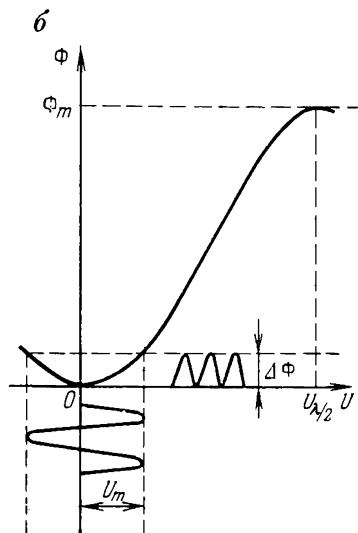
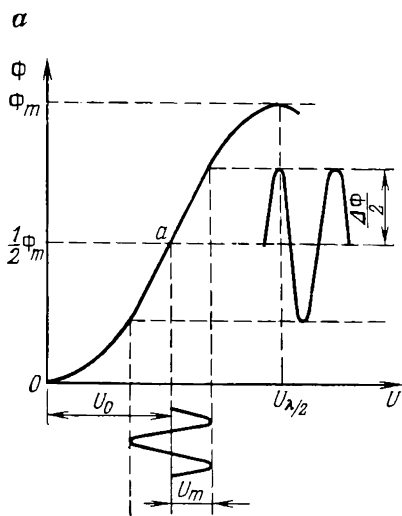
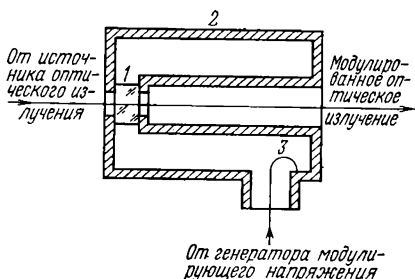


Рис. 47. Модуляционные характеристики кристаллических модуляторов света

Рис. 48. Схематический вид объемного резонатора с электрооптическим кристаллом:

1 — электрооптический кристалл; 2 — объемный резонатор; 3 — петля связи



ную глубину модуляции при одной и той же величине прикладываемого к модулятору переменного напряжения. Рабочую точку a (рис. 47, a) выбирают при этом по середине отмеченного участка. Практическая реализация такого режима осуществляется за счет приложения к кристаллу напряжения смещения U_0 соответствующей величины.

Основной недостаток такого режима состоит в том, что значения напряжений U_0 и U_m для кристаллов типа ADP и KDP должны иметь величину в несколько тысяч вольт. При таких высоких напряжениях в кристалле выделяется значительное количество тепла, что может приводить к разрушению кристалла.

Во избежание этого рабочую точку на модуляционной характеристике очень часто выбирают в начале координат (рис. 47, b), т. е. напряжение смещения к кристаллу не прикладывают. Характерные особенности такого режима состоят в том, что лучистый поток под воздействием приложенного мо-

дулирующего напряжения изменяется с удвоенной частотой, а из-за повышенной кривизны выбранного участка возникают нелинейные искажения формы «огигающей» модулированного лучистого потока. Кроме того, из закономерности изменения модуляционной характеристики вблизи начала координат видно, что лучистый поток на выходе из модулятора имеет небольшую величину, в результате чего дальность действия дальномера существенно уменьшается. В связи с этим рассмотренный режим работы модулятора находит применение в светодальномерах, предназначенных для измерения линий небольшой длины.

Следует заметить, что анализируемый продольный электрооптический эффект чаще всего используется для управления лучистым потоком с достаточно высокой частотой (более 100 МГц). При применении таких высоких частот электрооптический кристалл помещают в объемный резонатор (рис. 48), в котором с помощью генератора модулирующих колебаний возбуждается стоячая электромагнитная волна, создающая в месте расположения кристалла необходимую напряженность поля. При таком техническом решении возникают принципиальные трудности, связанные с приложением к кристаллу постоянного напряжения смещения. Поэтому в тех случаях, когда отмеченное выше удвоение частоты модуляции лучистого потока нежелательно, используют другой метод смещения рабочей точки на середину линейного участка модуляционной характеристики (рис. см. 47, а).

Сущность этого метода состоит в том, что необходимую постоянную разность фаз $\Delta\phi_0$ между двумя распространяющимися в кристалле компонентами световой волны, равную $\pi/2$, получают не за счет внешнего электрического поля, а оптическим путем посредством установки перед электрооптическим кристаллом на пути прохождения света специального оптического фазовращателя.

Обычно такой фазовращатель изготавливают из тонких пластинок слюды, которая имеет кристаллическую структуру и обладает свойством двойного лучепреломления. Толщина пластинок подбирается такой, чтобы разность фаз между двумя ортогональными составляющими расщепленного луча была равна $\pi/2$, что соответствует разности оптических путей, равной $\lambda/4$. Исходя из этого, отмеченное устройство получило название четвертьволновой пластинки.

Практическая реализация метода смещения рабочей точки за счет использования четвертьволновой пластинки имеет несомненные преимущества перед ранее рассмотренным методом, предусматривающим использование высоковольтных источников постоянного напряжения. Однако необходимость применения достаточно высоких переменных модулирующих напряжений остается. Для примера заметим, что применительно к кри-

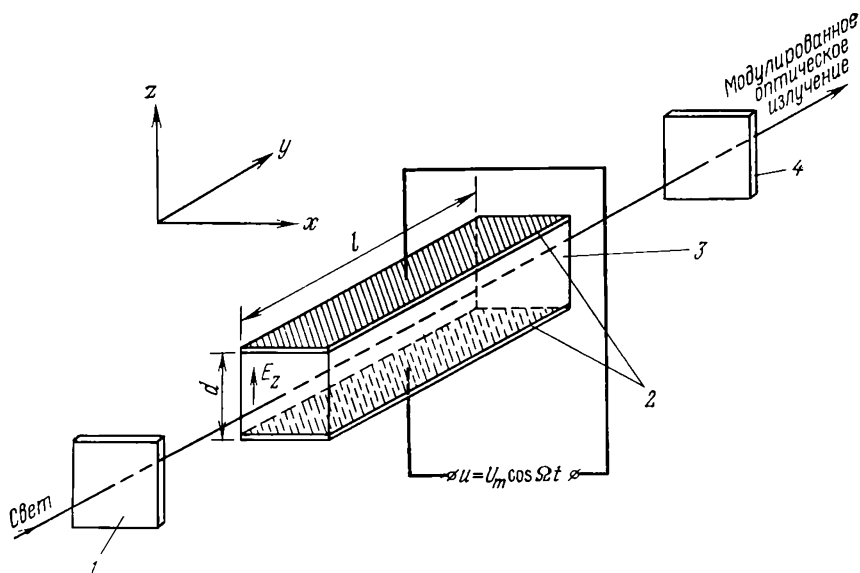


Рис. 49. Схема кристаллического модулятора, базирующегося на поперечном эффекте Поккельса:

1 — четвертьволновая пластинка; 2 — электроды; 3 — электрооптический кристалл; 4 — анализатор

сталлам KDP, у которых при реализации продольного электрооптического эффекта $U_{\lambda/2} \approx 8,7$ кВ, переменное модулирующее напряжение с амплитудой 430 В обеспечивает глубину модуляции на линейном участке модуляционной характеристики, равную всего 16%.

Существенное уменьшение полуволнового напряжения может быть достигнуто за счет применения в кристаллических модуляторах поперечного электрооптического эффекта.

Характерная особенность данного эффекта состоит в том, что направление света и ориентация электрического поля, обусловленного приложенным к кристаллу электрическим напряжением, взаимно перпендикулярны. На рис. 49 приведена схема, поясняющая работу такого модулятора. Через l и d на рисунке обозначены размеры кристалла; E_z — напряженность электрического поля по оси z , создаваемая за счет приложения к кристаллу напряжения u .

Показатель преломления для луча, электрический вектор которого ориентирован вдоль оси x , зависит от величины электрического поля и определяется для кристаллов типа ADP и KDP соотношением, аналогичным формуле (101):

$$n_x = n_0(1 - kE_z), \quad (105)$$

где n_0 — показатель преломления кристалла по оси x при от-

существовании внешнего электрического поля; $E_z = U/d$ — напряженность электрического поля в кристалле по оси z ; d — толщина кристалла в направлении поля; k — коэффициент пропорциональности.

В то же время показатель преломления для другого луча, плоскость поляризации которого совпадает с направлением оси z , не зависит от величины напряженности электрического поля:

$$n_z = n_e, \quad (106)$$

где n_e — показатель преломления кристалла по оси z .

Если на входе модулятора установить четвертьволновую пластинку (см. рис. 49), то разность фаз между компонентами, ориентированными по осям x и z с учетом постоянного фазового сдвига, вносимого четвертьволновой пластинкой и равного $\pi/2$, будет

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + \pi \frac{U_m}{U_{\lambda/2}} \cos \omega t, \quad (107)$$

где $\Delta\varphi_0 = \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{\lambda} l (n_e - n_o)$.

Количественная оценка значений $U_{\lambda/2}$, полученных для продольного и поперечного эффектов, свидетельствует о том, что при поперечном электрооптическом эффекте ту же глубину модуляции можно получить при значении модулирующего напряжения в $l/(2d)$ раз меньше, чем при продольном эффекте, что является несомненным преимуществом поперечного электрооптического эффекта. В то же время наличие второго слагаемого у параметра $\Delta\varphi_0$, обусловленного естественной анизотропией кристалла, значительно снижает стабильность работы модулятора при изменении внешних условий (в частности, при изменении температуры окружающей среды), а также при незначительных изменениях длины волны несущих колебаний.

Расчеты показывают, что для кристалла KDP длиной 10 мм изменения температуры на 1°C вызывают при поперечном эффекте изменения постоянного фазового сдвига $\Delta\varphi_0$ на величину около 70° . Следствием таких изменений являются значительные смещения рабочей точки на модуляционной характеристике (см. рис. 47, а) и связанные с ними искажения формы «гоibaющей» несущих колебаний.

Для борьбы с нежелательными явлениями используют систему из двух идентичных кристаллов, расположенных на одной оси и повернутых вокруг этой оси относительно друг друга на 90° .

Обобщая изложенные выше особенности работы кристаллических модуляторов света, необходимо отметить, что несомненным достоинством рассмотренных модуляторов являются такие качества, как высокая прозрачность в видимой и ближней инфракрасной областях оптического диапазона, а также их малая

инерционность, позволяющая осуществлять модуляцию света с частотой до 10 ГГц и более. Вместе с тем кристаллам ADP и KDP свойственны такие недостатки, как невысокая механическая прочность и гигроскопичность, причем следствием последнего недостатка является ухудшение оптических свойств кристалла при попадании на его грани влаги. Поэтому при эксплуатации приходится создавать условия, исключающие возможность воздействия на них атмосферной влаги.

В этом отношении более перспективны твердотельные модуляторы света, у которых в качестве электрооптических элементов используются негигроскопичные кристаллы ниобата лития. Последние в отличие от ADP и KDP относятся к другому классу кристаллов, получивших название сегнетоэлектриков. Помимо достаточно высокой механической прочности и негигроскопичности к положительным качествам этих кристаллов следует отнести также существенно меньшее значение полуволнового напряжения, что позволяет получить требуемую глубину модуляции светового потока при меньших значениях модулирующего напряжения.

Наряду с твердотельными модуляторами оптического излучения в светодиодах находят применение и жидкостные модуляторы, получившие название ячеек Керра.

Принцип действия таких модуляторов также основан на использовании явления двойного лучепреломления с квадратичным электрооптическим эффектом (эффектом Керра). В отсутствие электрического поля жидкости, как правило, представляют собой аморфную среду. Однако при наличии поля отдельные жидкости приобретают свойства одноосных кристаллов. При этом жидкость становится анизотропной средой, в которой скорость распространения света зависит от положения плоскости поляризации относительно направления напряженности электрического поля.

Наиболее ярко анизотропные свойства выражены в химически чистом нитробензоле, представляющем собой летучую жидкость, которая в больших концентрациях ядовита. Температура кипения нитробензола $+210^{\circ}\text{C}$, а затвердевания $+5^{\circ}\text{C}$.

В жидкостных модуляторах света нитробензолом заполняется стеклянная кювета с вваренными в нее электродами. Вся эта конструкция получила название конденсатора Керра (рис. 50).

Так же как и в твердотельных модуляторах, с помощью оптического элемента, в котором наблюдается явление двойного лучепреломления, удается реализовать фазовую модуляцию проходящего через конденсатор Керра лучистого потока, для чего к электродам этого конденсатора подводится напряжение, определяемое формулой (102), т. е. состоящее из постоянного напряжения смещения U_0 и переменного модулирующего напряжения с амплитудой U_m и частотой ω .

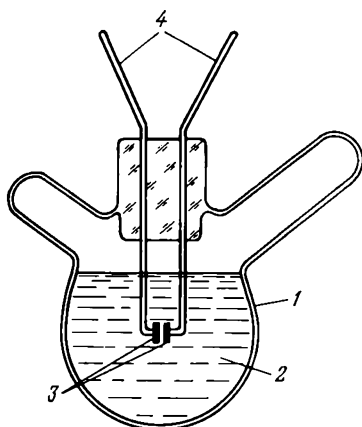


Рис. 50. Схема конденсатора Керра:

1 — стеклянная колба; 2 — нитробензол;
3 — электроды; 4 — выводы электродов

Плоскополяризованный свет от источника оптического излучения пропускается между электродами конденсатора Керра (рис. 51), причем плоскость поляризации света ориентируется под углом 45° к направлению электрического поля. Если в дальнόμεре используется источник неполяризованного излучения, то перед конденсатором Керра устанавливается поляризатор. При прохождении через нитробензол, находящийся под воздействием электрического поля, компоненты световой волны, ориентированные соответственно по направлению электрического поля и перпендикулярно к нему, т. е. по осям y и z , получают различные фазовые задержки.

Разность фаз между компонентами на выходе конденсатора Керра определяется при этом следующим соотношением:

$$\Delta\varphi = 2\pi B l E^2 = \frac{2\pi B l}{d^2} u^2, \quad (108)$$

где B — постоянная Керра, характеризующая электрооптические свойства нитробензола на заданной длине волны оптического излучения; l — длина активного пути в конденсаторе Керра, практически равная длине электродов по ходу луча света; $E = u/d$ — напряженность электрического поля; u — величина приложенного к конденсатору Керра напряжения; d — расстояние между электродами.

Введя обозначение $U_{\lambda/2} = \frac{d}{\sqrt{2Bl}}$ уравнение (108) с учетом соотношения (102) принимает вид

$$\Delta\varphi = \pi \left(\frac{u}{U_{\lambda/2}} \right)^2 = \pi \left(\frac{U_0 + U_m \cos \omega t}{u_{\lambda/2}} \right)^2, \quad (109)$$

где $U_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение, при котором разность фаз $\Delta\varphi$ между оптическими компонентами равна π .

Сопоставление формул (103) и (109) свидетельствует об упомянном выше различии между эффектами Погкельса и Керра, состоящем в том, что в первом случае интересующая нас разность фаз пропорциональна первой степени приложенного напряжения, а во втором — квадрату этого напряжения.

Как уже отмечалось выше, в современных светодиальномерах чаще всего используется амплитудная модуляция света.

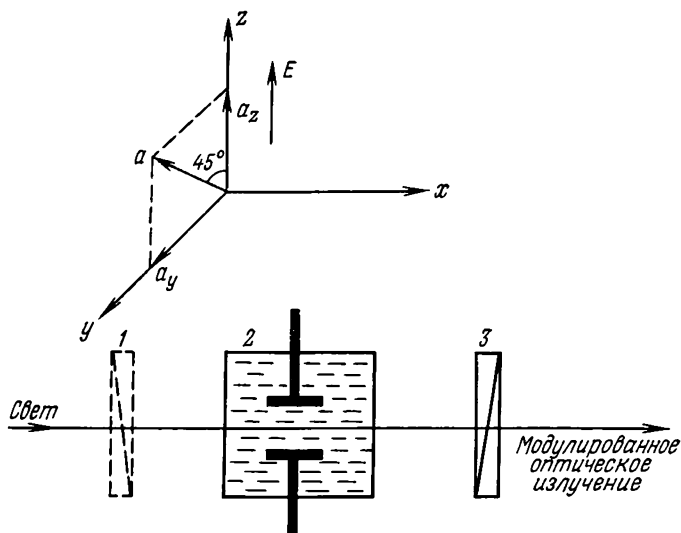


Рис. 51. Схема ячейки Керра:
1 — поляризатор; 2 — конденсатор Керра; 3 — анализатор

Преобразование фазовой модуляции в амплитудную осуществляется так же, как и в твердотельных модуляторах с помощью устанавливаемого после конденсатора Керра анализатора света (см. рис. 51), плоскость поляризации которого ориентирована под углом 90° по отношению к плоскости поляризации входящего в конденсатор Керра оптического излучения. Совокупность конденсатора Керра с анализатором (а в отдельных случаях и с поляризатором) получила название ячейки Керра. Величина лучистого потока на выходе из ячейки Керра определяется соотношением

$$\Phi = \Phi_m \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} = \Phi_m \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{u}{U_{\lambda/2}} \right)^2 \right].$$

Последняя зависимость $\Phi = \varphi(u)$ представляет собой модуляционную характеристику ячейки Керра. Графический вид этой характеристики показан на рис. 52. Ее отличительная особенность от модуляционной характеристики твердотельных кристаллических модуляторов света (см. рис. 47) состоит в том, что из-за квадратичной зависимости между приложенным к ячейке Керра напряжением U и разностью фаз $\Delta\varphi$, которую приобретают ортогональные компоненты световой волны, искривления характеристической кривой более значительны. Вследствие этого форма «оггибающей» оптического излучения подвержена более значительным искажениям.

Одним из наиболее существенных недостатков жидкостных модуляторов рассматриваемого типа являются высокие полу-

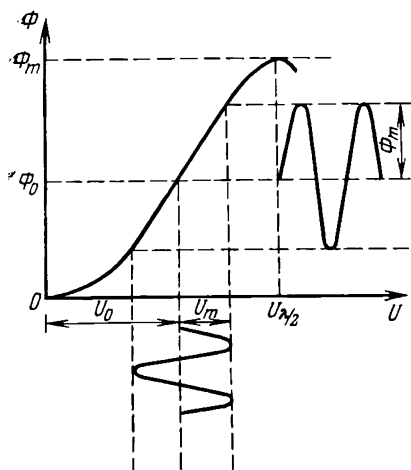


Рис. 52. Модуляционная характеристика ячейки Керра

кую прозрачность в диапазоне длин колебаний оптического диапазона от 0,45 до 1,1 мкм. Потребляемая конденсатором Керра мощность от модулирующего генератора составляет величину, равную нескольким ваттам. Несмотря на то что нитробензол затвердевает при температуре $+5^{\circ}\text{C}$, светодальномеры с такими модуляторами могут работать и при более низких температурах окружающей среды. Такая возможность обусловлена тем, что во время работы дальномера в нитробензоле выделяется значительное количество тепла, которое существенно повышает его температуру.

Основные принципы управления несущими СВЧ колебаниями, используемые в фазовых радиодальномерах

В геодезических фазовых радиодальномерах для управления несущими колебаниями используется, как правило, частотная модуляция (ЧМ), при реализации которой в такт с модулирующими колебаниями изменяется частота несущих колебаний. Поскольку последняя определяется параметрами СВЧ генератора, то при ее осуществлении модулирующие колебания непосредственно воздействуют на упомянутый генератор. В результате этого в большинстве случаев отпадает необходимость использования отдельного внешнего модулятора СВЧ колебаний.

В § 19 было показано, что несущую частоту в СВЧ генераторах, входящих в состав современных УКВ радиодальномеров, изменяют либо за счет изменения размеров объемного резонатора (механическая настройка), либо за счет изменения одного из напряжений питания (электронная настройка). Поскольку

волновые напряжения, которые при практически используемых конструкциях конденсаторов Керра составляют величину в несколько киловольт, что, в свою очередь, обуславливает необходимость использования высоких модулирующих напряжений.

Инерционность электрооптического эффекта в нитробензоле сравнительно мала. В светодальномерах ячейки Керра с успехом используют для модуляции света с частотой до 50 МГц. Прозрачность нитробензола существенно зависит от степени его очистки. Хорошо очищенный нитробензол имеет достаточно высо-

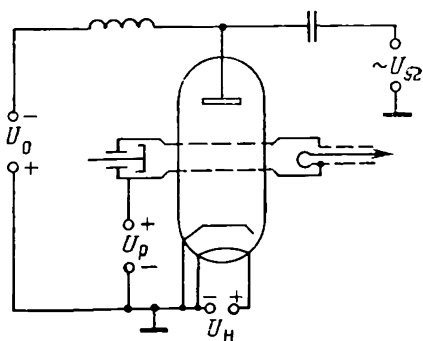


Рис. 53. Схема СВЧ генератора на отражательном клистроне

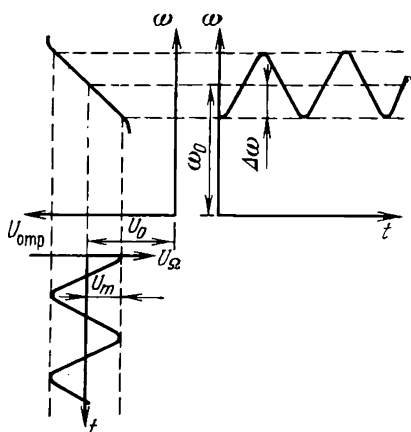


Рис. 54. Модуляционная характеристика клистронного генератора

при модуляции возникает необходимость изменения несущей частоты с высокой скоростью, то из двух отмеченных выше способов для управления частотой несущих колебаний применяют электронный метод.

Для осуществления частотной модуляции в клистронном генераторе на его отражательный электрод наряду с постоянным отрицательным напряжением U_0 подают также и переменное гармоническое модулирующее напряжение с амплитудой U_m и частотой Ω (рис. 53). При этом суммарное напряжение на отражательном электроде клистрона определяется формулой

$$u = -U_0 + U_m \cos \Omega t. \quad (110)$$

Под воздействием данного напряжения изменяется частота колебаний, генерируемых клистронным генератором. Зависимость между величиной этого напряжения и частотой генератора определяется модуляционной характеристикой, графический вид которой приведен на рис. 54. Из рисунка видно, что при работе в пределах линейного участка модуляционной характеристики несущая частота изменяется по тому же закону, что и модулирующее напряжение, т. е.

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega \cos \Omega t, \quad (111)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ — центральная частота; $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ — девиация частоты.

Знак «минус» перед вторым слагаемым указывает на то, что модулирующее напряжение и несущая частота изменяются со сдвигом фаз на 180° .

Математически частотно-модулированные СВЧ колебания на выходе клистронного генератора определяются в соответствии с формулой (29) соотношением

$$u_{\text{чм}} = U_m \cos(\omega_0 t + \beta \sin \Omega t + \varphi_0). \quad (112)$$

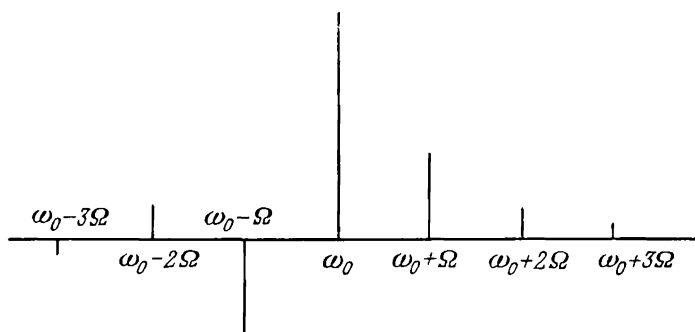


Рис. 55. Частотный спектр ЧМ колебаний

Индекс модуляции β , равный отношению девиации частоты $\Delta\omega$ к частоте модулирующих колебаний Ω , выбирается в радиодальномерах небольшим, порядка 0,7—0,8. Для таких значений β при частоте модуляции, равной 10—15 МГц, девиация несущей частоты Δf составляет величину, лежащую в пределах от 7 до 12 МГц.

Частотный спектр ЧМ колебаний, характерный для небольшого значения индекса модуляции, показан на рис. 55. Перпендикуляр, отложенный вниз на этом рисунке, условно означает, что начальная фаза данной гармоники сдвинута на 180° относительно начальной фазы основной составляющей несущей частоты.

Для передачи информации о величине измеряемого расстояния необходимы колебания с частотами ω_0 и $\omega_0 \pm \Omega$. Наличие же в спектре высших составляющих с частотами $\omega_0 \pm 2\Omega$, $\omega_0 \pm 3\Omega$ и т. д. может приводить лишь к появлению дополнительных ошибок измерений. Поэтому в радиодальномерах выбирают такой режим работы модулятора, при котором обеспечивается малая величина этих составляющих (при $\beta = 0,7$ амплитуда гармоник с частотами $\omega_0 \pm 2\Omega$ составляет около 7%, а с частотами $\omega_0 \pm 3\Omega$ — около 1% от амплитуды центральной несущей частоты).

Если в радиодальномере источником колебаний служит генератор на диоде Ганна, то частотная модуляция излучаемых СВЧ колебаний осуществляется в большинстве случаев за счет введения в резонатор дополнительного полупроводникового диода — варактора, при изменении напряжения на котором изменяются его параметры (в частности, междуэлектродная емкость), а как следствие, и резонансная частота объемного резонатора. Модуляционная характеристика в данном случае представляет собой зависимость несущей частоты от напряжения на варакторе. В качестве примера на рис. 56 приведена характеристика, из которой видно, что на варактор наряду с переменным модулирующим напряжением подают и постоян-

ное напряжение смещения. При работе в пределах линейного участка характеристики частота несущих колебаний изменяется в соответствии с изменением напряжения на варакторе. Следует при этом заметить, что крутизна и линейность модуляционной характеристики могут существенно изменяться от образца к образцу, что является существенным недостатком генераторов на диодах Ганна.

Описанные выше методы модуляции, нашедшие применение в современных фазовых УКВ радиодальномерах, обладают малой инерционностью и небольшим потреблением энергии от модулирующего генератора. Предельная частота модуляции ограничивается при этом не инерционными свойствами системы управления несущими колебаниями, а добротностью используемого объемного резонатора, которая определяет полосу пропускания всего передающего тракта. Для того чтобы боковые составляющие с частотами $\omega \pm \Omega$ не выходили за пределы этой полосы, частоту модуляции в радиодальномерах, как правило, ограничивают величиной, равной 15—20 МГц. В тех случаях, когда возникает необходимость применения более высоких частот модуляции (порядка 100—150 МГц), в схему радиодальномера вводят внешние СВЧ модуляторы.

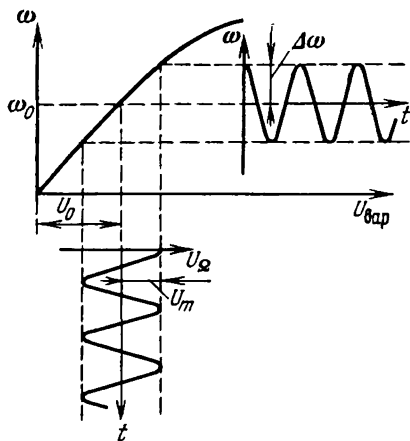


Рис. 56. Модуляционная характеристика генератора на диоде Ганна

§ 22. СИСТЕМЫ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ПРИЕМА НЕСУЩИХ КОЛЕБАНИЙ

В соответствии с рассмотренными выше принципами действия фазовых дальномеров для получения информации о величине интересующего нас расстояния необходимо модулированные несущие колебания передать с одного конца измеряемой линии на другой и обратно. При этом для обеспечения максимальной дальности действия дальномера выходящий из передающего устройства поток электромагнитной энергии должен быть сконцентрирован в виде узкого параллельного пучка, ориентированного на удаленный отражатель пассивного или активного типа. В приемном устройстве дальномера для концентрации приходящей с дистанции электромагнитной энергии на небольшой рабочей поверхности входного устройства возникает необходимость преобразования параллельного пучка в сходящийся. Кроме того, в процессе канализации используемых излучений

по передающему и приемному трактам внутри дальномера возникает во многих случаях необходимость ответвления той или иной части излучаемой энергии как для внутренней связи передатчика с приемником с целью образования оптического короткого замыкания, так и для формирования опорного сигнала. Все перечисленные выше функции выполняют в дальномерах специальные оптические или радиотехнические устройства для направленного излучения и приема.

При решении задачи формирования излучения определенной направленности в оптическом и СВЧ диапазонах используется много общих закономерностей. Однако при технической реализации как отдельных элементов, так и рассматриваемых систем в целом возникают существенные различия. В связи с этим проанализируем принципы построения этих систем для оптического и радиотехнического диапазонов отдельно.

Оптические системы, используемые в светодальномерах

В состав геодезических фазовых светодальномеров входят, как правило, три основные оптические системы: передающая, приемная и отражающая. Первые две конструктивно объединяются в приемопередатчике светодальномера, а третья составляет основу пассивного отражателя, устанавливаемого на другом конце измеряемой линии.

Передающая оптическая система включает обычно в себя всю совокупность оптических элементов, расположенных на пути прохождения света от источника до выхода из приемопередатчика светодальномера в направлении на удаленный отражатель, в том числе и рассмотренные в предыдущем параграфе составные элементы внешних модуляторов света.

Основное назначение данной системы состоит в том, чтобы с минимальными потерями передать свет по внутреннему передающему оптическому тракту дальномера и направить его в виде узкого параллельного пучка на удаленную отражающую оптическую систему. При этом с помощью отдельных элементов передающей оптической системы выполняются и такие вспомогательные операции, как преобразование неполяризованных излучений в поляризованные, одного вида поляризации в другой, поочередное направление света на удаленный отражатель и по линии оптического короткого замыкания и т. д.

Размеры и масса рассматриваемой системы оказывают существенное влияние на технические характеристики всего светодальномера. Поэтому при выборе такой системы уделяют значительное внимание тому, чтобы ее габарит и масса были минимальными. Исходя из этого, при проектировании светодальномеров всегда стремятся к тому, чтобы максимальное количество оптических элементов входило одновременно как

в передающую, так и в приемную оптическую систему, т. е. по возможности объединяют функции этих систем.

Используемые в современных светодальномерах схемы оптических систем отличаются большим разнообразием. Поэтому ниже рассмотрены лишь самые общие принципы построения таких систем.

На выбор схемы передающей оптической системы определяющее влияние оказывают такие характерные особенности дальномера, как его дальность действия, тип источника света и способ модуляции оптического излучения.

В современных светодальномерах, предназначенных для измерения линий значительной длины (до нескольких десятков километров), в качестве излучателей применяют, как правило, газовые гелий-неоновые лазеры, а модуляция осуществляется с помощью внешних модуляторов света. Поскольку газовые лазеры обеспечивают высокую направленность выходящего из них светового пучка, то это обстоятельство существенно облегчает проектирование передающих оптических систем. В частности, если действующее отверстие модулятора превышает диаметр выходящего из лазера пучка света, то на участке между источником излучения и модулятором отпадает необходимость установки таких вспомогательных оптических устройств, как конденсоры, с помощью которых производится переформирование пучка с целью концентрации максимального количества электромагнитной энергии в оптическом отверстии модулятора.

В связи с тем что на выходе из модулятора высокая, свойственная газовым лазерам направленность излучения, как правило, сохраняется, то в отдельных случаях при работе на сравнительно небольших расстояниях имеется возможность вообще отказаться от использования передающей оптической системы, т. е. на пути прохождения света от модулятора до выхода из прибора исключить размещение каких-либо оптических устройств, переформирующих излучаемый световой поток. Однако уже на расстоянии в 10 км при характерной для гелий-неоновых лазеров расходимости пучка, равной $10'$, диаметр светового пучка оказывается приблизительно равным 30 м, в то время как диаметр отражателя не превышает 0,5—0,8 м. Следовательно, основная часть светового потока будет проходить мимо отражателя, и необходимость использования оптической системы для уменьшения расходимости выходящего из светодальномера пучка света становится очевидной. Практически добиваются того, чтобы диаметр пучка на отмеченном выше расстоянии составлял величину 2—3 м, что соответствует расходимости лучистого потока, равной $0,7$ — $1,0'$.

Исходя из вышеизложенного, к передающим оптическим системам в дальномерах с газовыми лазерами предъявляются требования уменьшения расходимости светового пучка в 10—15 раз. Эта задача обычно решается с помощью телескопиче-

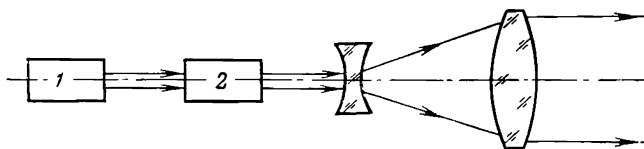


Рис. 57. Передающая телескопическая коллимирующая система светодальномера:

1 — источник излучения (газовый лазер); 2 — модулятор света

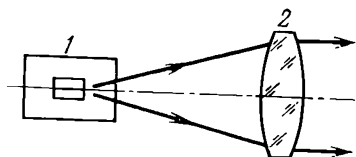


Рис. 58. Упрощенная схема линзовой передающей оптической системы, используемой в дальномерах с полупроводниковыми излучателями:

1 — полупроводниковый излучатель; 2 — линзовый объектив

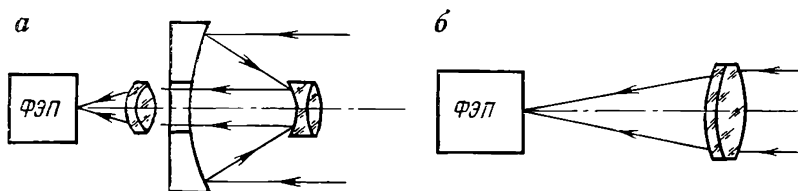


Рис. 59. Приемные оптические системы светодальномеров

ской коллимирующей системы (рис. 57), состоящей из отрицательной (рассеивающей) и положительной (собирающей) линз.

В светодальномерах ближнего радиуса действия (до 2—5 км) в качестве источников несущих колебаний оптического диапазона в большинстве случаев используют полупроводниковые излучатели с внутренней модуляцией. Расходимость излучаемого светового пучка в отмеченных источниках значительно больше, чем в газовых лазерах. Однако из-за отсутствия внешнего модулятора света в дальномерах с такими источниками не возникает необходимость переформирования лучистого потока с целью концентрации максимального количества излучаемой энергии во входном оптическом отверстии модулятора. Поэтому полупроводниковый излучатель может быть установлен непосредственно в фокальной плоскости передающей оптической системы (рис. 58), в качестве которой в большинстве случаев используют линзовый объектив.

Основная задача приемной оптической системы дальномера состоит в том, чтобы перехватить максимальное количество приходящей от удаленного отражателя лучистой энергии и сконцентрировать ее на светочувствительной поверхности фотоэлектронного приемника. Кроме того, с помощью этой сис-

темы решаются и такие вспомогательные задачи, как селекция принимаемого сигнала, т. е. ослабление или полное устранение вредного влияния сторонних излучений, обеспечение на фотоприемнике постоянной величины лучистого потока независимо от условий видимости и длины измеряемой линии, стабилизация положения светового пятна на чувствительной площадке фотоприемника.

При проектировании приемной оптической системы стремятся к тому, чтобы она была соосна с передающей оптической системой, т. е. желательно, чтобы главные оптические оси этих систем совпадали. Такая объединенная приемопередающая оптическая система получила название коаксиальной. Если же по каким-либо техническим причинам не удастся реализовать упомянутое совмещение, то относительный разнос отмеченных осей в плоскости поперечного сечения излучаемого и принимаемого световых потоков стремятся сделать минимальным. Это требование обусловлено тем, что при использовании узконаправленных лучей с небольшим поперечным сечением основная часть принимаемого от отражателя лучистого потока направляется обратно в передающую, а не в смещенную относительно нее приемную трубу. Указанное явление частичного или полного расположения приемной трубы за пределами поперечного сечения поступающего от отражателя пучка света наиболее контрастно проявляется при измерении коротких линий, так как на таких линиях при заданной расходимости излучаемого пучка его диаметр на входе в дальномер имеет небольшую величину.

Для того чтобы перехватывать максимальное количество поступающей от отражателя световой энергии, при проектировании дальмера стремятся увеличить диаметр входного отверстия приемной оптической системы. Исходя из этого, в приемных устройствах дальномеров дальнего действия чаще всего используют зеркально-линзовые системы (рис. 59, а). Что касается дальномеров, предназначенных для измерения коротких линий, то в них находят широкое применение линзовые системы (рис. 59, б), позволяющие уменьшить массу и габарит всего прибора.

Ослабление вредного влияния излучений, создаваемых сторонними источниками (в том числе и солнечного освещения), производится за счет установки на пути прохождения света от входа в дальномер до фотоэлектронного приемника (ФЭП) различного рода диафрагм и светофильтров.

Диафрагмы позволяют осушествить пространственную селекцию, т. е. избавиться от посторонних засветок, которые в фокальной плоскости объектива не совмещены с положением изображения полезного источника излучения.

С помощью светофильтров производится спектральная селекция, т. е. на вход фотоприемника пропускаются электромаг-

нитные колебания сравнительно узкого диапазона, соответствующего диапазону излучаемых передающим устройством несущих колебаний. Все сторонние излучения, спектр которых лежит за пределами полосы пропускания светофильтра, при этом отсеиваются.

Спектральная селекция реализуется в дальномергах, как правило, с помощью интерференционных светофильтров. Основу такого светофильтра составляет прозрачная пластинка, на которую с двух сторон наносятся полупрозрачные металлизированные покрытия. Свет, проходящий через такую пластинку, частично отражается от данных покрытий. В результате на выходе из пластинки наблюдается взаимодействие излучения, прошедшего пластинку без отражений, с излучениями, несколько раз отразившимися от полупрозрачных покрытий. При этом максимальное пропускание фильтра соответствует тем длинам волн, для которых оптическая толщина пластинки кратна полуволне, так как при таком условии прямые и отраженные волны будут совпадать по фазе, вследствие чего результирующие колебания с отмеченной длиной волны будут иметь максимальную амплитуду.

Обеспечение постоянной величины лучистого потока на рабочей поверхности светочувствительного слоя фотоприемника (что необходимо для исключения влияния отдельных источников погрешностей измерения) осуществляется с помощью нейтральных фильтров переменной плотности. Основу используемых в дальномерной технике нейтральных фильтров, получивших название «серых клиньев», составляют в большинстве случаев стеклянные диски, которые в зависимости от угла поворота вокруг своей оси имеют различную прозрачность. Выравнивание лучистого потока на входе в фотоприемник производится, как правило, вручную поворотом этого диска. С целью автоматизации данного процесса предпринимаются попытки использования в качестве нейтральных фильтров жидких кристаллов, оптическая прозрачность которых зависит от величины приложенного к ним электрического напряжения.

Стабилизация положения светового пятна на фотокатоде светочувствительного элемента связана с необходимостью исключения влияния источников погрешностей, свойственных фотоприемникам. Практическая реализация такой стабилизации осуществляется за счет введения в приемный оптический тракт таких дополнительных оптических элементов, как световоды, специально рассчитанные призмы и линзы, а также ограничивающие диафрагмы.

Введение перечисленных выше дополнительных оптических устройств неизбежно связано с усложнением всей приемной оптической системы.

При решении проблемы конструктивного объединения передающей и приемной оптических систем используются различ-

ные технические приемы. В качестве примера на рис. 60 приведена упрощенная коаксиальная приемопередающая оптическая система, нашедшая применение в светодальномерах дальнего действия.

Световой поток, излучаемый газовым лазером 1, пропускается в такой системе через внешний модулятор света 2, а затем с помощью телескопической коллимирующей системы, состоящей из рассеивающей линзы 3, призмы 4 и собирающей линзы 5, в виде параллельного пучка направляется на удаленный отражатель. Пришедший от отражателя свет с помощью приемной зеркально-линзовой системы, состоящей из сферического зеркала 6, отрицательной линзы 7 и поворотной призмы 4, концентрируется на входе фотоприемника 8.

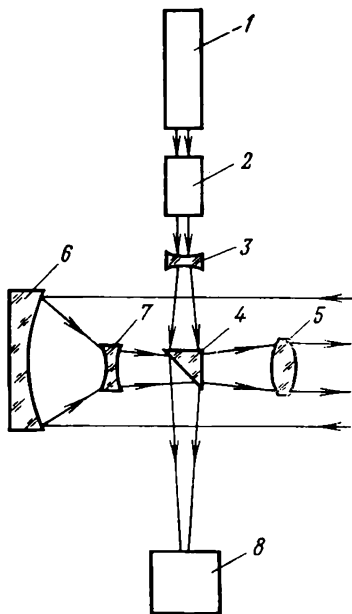


Рис. 60. Схема совмещенной коаксиальной приемопередающей оптической системы

Для иллюстрации технических решений, позволяющих не только объединить передающую и приемную оптические системы, но и автоматизировать процесс переключения светового потока с целью его посылки как на удаленный отражатель, так и по линии ОКЗ, на рис. 61 приведена другая оптическая система, нашедшая применение в светодальномерах ближнего радиуса действия.

При использовании данной системы излучение от полупроводникового источника 1, позволяющего осуществить внутреннюю модуляцию, с помощью собирающей линзы 2 формируется в параллельный световой пучок, проходящий через одно из отверстий в диске 3, который вращается вокруг своей оси с помощью электромотора 4. Если в какой-либо заданный момент времени свет проходит через более удаленное от центра диска отверстие, то он попадает на поворотную призму 5, а затем с помощью зеркальной пластинки 6 и телескопического коллимирующего объектива, состоящего из отрицательной и положительной линз (7 и 8), направляется на удаленный отражатель. Пришедший от отражателя свет с помощью оптических элементов 8, 7, 6, 5 и собирающей линзы 9 направляется в фотоприемник 10. В следующий момент времени, когда на пути выходящего из источника излучения находится расположенный ближе к центру диска вырез, то свет по прямому

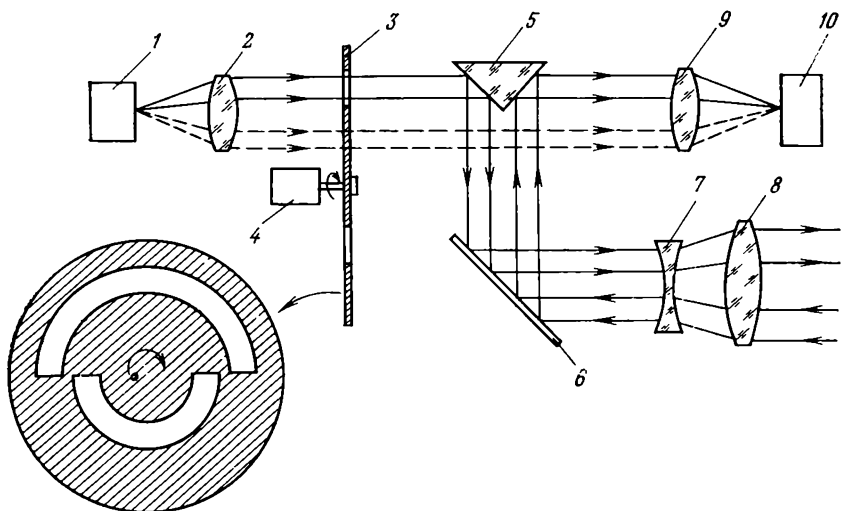


Рис. 61. Схема оптической системы с автоматическим переключением светового потока с ОКЗ на дистанцию

пути направляется в фотоприемник (на рисунке этот путь условно обозначен штриховыми линиями).

При наличии такой коммутации на вход фотоприемника последовательно поступает информация то от сигнала, прошедшего измеряемую линию, то от сигнала, поступившего по линии короткого оптического замыкания.

Переходя к краткому рассмотрению общих принципов построения отражающих оптических систем, составляющих основу пассивного отражателя, сформулируем прежде всего требования, которые предъявляются к этим системам.

Одно из основных требований состоит в том, чтобы перехватить максимальное количество лучистой энергии, исходящей от дальномера, и с минимальными потерями отразить ее обратно в направлении на дальномер. Для наиболее полного удовлетворения этого требования необходимо, чтобы диаметр отражателя был по возможности близок к диаметру светового пучка в точке установки этого отражателя. Поскольку с увеличением расстояния диаметр расходящегося светового пучка увеличивается, то чем длиннее измеряемая линия, тем больше должна быть площадь используемого отражателя.

Требованию минимальных потерь при переотражении света наиболее полно удовлетворяет плоское зеркало. Однако при эксплуатации такого отражателя возникают значительные трудности, связанные с необходимостью точного его наведения в направлении на удаленный дальномер. Эта задача существенно облегчается при использовании зеркально-линзовых и призмных оптических систем. К настоящему времени наибольшее

распространение получили призмённые отражатели, составленные из трипельпризм.

Трипельпризма (рис. 62). представляет собой трехгранную пирамиду (фигура $ABDA_1$), изготовленную из оптического стекла. Углы при ее вершине A прямые. Пирамида с основанием BDA_1 может быть получена при сечении куба диагональной плоскостью. Поверхность BDA_1 ориентируется перпендикулярно к падающему на нее лучистому потоку Φ . Последний в результате трехкратного отражения от боковых зеркальных граней ABA_1 , ADA_1 и ABD выходит из призмы в том же направлении, что и падающий на призму пучок света. Это весьма ценное свойство трипельпризмы существенно облегчает процесс ориентировки отражателя относительно удаленного приемопередатчика дальномера.

Исследования, проведенные с трипельпризмами, свидетельствуют о том, что отраженный свет возвращается по направлению падающего при отклонении лучей до $20-30^\circ$ относительно нормали к основанию трипельпризмы. Однако применительно к дальномерной технике значительные углы разворота отражателя по отношению к направлению на дальномер могут обуславливать появление дополнительных погрешностей измерения за счет того, что лучи света до различных точек поверхности основания призмы проходят различные пути. Поэтому практически отражатель наводят на удаленный приемопередатчик с точностью около 1° .

Качество трипельпризменного отражателя, оцениваемое величиной нежелательного отклонения отраженных лучей в сторону от заданного направления, зависит прежде всего от того, насколько точно выдержаны углы при вершине A (см рис. 62). Так, например, при отклонении данных углов от 90° всего на $2''$ отраженный от трипельпризмы луч уходит в сторону на 1 м на расстоянии в 20 км. Исходя из этого, при изготовлении трипельпризм для светодальномеров стремятся к тому, чтобы прямые углы при ее вершине были выдержаны с точностью до нескольких угловых секунд.

Для уменьшения массы и стоимости трипельпризм отражатель обычно собирается из нескольких отдельных призм небольших размеров, образуя мозаику. С целью придания призмам более компактной конструкции острые окончания при вершинах B , D и A_1 обычно отсекаются.

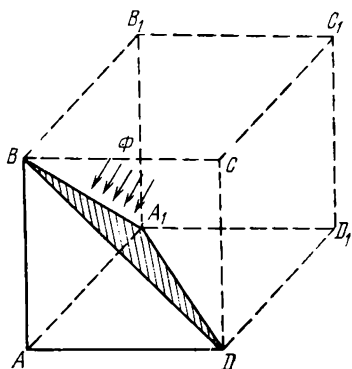


Рис. 62. Трипельпризма, полученная посредством сечения куба диагональной плоскостью

Антенно-фидерные устройства, применяемые в радиодальномерах

Основное назначение применяемых в геодезических фазовых УКВ радиодальномерах антенно-фидерных систем то же, что и приемопередающих оптических систем в светодальномерах, а именно: обеспечить узконаправленное излучение электромагнитной энергии СВЧ диапазона, ориентированное на удаленную станцию, а также прохождение СВЧ колебаний по внутренним каналам станции радиодальномера с минимальным затуханием.

Поскольку при радиодальномерных измерениях по концам линии размещаются две одинаковые станции, то и антенно-фидерные системы на этих станциях имеют, как правило, одинаковую конструкцию. Кроме того, одна и та же антенная система используется как для передачи, так и для приема радиоволн УКВ диапазона.

Соединительные линии, по которым канализируется электромагнитная энергия от источника к антенне и от антенны до входа в СВЧ приемник, получили в радиотехнике название фидерных линий. Если в радиодальномерах используются радиоволны с длиной волны более 3 см, то в качестве таких линий применяются в большинстве случаев коаксиальные кабели. При работе в трехсантиметровом и более коротковолновых диапазонах канализация электромагнитной энергии внутри станции осуществляется с помощью металлических труб прямоугольного или круглого сечения, получивших название волноводов.

При разработке радиодальномера на основе функциональной схемы, которая приведена на рис. 27, в фидерный тракт каждой станции вводят разветвитель, с помощью которого реализуется возможность работы передатчика и приемника на общую антенную систему, а также решается задача создания опорного сигнала за счет ответвления части излучаемой энергии в приемный тракт собственного приемника.

В современных радиодальномерах применяются различные конструкции разветвителей. В качестве примера на рис. 63 показана одна из конструкций такого разветвителя, получившего название волноводного тройника и используемого в радиодальномерах трехсантиметрового диапазона.

Для направленного излучения ультракоротких колебаний в радиодальномерах рассматриваемого типа применяют рупорные или зеркальные антенны.

Оценка качества применяемых в дальномерах антенных систем производится по такому основному параметру, как ее направленные свойства, которые принято характеризовать диаграммой направленности. Под последней понимают зависимость поверхностной плотности потока излучения от направления в пространстве. Обычно диаграмму направленности строят

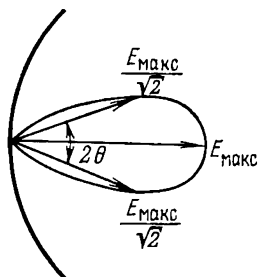
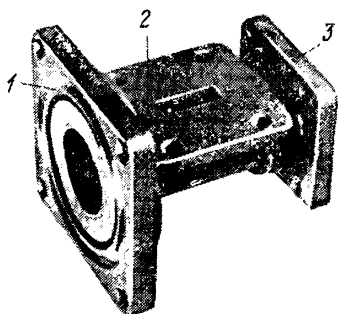


Рис. 64. Диаграмма направленности антенной системы радиодальномера

Рис. 63. СВЧ разветвитель (тройник):

1 — фланец для подключения антенной системы; 2 — фланец для подключения СВЧ смесителя; 3 — фланец для подключения источника СВЧ излучения

в полярной системе координат, для чего от центра антенной системы под различными углами проводят векторы, длина которых в условных единицах соответствует напряженности (или мощности) электромагнитного поля в заданном направлении. Кривая, соединяющая концы векторов, представляет собой диаграмму направленности (рис. 64). Под шириной диаграммы направленности принято понимать угол 2θ между направлениями, вдоль которых напряженность поля уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, а поток мощности — в два раза относительно максимального значения.

В практике радиодальномерных измерений используется и другой параметр, который характеризует способность антенны концентрировать излучаемую энергию в интересующем направлении. Этот параметр получил название коэффициента усиления антенны, под которым понимают число, показывающее, во сколько раз необходимо изменить мощность излучения при переходе от ненаправленной антенны к направленной с учетом потерь в последней при условии, что в точке приема величина сигнала сохраняется неизменной.

Наряду с перечисленными выше параметрами при создании портативных переносных станций радиодальномера важными показателями антенных систем являются их габариты и сложность конструкции. В этом отношении предпочтительнее рупорная антенна, применяемая в радиодальномерах трехсантиметрового диапазона и относящаяся к одной из простейших антенн УКВ диапазона.

В самом общем случае рупор представляет собой часть волноводного фидера с открытым концом, у которого для согласования излучательных характеристик со свободным пространством и для сужения диаграммы направленности площадь по-

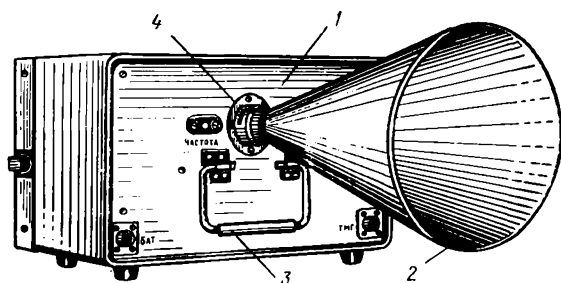


Рис. 65. Станция радиодальномера с конической рупорной антенной:

1 — панель радиодальномера со стороны крепления антенны; 2 — рупорная коническая антенна; 3 — ручка для переноса станции; 4 — волноводное сочленение

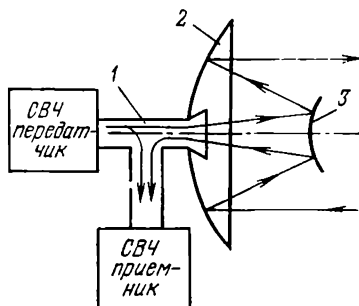


Рис. 66. Схема двухзеркальной антенны (антенны Кассегрена)

перечного сечения по мере приближения к открытому концу расширяется. В современных фазовых радиодальномерах находят применение как прямоугольные, так и конические рупоры. В качестве примера на рис. 65 приведена конструкция конического рупора, используемого в отечественных радиодальномерах трехсантиметрового диапазона.

Преимущество рупоров перед другими видами антенн состоит не только в простоте конструкции, но и в том, что рупорная антенна не нуждается в какой-либо настройке. К недостаткам такой антенны следует отнести тот факт, что она не позволяет сформировать узконаправленный пучок. Так, для практически используемых рупоров трехсантиметрового диапазона диаграмма направленности имеет ширину $15\text{--}25^\circ$, а коэффициент усиления таких антенн $100\text{--}150$. Следствием слабонаправленных свойств рупорных антенн является уменьшенная дальность действия радиодальномеров.

Для преодоления этого недостатка в радиодальномерах применяют зеркальные антенны, обеспечивающие значительное увеличение дальности действия.

Основными составными частями простейшей зеркальной антенны являются антенный облучатель и параболическая отражающая поверхность, которую по аналогии с эквивалентными оптическими устройствами часто называют зеркалом.

В радиодальномерах трехсантиметрового диапазона часто применяют такой тип зеркальной антенны, у которой в качест-

ве антенного облучателя используется открытый конец волновода, а зеркальная часть антенны состоит из двух зеркал: параболического и гиперболического. Такая антенная система получила название двухзеркальной (или антенны Кассегрена). На рис. 66 показано взаимное расположение основных частей такой антенны.

Излучение из открытого конца волновода 1 направляется на вспомогательное зеркало 3 диаметром 0,1—0,15 м, представляющее собой гиперboloид вращения, а после отражения от последнего — на основное зеркало 2 диаметром 0,4—0,5 м, которое представляет собой параболоид вращения. Необходимая взаимно перпендикулярная ориентация плоскостей поляризации передающего и приемного трактов достигается при этом за счет применения соответствующей конструкции разветвителя и типа электромагнитных волн, распространяющихся в волноводах.

Ширина диаграммы направленности рассмотренных зеркальных систем зависит как от диаметра основного зеркала, так и от длины волны используемых колебаний. При диаметре зеркала около 0,5 м диаграмма направленности зеркальной антенны в трехсантиметровом диапазоне имеет ширину около 5°. Коэффициент усиления таких антенн приближенно оценивается величинами 800—1200.

Из сопоставления рупорных и зеркальных антенн следует, что последние имеют более сложную конструкцию. Кроме того, в процессе изготовления станций радиодальномера (а иногда и в процессе эксплуатации) возникает необходимость в настройке зеркальных антенн. Поэтому зеркальные антенны применяют обычно в радиодальномерах, предназначенных для измерения линий значительной протяженности (до 50—100 км).

§ 23. ПРИЕМНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОПТИЧЕСКОГО И УКВ ДИАПАЗОНОВ

Для получения информации о величине измеряемой дальности излучения оптического или ультракоротковолнового диапазонов после прохождения ими искомого расстояния преобразуются в электрические сигналы, которые воздействуют на те или иные фазоизмерительные устройства. Преобразование принимаемой энергии электромагнитного поля в электрические сигналы производится с помощью специальных устройств. В оптическом диапазоне к таким устройствам относятся различного рода фотоэлектронные приборы, а в УКВ диапазоне — высокочувствительные СВЧ смесители и детекторы. Сформулируем требования, которые предъявляются к данным устройствам, и рассмотрим основные особенности работы приемников, которые находят применение в дальномерной технике. Из-за специфиче-

ских особенностей электромагнитных волн различных диапазонов рассмотрим отдельно требования для оптического и ультракоротковолнового диапазонов.

Приемники света

Основное назначение приемников света, используемых в светодальномерах, состоит в том, чтобы преобразовать поступающий от удаленного отражателя или по линии оптического короткого замыкания модулированный лучистый поток в электрические сигналы, которые необходимы для выполнения фазовых измерений в дальномере.

К фотоэлектронным приемникам света, нашедшим преимущественное распространение в современных светодальномерах, предъявляются следующие основные требования:

высокая чувствительность фотоприемника, позволяющая обеспечить нормальную работоспособность дальномера при очень слабых световых сигналах, приходящих от отражателя;

малая инерционность процесса преобразования световой энергии в электрическую, необходимая для того, чтобы реагировать на быстрые изменения величины лучистого потока, происходящие с частотой используемых модулирующих колебаний;

согласование максимума спектральной чувствительности фотоприемника со спектром излучения применяемого в дальномере источника света;

стабильность основных технических характеристик фотоприемника при изменяющихся внешних условиях, наличии посторонних фоновых засветок, изменении напряжения питания и других сторонних воздействиях.

Наряду с приведенными выше основными требованиями к фотоприемникам предъявляется целый ряд других требований, обусловленных спецификой работы того или иного дальномера. Так, в портативных топографических светодальномерах предъявляются весьма жесткие требования к габариту фотоприемника с исключением необходимости применения высоковольтных источников питания. Во многих типах светодальномеров фотоприемники используются не только для получения электрических сигналов, соответствующих «огibaющей» амплитудно-модулированного лучистого потока, но и для преобразования частоты этого сигнала. При этом к фотоприемнику как к преобразователю частоты электрических колебаний предъявляются дополнительные требования, обуславливающие эффективность работы такого преобразователя.

В связи с вышеизложенным рассмотрим основные особенности работы используемых в светодальномерной технике фотоприемников и оценим, насколько полно они удовлетворяют перечисленным выше требованиям.

Из всего обширного разнообразия существующих фотоэлектронных устройств в дальномерной технике нашли применение два основных типа фотоприемников: фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и фотодиоды.

Фотоэлектронный умножитель, который часто называют также фотоумножителем, представляет собой электровакуумный прибор, сочетающий в себе фотоэлемент, основанный на использовании внешнего фотоэффекта, с электронным усилителем. Основными составными частями ФЭУ являются фотокатод, диноды и анод, помещаемые в стеклянный баллон, из которого выкачан воздух.

Назначение фотокатода состоит в том, чтобы под воздействием падающего на него лучистого потока эмитировать (излучать) в окружающее пространство электроны, которые часто называют фотоэлектронами. Фотоэлектроны с помощью создаваемого в ФЭУ ускоряющего электрического поля и фокусирующей системы направляются на близлежащий к фотокатоду динод. Последний используется в фотоумножителе для увеличения количества возникающих под действием света электронов. Принцип действия динода основан на явлении вторичной электронной эмиссии, сущность которой состоит в том, что в результате электронной бомбардировки с поверхности динода выбиваются вторичные электроны, которые по своему количеству превышают число падающих первичных электронов. Коэффициент умножения количества электронов получил название коэффициента вторичной эмиссии. Для получения значительного коэффициента умножения в фотоумножителе используют несколько последовательно расположенных динодов, причем на пути пролета электронов от одного динода к другому создается ускоряющее фокусирующее электрическое поле. С последнего динода электроны попадают на анод, в электрической цепи которого возникает электрический ток, причем за счет умножения этот ток может более чем в миллион раз превышать ток фотокатода. Принципиальная схема фотоумножителя приведена на рис. 67.

Конструктивно фотокатод $\Phi К$ выполняется или в виде тонкой светочувствительной пленки, наносимой на внутреннюю торцевую стеклянную поверхность баллона ФЭУ, или специально сконструированного электрода, состоящего из металлической подложки, на которую наносится светочувствительный слой. Фотокатоды первого типа, работающие «на просвет», получили название полупрозрачных. При использовании таких фотокатодов лучистый поток падает на одну сторону светочувствительного слоя, а вылет фотоэлектронов происходит с противоположной стороны. Во втором типе фотокатодов реализуется принцип работы «на отражение», т. е. эмиссия фотоэлектронов происходит со стороны облучаемой поверхности фотокатода. В светодальномерных последних лет преимущественное распространение получили ФЭУ с полупрозрачными фотокатодами.

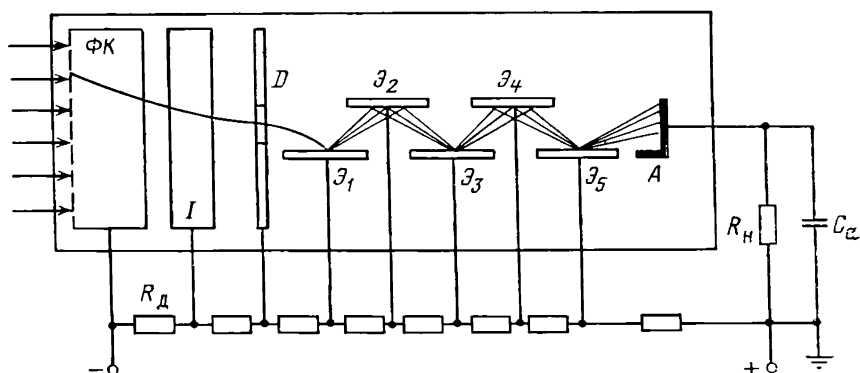


Рис. 67. Конструкция и схема включения ФЭУ

В пространстве между фотокатодом $\Phi К$ и первым динодом $\mathcal{E}_1$, которое получило название катодной камеры, размещаются вспомогательные электроды I и D (см. рис. 67), основное назначение которых состоит в том, чтобы обеспечить фокусировку вылетающих с фотокатода электронов в направлении на рабочую поверхность первого динода. Важным фактором при этом для ФЭУ, используемых в светодальномерах, является минимальный разброс времени пролета электронов, вылетающих с различных точек рабочей поверхности фотокатода.

Динодная система $\mathcal{E}_1 \dots \mathcal{E}_5$ включает в себя до 10—15 последовательно расположенных динодов, которые, так же как и упомянутые выше фотокатоды второго типа, состоят из металлической подложки, на которую наносится активный слой эмиссионного материала, обладающий достаточно высоким коэффициентом вторичной эмиссии. Для того чтобы электроны перемещались между динодами по заданным траекториям, этим электродам придается специальная форма и на них подается соответствующий электрический потенциал с делителя напряжения, образованного последовательно соединенными резисторами.

Вылетающие с последнего динода электроны попадают на анод фотоумножителя. Данный электрод также имеет специальную конструкцию, позволяющую улавливать максимальное количество электронов, поступающих со стороны последнего динода.

Для оценки качества применяемых в светодальномерной технике фотоумножителей представляют значительный интерес такие характеристики ФЭУ, как световая чувствительность (интегральная и спектральная), темновой ток, порог чувствительности и частотная характеристика.

Световую чувствительность всего фотоумножителя, которую часто называют также анодной чувствительностью, оценивают по величине анодного тока, обусловленного падающим на фо-

токарод лучистым потоком, величина которого принята за единицу. Измеряют этот параметр, как правило, в амперах на люмен (или в амперах на ватт).

Анодная чувствительность фотоумножителя зависит от чувствительности фотокатода и от коэффициента усиления, обеспечиваемого диодной системой. Последний зависит от приложенного к диодам напряжения. В связи с этим анодная чувствительность ФЭУ может изменяться в широких пределах в зависимости от величины напряжения питания.

Закономерность изменения спектральной чувствительности ФЭУ к различным длинам волн световых колебаний определяется в первую очередь материалом чувствительного слоя фотокатода. Максимум спектральной чувствительности для большинства используемых в дальномерной технике ФЭУ соответствует сине-зеленой части оптического спектра (диапазон длин волн от 0,40 до 0,58 мкм). Исключение составляют фотоумножители с серебряно-кислородно-цезиевыми фотокатодами, основной максимум спектральной чувствительности которых лежит в ближней инфракрасной части спектра (диапазон длин волн 0,80—0,85 мкм). Сопоставление указанных спектров, соответствующих максимальной чувствительности ФЭУ, со спектрами используемых в дальномерных источников излучения свидетельствует о том, что далеко не всегда удается достичь полного согласования этих спектров.

Для оценки возможности применения ФЭУ при работе с чрезвычайно слабыми световыми сигналами используются такие параметры, как темновой ток и связанный с ним порог чувствительности.

Под темновым током понимают величину тока в анодной цепи фотоумножителя, подключенного к источнику питания и защищенного от попадания на него каких-либо оптических излучений (т. е. находящегося в полной темноте). Основными причинами появления такого тока являются термоэлектронная и автоэлектронная эмиссии фотокатода и диодов, ток утечки между выводами анода и другими электродами, ионизация атомов остаточных газов в баллоне ФЭУ, т. е. совокупность причин, связанных с выбором материала чувствительного слоя фотокатода и диодов, а также с качеством изготовления ФЭУ. Флуктуации темнового тока характеризуют собственные шумы ФЭУ, которые, в свою очередь, при отсутствии фоновых засветок определяют порог чувствительности фотоприемника, т. е. тот минимальный уровень лучистого потока, при котором обеспечивается нормальная работоспособность дальномеров.

Разработанные за последние годы лучшие образцы фотоумножителей позволяют регистрировать отдельные фотоны, т. е. достигнут абсолютный порог чувствительности, обусловленный природой света. Однако для создания таких одноэлектронных фотоприемников приходится применять специальные меры, свя-

занные как с экспериментальным отбором лучших образцов ФЭУ, так и с разработкой специальных режимов их эксплуатации. Реальный порог чувствительности используемых в дальномерной технике фотоприемников существенно зависит от наличия фоновых засветок, от длины волны используемых колебаний, ширины полосы пропускания светофильтра, устанавливаемого на входе приемника, а также от целого ряда других вспомогательных факторов. Для светодальномеров с гелий-неоновыми лазерами при работе в ночных условиях этот порог чувствительности ориентировочно оценивается величинами $10^{-11} \div \div 10^{-12}$ лм.

Частотная характеристика позволяет оценить инерционные свойства фотоприемника. Применительно к светодальномерам она представляет собой зависимость величины электрического сигнала на выходе фотоприемника от частоты «ограничивающей» амплитудно-модулированного лучистого потока, т. е. характеризует изменения коэффициента усиления ФЭУ в зависимости от упомянутой частоты модуляции.

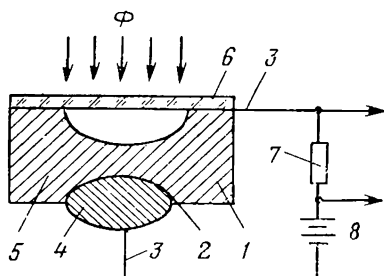
Анализ инерционных свойств фотоумножителей свидетельствует о том, что данные фотоприемники позволяют выделить на их выходе электрические сигналы с частотой до 100—150 МГц. Однако следует при этом отметить, что коэффициент усиления фотоумножителя существенно зависит от величины сопротивления анодной нагрузки. Для обеспечения высокой чувствительности это сопротивление стремятся увеличить (в фотоприемниках современных светодальномеров оно достигает 100 МОм и более). Из-за наличия различного рода емкостных нагрузок (емкость монтажа, выходная емкость ФЭУ, входная емкость усилительного каскада), которые оказываются подключенными к анодной нагрузке ФЭУ, коэффициент усиления фотоприемника с повышением частоты уменьшается. В результате этого уменьшается и чувствительность всего фотоприемника.

Для сохранения высокой чувствительности ФЭУ последние в светодальномерной технике работают, как правило, в режиме преобразования частоты, характерном для низкочастотного метода фазовых измерений (см. § 10). С этой целью к участку фотокатод — первый динод или фотокатод — специальный накладной электрод прикладывается переменное напряжение от вспомогательного генератора (гетеродина) с частотой, близкой к частоте модуляции лучистого потока. При этом на выходе ФЭУ выделяется низкочастотный сигнал с текущей фазой, равной разности текущих фаз принимаемого модулирующего сигнала и сигнала гетеродина.

Обобщая приведенные выше краткие сведения об особенностях работы применяемых в светодальномерах фотоумножителей, отметим, что данные фотоприемники достаточно полно удовлетворяют большинству из перечисленных ранее требований. Однако для их питания необходимы высоковольтные источники,

Рис. 68. Конструкция и схема включения полупроводникового фотодиода с электронно-дырочным переходом:

1 — полупроводниковый кристалл; 2 — p - n переход; 3 — электрические выводы; 4 — область с дырочной проводимостью (p -область); 5 — область с электронной проводимостью (n -область); 6 — защитная стеклянная пластинка; 7 — сопротивление нагрузки; 8 — источник питания



использование которых в малогабаритных экономичных светодиодах весьма нежелательно. Для преодоления указанной трудности в современных портативных светодиодах вместо фотоумножителей применяют фотодиоды в сочетании с отдельным функционирующим усилителем.

Основу фотодиода (рис. 68) составляет полупроводниковый кристалл 1 с p - n переходом 2, снабженный двумя электрическими выводами 3, к которым последовательно с нагрузкой 7 подключается источник постоянного тока 8. Поверхность кристалла, на которую падает лучистый поток, защищается от воздействия внешней среды стеклянной пластинкой 6.

За счет внешнего источника 8 на p - n переходе создаются условия для того, чтобы он для основных носителей тока обладал большим сопротивлением, т. е. на переходе создается запирающее напряжение смещения (обратное смещение).

Преобразование оптических сигналов в электрические осуществляется в таких фотоприемниках за счет возникновения неосновных носителей тока (в частности, дырок в облучаемой n -области) под воздействием падающего на рабочую поверхность фотодиода лучистого потока. Для таких носителей p - n переход обладает малым сопротивлением, вследствие чего во внешней электрической цепи фотодиода протекает фототок.

В качестве полупроводника в таких фотодиодах чаще всего используют германий или кремний. Применительно к светодиодам наибольшего внимания заслуживают кремниевые фотодиоды, темновой ток которых на порядок меньше, чем у германиевых. Кроме того, максимум спектральной чувствительности кремниевых фотодиодов, соответствующий длинам волн около 0,8 мкм, достаточно хорошо согласуется со спектром используемых в дальнометрах полупроводниковых источников излучения.

Указанные фотодиоды обладают высокой пороговой чувствительностью, позволяющей регистрировать слабые лучистые потоки, оцениваемые величиной $\Phi_{\min} \approx 1 \cdot 10^{-12}$ Вт.

Инерционные свойства фотодиодов зависят прежде всего от времени диффузии неосновных носителей через базу, т. е. от толщины кристалла на участке от облучаемой поверхности до

p-n перехода. В связи с этим толщину базы стремятся сделать по возможности минимальной. Так, при толщине базы в несколько микрон время диффузии оценивается величинами $10^{-7} \div 10^{-8}$ с, что позволяет использовать фотодиоды для выделения колебаний с частотами до $10 \div 100$ МГц. Для дальнейшего повышения быстродействия фотодиодов в них используют кристаллы со сложными переходами (в частности, с гетеропереходами). Другие типы фотоприемников (такие, как фотоэлементы, фоторезисторы и фототранзисторы) не нашли широкого применения в светодальномерной технике.

Приемники ультракоротких радиоволн

Используемые в радиодальномерной технике в качестве несущих колебаний ультракороткие радиоволны после прохождения измеряемого расстояния попадают в приемную антенно-фидерную систему. Как уже отмечалось выше, с помощью такой системы принимаемая от удаленной станции электромагнитная энергия направляется на вход приемного устройства, основное назначение которого состоит в том, чтобы выделить из модулированных несущих колебаний информационный сигнал, необходимый для работы фазоизмерительного устройства. При этом к приемникам фазовых радиодальномеров предъявляются те же требования, что и к описанным выше приемникам света. В частности, для повышения дальности действия радиодальномера приемник должен иметь высокую чувствительность, позволяющую обеспечить нормальную работу дальномера при очень слабых сигналах, приходящих от удаленной станции. Инерционные свойства тех узлов, с помощью которых производится выделение интересующих нас информационных сигналов из модулированных несущих колебаний СВЧ диапазона, не должны препятствовать протеканию достаточно быстродействующих процессов, связанных с таким преобразованием. Наконец, полоса пропускания приемного устройства должна быть согласована со спектром излучения станции, расположенной на другом конце измеряемой линии.

Следует отметить, что в современных УКВ радиодальномерах выполнение последних двух требований не вызывает технических трудностей. Поэтому при разработке таких приборов основное внимание уделяют выполнению первого требования, касающегося обеспечения высокой чувствительности приемника радиодальномера.

В качестве устройства, преобразующего электромагнитные колебания СВЧ диапазона в необходимые для работы дальномера электрические сигналы, во всех разработанных к настоящему времени УКВ радиодальномерах применяются полупроводниковые диоды.

Основу полупроводниковых диодов, как и фотодиодов, составляет полупроводниковый кристалл из германия или крем-

ния с p - n переходом, который в зависимости от особенностей его применения получил название детектора или смесителя. Выделение электрических сигналов из электромагнитных колебаний СВЧ диапазона осуществляется за счет использования свойств односторонней проводимости диода и связанной с этим нелинейностью его вольтамперной характеристики, а также за счет использования селективных свойств электрических фильтров, включаемых на выходе смесительного или детекторного каскадов.

Чувствительность упомянутых диодов, обуславливающая возможность обнаружения чрезвычайно слабых сигналов, лимитируется, прежде всего, уровнем собственных шумов, которые связаны как с тепловыми флуктуациями сопротивления диода, так и со спецификой прохождения электрического тока через полупроводник. Для обычной схемы детектора минимальная мощность СВЧ сигнала оценивается величиной порядка 10^{-9} Вт.

Существенное повышение пороговой чувствительности достигается при подаче на диод вспомогательного СВЧ сигнала, который обычно называют сигналом гетеродина, и выделении на выходе диода электрического сигнала разностной частоты. Диод, работающий в таком режиме, получил название смесителя. Для сравнения заметим, что при характерной для дальномеров полосе пропускания около 1 МГц пороговая чувствительность в смесительном режиме оценивается величиной 10^{-13} Вт, т. е. в 10 000 раз выше, чем в детекторном режиме.

В связи с вышеизложенным в современных УКВ радиодальномеров преимущественное распространение получила так называемая супергетеродинная схема, в которой на входе приемника устанавливается смеситель. На этот смеситель одновременно поступают сигналы как от приемной антенны, так и от вспомогательного генератора (гетеродина), в качестве которого используется свой собственный передатчик. Упрощенная схема входной части приемника радиодальномеров, работающего в трехсантиметровом диапазоне, показана на рис. 69.

В качестве смесителей в такой схеме чаще всего используются кремниевые полупроводниковые диоды специальной конструкции, собственный уровень шумов которых существенно меньше, чем у германиевых. К выходу смесительного каскада подключается колебательный контур LC , выполняющий роль фильтра и настроенный на промежуточную частоту $\omega_{\text{пр}}$.

Проанализируем закономерность изменения показанного на схеме выходного напряжения $U_{\text{пр}}$ при попадании на смеситель двух ЧМ колебаний, поступающих со стороны приемной антенны и от местного СВЧ источника. В соответствии с формулой (112) эти колебания описываются следующими уравнениями:

$$e_{\text{ЧМ}_1} = E_{m_1} \cos(\omega_1 t + \beta \sin \Omega_1 t); \quad (113)$$

$$e_{\text{ЧМ}_2} = E_{m_2} \cos(\omega_2 t + \beta \sin \Omega_2 t),$$

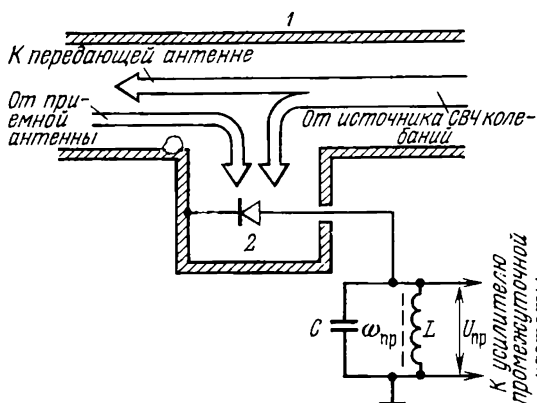
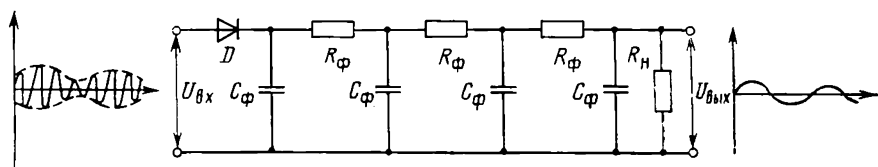


Рис. 69. Схема входной части приемника трехсантиметрового радиодальномера:

1 — волноводный тракт; 2 — СВЧ смеситель

Рис. 70. Схема амплитудного детектора



где E_{m_1} и E_{m_2} — амплитудные значения вышеуказанных колебаний; ω_1 и ω_2 — круговые несущие частоты принимаемых и передаваемых (гетеродинных) колебаний; Ω_1 и Ω_2 — круговые частоты модулирующих колебаний на удаленной и местной станциях радиодальномера.

Для упрощения в данных формулах начальная фаза φ_0 принята равной нулю, а индексы частотной модуляции приняты на обеих станциях радиодальномера равными друг другу ($\beta_1 = \beta_2 = \beta$).

Поскольку эти колебания воздействуют на смеситель одновременно, то результирующая напряженность поля на смесителе будет соответствовать сумме $e_{чм_1}$ и $e_{чм_2}$.

Определим ток, который будет протекать в цепи смесителя под воздействием указанной напряженности поля. В общем виде рабочий участок вольтамперной характеристики используемого в схеме диода может быть аппроксимирован уравнением

$$i = b_0 + b_1(e_{чм_1} + e_{чм_2}) + b_2(e_{чм_1} + e_{чм_2})^2, \quad (11)$$

где b_0 , b_1 и b_2 — вспомогательные, экспериментально определяемые коэффициенты пропорциональности.

Если в данную формулу подставить значения $e_{чм_1}$ и $e_{чм_2}$ из уравнения (113), выполнить математические преобразования с целью представления величины i в виде суммы простых гармонических колебаний, а затем выделить колебания только разностной промежуточной частоты (последние функции выполня-

ет колебательный контур), то формула для тока промежуточной частоты приобретает следующий вид:

$$i_{\text{пр}} = I_{m_{\text{пр}}} (1 + m \cos \Omega_p t) \cos \omega_{\text{пр}} t. \quad (115)$$

В этой формуле, представляющей собой уравнение амплитудно-модулированных колебаний, приняты следующие обозначения: $I_{m_{\text{пр}}}$ — амплитудное значение тока промежуточной частоты при отсутствии модуляции; m — коэффициент глубины модуляции; $\Omega_p = \Omega_1 - \Omega_2$ — частота «огигающей» образовавшихся АМ колебаний; $\omega_{\text{пр}} = \omega_1 - \omega_2$ — промежуточная частота.

При протекании тока через колебательный контур на последнем создается падение напряжения, равное

$$u_{\text{пр}} = U_{m_{\text{пр}}} (1 + m \cos \Omega_p t) \cos \omega_{\text{пр}} t, \quad (116)$$

где $U_{m_{\text{пр}}}$ — амплитудное значение напряжения промежуточной частоты на выходе смесительного каскада при отсутствии модуляции.

Таким образом, при воздействии на смеситель двух частотно-модулированных СВЧ сигналов на его выходе с помощью колебательного контура удастся выделить амплитудно-модулированный сигнал разностной частоты, причем амплитуда этих колебаний изменится с частотой Ω_p , равной разности частот модулирующих колебаний ведущей и ведомой станций радиодальномера.

Информацию о величине измеряемого расстояния несет в таком сигнале «огигающая» АМ колебаний промежуточной частоты. Поэтому дальнейшая задача приемного устройства радиодальномера состоит в том, чтобы выделить из АМ колебаний сигнал с частотой Ω_p , соответствующей «огигающей» этих колебаний, что производится с помощью амплитудного детектора.

Не останавливаясь на детальном рассмотрении физических процессов, происходящих в амплитудном детекторе, заметим только, что его основу, так же как и СВЧ смесителя, составляет полупроводниковый диод, обладающий свойствами односторонней проводимости. При подаче на вход амплитудного детектора АМ колебаний промежуточной частоты в спектре продетектированного сигнала появляется составляющая с низкой частотой Ω_p , которая выделяется с помощью фильтра, включенного на выходе детектора. Упрощенная схема такого детектора, применяемая в радиодальномерах, приведена на рис. 70.

Для эффективной работы амплитудного детектора на его вход необходимо подавать напряжение промежуточной частоты величиной около одного вольта. В то же время на выходе СВЧ смесителя при измерении линий большой протяженности сигнал может принимать значения, составляющие всего несколько десятков микровольт. В связи с этим на участке между СВЧ смесителем и амплитудным детектором возникает необходимость в

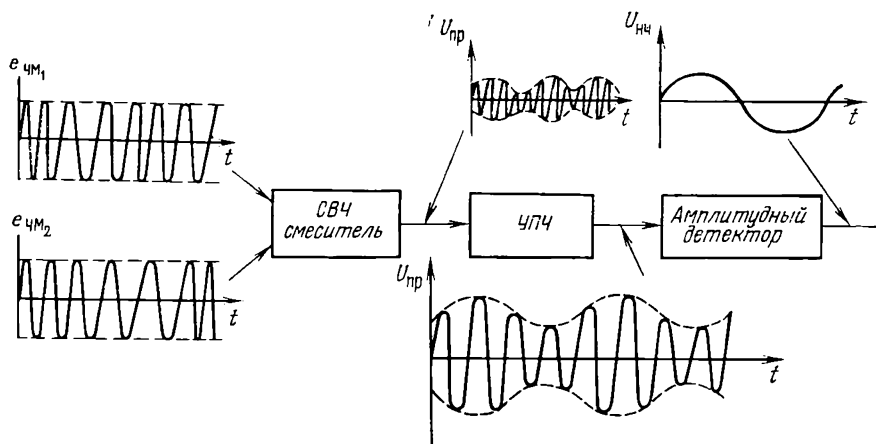


Рис. 71. Схематическое изображение приемного тракта ведомой станции радиодальномера

усилении колебаний промежуточной частоты. Эта задача решается в радиодальномерах с помощью многокаскадного усилителя промежуточной частоты (УПЧ) с коэффициентом усиления, равным нескольким десяткам тысяч.

На рис. 71 показана последовательность включения перечисленных выше узлов, входящих в состав приемного устройства ведомой станции радиодальномера, а также форма изменения сигналов в различных местах этой последовательности.

Информационный низкочастотный сигнал с выхода амплитудного детектора ведомой станции после соответствующих преобразований с помощью кодирующего устройства поступает в передающую систему этой станции для переизлучения в направлении удаленной станции. Таким образом, кодирующее устройство хотя и включено в состав приемной части ведомой станции (см. рис. 27), но, по существу, оно является промежуточным звеном между передатчиком и приемником этой станции. В различных типах радиодальномеров используются различные технические решения для кодирования низкочастотного сигнала на ведомой станции. В связи с этим основные особенности работы указанного устройства будут проанализированы при рассмотрении конкретной функциональной схемы радиодальномера.

Отличительная особенность приемного устройства ведущей станции (т. е. станции, на которой выполняются фазовые измерения) состоит в том, что на ее вход со стороны ведомой станции поступает сигнал с более сложной модуляцией. Это усложнение объясняется необходимостью одновременной передачи с ведомой станции на ведущую двух сигналов: низкочастотного сигнала с частотой Ω и сигнала вспомогательной частоты ω_2

(см. § 18). В результате на выходе СВЧ смесителя, который на ведущей и ведомой станциях имеет одинаковую конструкцию, выделяется сигнал промежуточной частоты $\omega_{\text{пр}}$, который одновременно модулирован как по амплитуде, так и по частоте. При этом «огibaющая», обусловленная амплитудной модуляцией, используется для формирования на выходе приемника низкочастотного гармонического сигнала разностной частоты Ω , который в соответствии со схемой, приведенной на рис. 26, должен поступать со стороны смесителя *I* в фазоизмерительное устройство. Что касается частотной модуляции, то она используется для восстановления передаваемого с ведомой станции низкочастотного сигнала, необходимого для подачи на другой вход фазометра.

Во всех современных фазовых УКВ радиодальномерах сигнал промежуточной частоты $\omega_{\text{пр}}$, образующийся на выходе СВЧ смесителя ведущей станции, подвергается значительному усилению с помощью УПЧ, который по своим основным техническим характеристикам идентичен УПЧ ведомой станции. Для раздельного выделения двух низкочастотных сигналов к выходу УПЧ ведущей станции, как правило, подключают два различных детектора: амплитудный и частотный. Назначение и особенности работы амплитудного детектора ничем не отличаются от рассмотренного выше амплитудного детектора ведомой станции. Что касается частотного детектора, то его основное назначение состоит в том, чтобы выделить из колебаний промежуточной частоты со сложной модуляцией сигнал, обусловленный девиацией (отклонением) этой частоты. Вместе с тем детектор не должен реагировать на амплитудные изменения поступающего на его вход сигнала.

Для решения этой задачи в состав частотного детектора включают ограничительный каскад, «срезающий» амплитудную модуляцию, и дискриминатор, формирующий на своем выходе сигнал, закономерность изменения которого соответствует закономерности изменения частоты ЧМ сигнала, поступающего на вход этого дискриминатора. Технические характеристики частотного детектора существенно зависят от принципа действия кодирующего устройства, входящего в состав ведомой станции.

Для иллюстрации на рис. 72 приведена схема соединения узлов, из которых состоит приемное устройство ведущей станции, а также форма изменения сигналов в различных местах этой схемы применительно к кодирующему устройству, в котором низкочастотный гармонический сигнал не подвергается на ведомой станции дополнительным преобразованиями. Наряду с этим в современных радиодальномерах используются и другие, более сложные схемы частотных детекторов, позволяющие без ощутимых искажений восстановить форму гармонического низкочастотного сигнала, который образуется на выходе амплитуд-

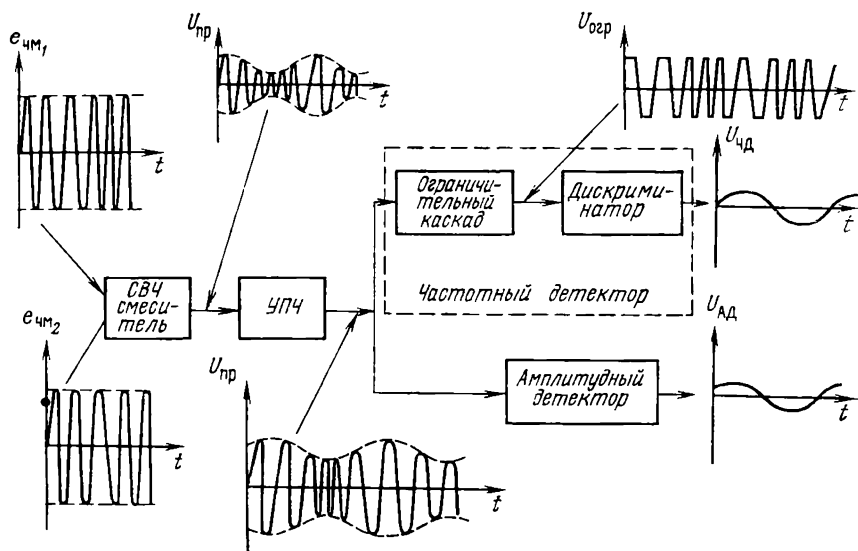


Рис. 72. Схематическое изображение приемного тракта ведущей станции радиодальномера

ного детектора ведомой станции и передается затем на ведущую станцию.

В заключение заметим, что требования к параметрам сигналов, снимаемых с выходов приемного устройства ведущей станции и используемых для выполнения фазовых измерений, существенно зависят от принципа действия фазоизмерительного устройства, которое применяется в конкретной модели радиодальномера.

§ 24. ФАЗОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Одним из центральных узлов любого фазового дальномера является фазоизмерительное устройство, которое часто называют также фазометром. С помощью данного устройства измеряют разность фаз между информационным и опорным сигналами, по которой вычисляют величину измеряемого расстояния. Поэтому основное требование, предъявляемое к фазометру, состоит в том, чтобы с необходимой точностью обеспечить измерение фазового угла, входящего в основную рабочую формулу (19) фазового дальномера.

Поскольку приходящие с дистанции сигналы подвергаются влиянию различного рода помех, то фазометр должен обладать высокой помехоустойчивостью к влиянию нежелательных воздействий. Кроме того, фазометр должен быть небольшим по

размерам, простым по конструкции и экономичным по потреблению электрической энергии. Наряду с вышеизложенным фазометр является тем узлом, на базе которого автоматизируется весь процесс измерений. Поэтому вместе с указанными выше требованиями к фазометру предъявляется целый ряд других требований:

возможность выполнения с помощью фазоизмерительного блока предварительных вычислений, позволяющих на выходе фазометра получать результат, который соответствует полной длине измеряемой линии и в который введены все необходимые поправки;

обеспечение хранения результатов измерения в течение требуемого интервала времени;

возможность автоматической передачи информации о результатах измерения на внешние регистрирующие устройства;

выдача командных сигналов на переключение соответствующих электрических и оптических узлов в схеме дальномера после завершения того или иного промежуточного цикла измерений.

Следует отметить, что ни один из разработанных к настоящему времени фазометров не удовлетворяет полностью всем перечисленным выше требованиям. Так, компенсационный метод фазовых измерений, основанный на использовании градуированного фазовращателя и фазового детектора, обеспечивает достаточно высокую точность измерений, имеет простую схему и компактную конструкцию. Но в то же время на базе использования этого метода не представляется возможным решить вопросы, связанные с автоматизацией процесса измерения.

Получившие в последние годы широкое распространение электронные цифровые фазометры открывают широкие перспективы полной автоматизации всего измерительного процесса. Но при этом приходится существенно усложнять всю электронную схему дальномера и принимать меры для повышения помехоустойчивости такого фазометра и уменьшения влияния различных источников ошибок, свойственных отмеченному типу фазометра.

В связи с вышеизложенным при разработке современных фазовых дальнометров в зависимости от особенностей работы того или иного дальномера предпочтение отдают или упрощенной и помехоустойчивой электронной схеме, отказываясь от высокого уровня автоматизации измерительного процесса, или достаточно сложной схеме, позволяющей автоматизировать большинство отдельных операций, из которых складывается полная программа измерений. В первом случае преимущественное распространение получил фазометр с градуированным фазовращателем и фазовым детектором, а во втором — электронный цифровой фазометр. Исходя из этого, в дополнение к сведениям, приведен-

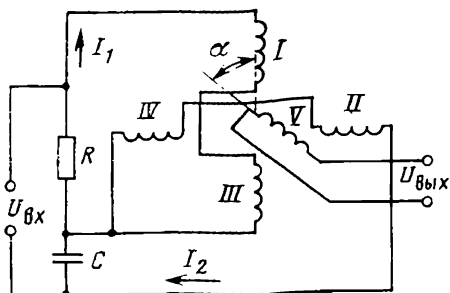


Рис. 73. Упрощенная схема индукционного фазовращателя

ным в § 10, проанализируем основные особенности работы двух различных типов фазометров более подробно.

Компенсационный фазометр с градуированным фазовращателем и фазовым детектором (см. рис. 12) относится к фазометрам аналогового типа, несмотря на то, что в последние годы появились технические реше-

ния, позволяющие снабдить такие фазометры цифровым электронным отсчетным устройством. Характерная особенность таких аналоговых приборов состоит в том, что для их работы используются непрерывные во времени электрические сигналы, к которым, в частности, относятся и подаваемые на вход фазометров гармонические сигналы. Сравнение разности фаз в таких фазометрах происходит во времени непрерывно, вследствие чего существенно облегчается разработка методов борьбы с различного рода помехами импульсного характера.

Основным узлом, определяющим результирующую точность такого фазометра, является градуированный фазовращатель. В дальнометрах последних лет преимущественное распространение получили индукционные фазовращатели, которые часто называют также синхронными вращающимися трансформаторами. Конструктивно указанный фазовращатель выполнен в виде миниатюрного электродвигателя, в состав которого входят статорные и роторные обмотки. Одна из особенностей работы его состоит в том, что в нем не создаются условия для вращения ротора под воздействием магнитного поля. Поворот ротора на требуемый угол производится или вручную, или с помощью специального электромотора.

Упрощенная эквивалентная схема, поясняющая принцип действия индукционного фазовращателя, приведена на рис. 73. Четыре неподвижные статорные катушки (I—IV) расположены в пространстве под углом 90° друг к другу. За счет введения в схему вспомогательных элементов (таких, как резистор R и конденсатор C) токи I_1 и I_2 , протекающие через катушки I—III и II—IV, сдвинуты по фазе на 90° . Если такой фазовращатель подключить к источнику переменного напряжения $U_{вх}$, то при выполнении указанных выше условий в его центральной части образуется вращающееся магнитное поле, за счет которого в катушке V, расположенной на роторе фазовращателя, создается переменное напряжение $U_{вых}$. Фаза этого напряжения зависит от угла α между осями вращающейся и неподвижных катушек.

Основное требование, которое предъявляется к фазовращателю, состоит в обеспечении строго линейной зависимости между геометрическим углом поворота оси ротора α и фазовым сдвигом φ , который приобретает напряжение $U_{\text{вых}}$ относительно входного напряжения $U_{\text{вх}}$. Имеется целый ряд причин, нарушающих такую линейную зависимость, причем одни причины порождают регулярные, систематические отклонения от указанной закономерности, а другие — нерегулярные, имеющие случайный характер.

Систематические отклонения, которые могут возникать из-за таких причин, как неточный сдвиг по фазе токов I_1 и I_2 , неравенство амплитудных значений этих токов, неперпендикулярность расположения отмеченных выше обмоток и др., приводят к появлению так называемых циклических ошибок измерений. Для уменьшения влияния последних или применяется специальная методика измерений (в частности, введение дополнительного фазового сдвига, равного 90° , в измеряемую разность фаз), или производится коррекция результатов измерений за счет введения поправок, получаемых при градуировке такого фазовращателя.

Нерегулярные отклонения могут возникать как из-за несовершенства конструкции фазовращателя и связанного с ним отсчетного устройства (люфты и перекосы осиротора фазовращателя, а также вращающихся сочленений, входящих в состав редуктора, который используется как промежуточное звено между фазовращателем и отсчетным устройством), так и из-за нерегулярных изменений параметров входного сигнала. Основные методы борьбы с погрешностями такого вида — увеличение количества повторных отсчетов.

Необходимость использования в индукционных фазовращателях локализованных в пространстве магнитных полей приводит к тому, что данные устройства обеспечивают достаточно высокую точность вращения фазы только на сравнительно низких частотах (от 1 кГц до 1 МГц). Поэтому применение таких фазовращателей в дальнометрической технике неизбежно связано с использованием низкочастотного метода фазовых измерений.

В зависимости от погрешности регулирования фазового сдвига фазовращатели подразделяются на классы. В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются индукционные фазовращатели трех классов. Первый класс позволяет осуществить регулирование фазы с погрешностью не более $15'$, второй класс — не более $30'$ и третий класс — не более $60'$. Для обеспечения высокой точности фазовых измерений в свето- и радиодальномерах применяют, как правило, фазовращатели первого класса.

Для регистрации угла поворота α ось ротора фазовращателя через редуктор соединяют с отсчетным устройством того или иного типа. В дальномерах наиболее широкое распространение

Страница 158 отсутствует

Страница 159 отсутствует

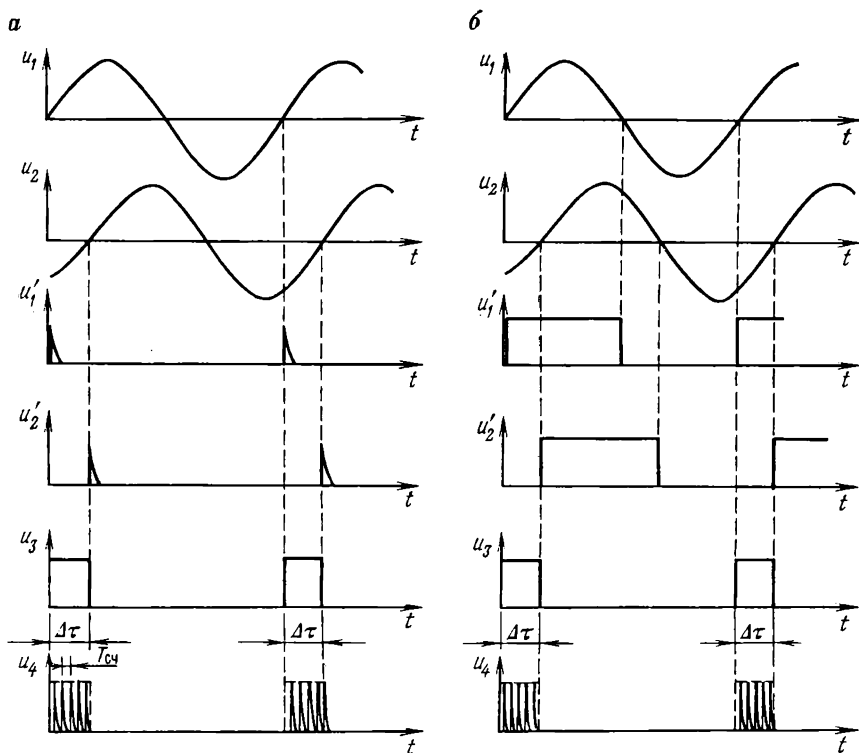


Рис. 75. Временные диаграммы сигналов в цифровых фазометрах

Из приведенной на рис. 13 упрощенной функциональной схемы такого фазометра нетрудно установить, что фазовый угол определяется посредством измерения временного интервала $\Delta\tau$, на который сдвинуты два сравниваемых по фазе гармонических колебания. С этой целью информационный и опорный сигналы u_1 и u_2 с помощью формирующих устройств преобразуются или в остroконечные импульсы (рис. 75, а), или в сигналы прямоугольной формы (рис. 75, б), которые, в свою очередь, используются для формирования прямоугольного сигнала u_3 длительностью $\Delta\tau$, пропорциональной величине искомого фазового угла $\Delta\varphi$.

Значение $\Delta\tau$ в цифровом электронном фазометре измеряется подсчетом за данный интервал времени числа счетных (или, как их часто называют, квантующих) импульсов, поступающих от специального генератора через известные интервалы времени $T_{сч}$. При таком методе процесс фазовых измерений из непрерывного превращается в дискретный, характерная особенность которого состоит в том, что измерение разности фаз между дву-

мя гармоническими колебаниями производится только в конкретные моменты времени, соответствующие, в частности, моментам перехода синусоидального сигнала через нулевые значения (в нашем случае от отрицательных значений к положительным).

Для того чтобы обеспечить требуемую высокую точность фазовых измерений, необходимо прежде всего устранить все причины, которые могут оказывать непредусмотренное влияние на положение сформированных импульсов на временной оси (см. рис. 75, а) или сигналов прямоугольной формы (см. рис. 75, б). К таким причинам могут быть отнесены различного рода помехи, накладывающиеся на полезный сигнал, нелинейные искажения формы синусоидального сигнала на тех участках, где производится формирование сигналов u_1' и u_2' , а также непостоянство амплитудных значений гармонических колебаний u_1 и u_2 , между которыми измеряется разность фаз.

Для пояснения механизма влияния помех на формирование импульсов, используемых при цифровом методе фазовых измерений, на рис. 76 приведена характерная для дальномерных измерений форма низкочастотного сигнала, снимаемого с выхода приемного устройства и несущего в себе информацию о величине искомого расстояния. Как свидетельствует данный график, из-за влияния помех флуктуационного характера такой квазигармонический сигнал около интересующей нас точки перехода через нуль может принимать несколько раз нулевые значения, в результате чего положение импульса на временной оси становится весьма неопределенным, а форма такого импульса может принимать произвольные очертания. При этом показания цифрового электронного фазометра оказываются отягощенными заметными погрешностями измерений, величина которых зависит от отношения сигнала к шуму, а также от значения измеряемой разности фаз.

Если не принять специальных мер, то при малых значениях измеряемого фазового угла работоспособность фазометра нарушается полностью, т. е. вблизи нулевых значений определяемого параметра появляются «мертвые зоны», которые в отдельных образцах промышленно выпускаемых фазометров достигают $\pm 20^\circ$. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что для обеспечения точности фазовых измерений цифровыми методами порядка $0,1-1,0^\circ$ отношение сигнала к шуму должно быть не менее $1,5-2,0$, в то время как с помощью рассмотренного компенсационного метода удается проводить высокоточные фазовые измерения при значениях указанного отношения, меньших единицы.

Одна из наиболее эффективных мер борьбы с влиянием помех на работу цифрового электронного фазометра состоит в том, чтобы с помощью вспомогательных технических средств очистить полезный сигнал от помех перед подачей его в фазометр.

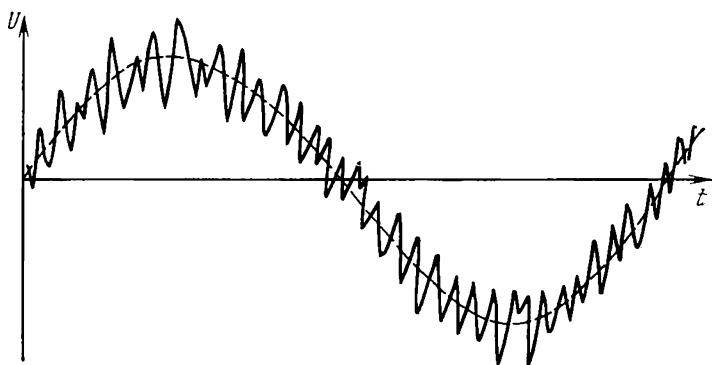


Рис. 76. График изменения информационного сигнала с большим уровнем шумов

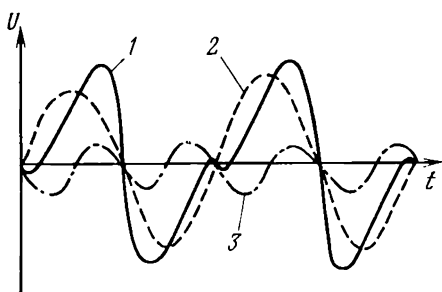
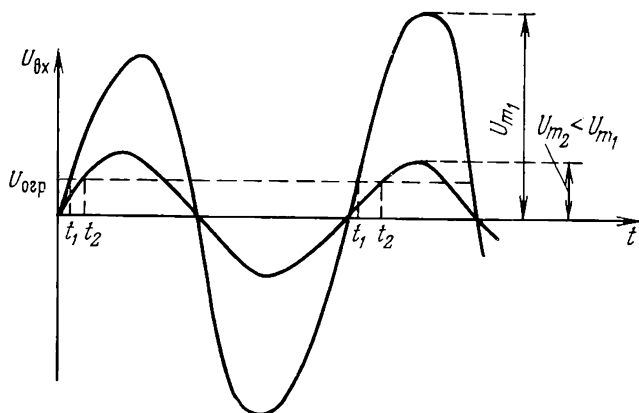


Рис. 77. График искажения формы сигнала под воздействием высших гармоник

Рис. 78. График возникновения амплитудно-фазовой погрешности при преобразовании гармонических сигналов в импульсные



Наряду с помехами флуктуационного характера на положение точки перехода через нуль существенное влияние могут оказывать искажения формы сигналов, между которыми измеряется разность фаз. Такие искажения возникают при прохождении сигналов через устройства с нелинейными вольтамперными характеристиками (модуляторы, смесители, детекторы и др.), вследствие чего они получили название нелинейных. Количественно величину нелинейных искажений принято оценивать процентным содержанием высших гармонических составляющих по отношению к основной гармонике. Применительно к рассматриваемому нами влиянию наибольший интерес представляют не общие искажения формы исследуемого сигнала, а смещения точки перехода через нуль при наличии высших гармоник в таком сигнале. Для иллюстрации на рис. 77 показана форма сигнала (1), полученная в результате сложения первой (2) и второй (3) гармоник.

Под влиянием высших гармоник могут наблюдаться не только смещения интересующей нас точки перехода через нуль, но и возникать дополнительные точки перехода. В связи с вышеизложенным к сигналам, поступающим в электронный цифровой фазометр, предъявляются очень жесткие требования в отношении содержания высших гармоник. Как показывают расчеты, для того чтобы погрешность цифрового фазометра не превышала $0,1^\circ$, коэффициент нелинейных искажений не должен быть более $0,17\%$.

Эффективные меры борьбы с отмеченным влиянием состоят в том, чтобы с помощью вспомогательных технических средств исключить из состава полезного сигнала высшие гармоники.

Причина, оказывающая заметное влияние на положение сформированных импульсов на временной оси, состоит в том, что реальные устройства формируют импульсы не точно в момент перехода входного напряжения через нуль, а при некотором вполне определенном его значении, равном $U_{огр}$. При этом, как показано на рис. 78, фиксируемые моменты времени, соответствующие равенству $U_{вх} = U_{огр}$, существенно зависят от амплитуды входного сигнала. Возникающая при этом погрешность фазовых измерений получила название амплитудно-фазовой. Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что при значительном расхождении амплитуд сигналов, между которыми измеряется разность фаз, погрешность электронного цифрового фазометра может достигать 1° и более. Поэтому для стабильной работы такого фазометра необходимо принимать меры, обеспечивающие постоянство входных сигналов независимо от реальных условий работы дальномера.

Обобщая всю совокупность рассматриваемых влияний, следует заметить, что требуемая высокая точность электронных цифровых фазометров может быть обеспечена только при подаче на вход гармонических сигналов неискаженной формы и

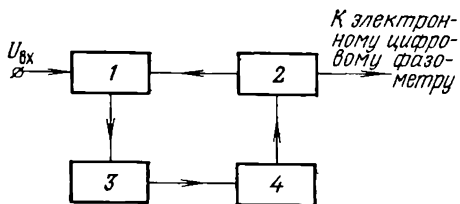


Рис. 79. Упрощенная функциональная схема фазовой автоподстройки

постоянной амплитуды, предварительно очищенных от различного рода флуктуационных помех. Эта задача в современных дальномерях решается как с помощью систем фазовой автоматической подстройки (систем ФАП), так и посред-

ством использования различных фильтрующих и стабилизирующих устройств.

Для пояснения сущности работы ФАП на рис. 79 приведена одна из упрощенных функциональных схем такой системы. Сигнал с выхода приемного устройства подается на один из входов фазового детектора 1, являющегося составной частью системы ФАП. Другой вход этого детектора связан с местным подстраиваемым генератором 2, в котором возбуждаются гармонические колебания, имеющие частоту, равную частоте входного сигнала $U_{вх}$, постоянную амплитуду и минимальное содержание высших гармоник. Фазовый детектор позволяет сформировать на своем выходе сигнал, величина которого зависит от соотношения фаз подаваемых на его входы сигналов, т. е. в нашем случае от соотношения фаз между входным сигналом и сигналом, поступающим от местного подстраиваемого генератора. С помощью фильтра нижних частот 3 этот сигнал очищается от различного рода флуктуационных помех и поступает на вход управляющего элемента 4, который синхронизирует по фазе колебания, возбуждаемые в местном подстраиваемом генераторе.

В результате работы такой системы с выхода подстраиваемого генератора снимается сигнал, синхронизированный по фазе входным сигналом и не подверженный влиянию рассмотренных выше помех, что обеспечивает устойчивую работу электронного цифрового фазометра.

Переходя к рассмотрению особенностей построения функциональных схем электронных цифровых фазометров, необходимо отметить, что к настоящему времени разработано значительное количество различных модификаций таких фазоизмерительных устройств. Среди них применительно к дальномерной технике наибольший интерес представляют интегрирующие цифровые фазометры с время-импульсным преобразованием. Принцип действия таких фазометров, проиллюстрированный графиками, приведенными на рис. 75, базируется на следующих простых математических предпосылках.

Если на фазометр поступают два сдвинутых по фазе синусоидальных напряжения одинаковой частоты

$$u_1 = U_{m_1} \sin(\Omega t - \varphi_1);$$

$$u_2 = U_{m_2} \sin(\Omega t - \varphi_2),$$

то они оказываются равными нулю в моменты времени, которые определяются из условий:

$$\Omega t_1 - \varphi_1 = k\pi \text{ для напряжения } u_1;$$

$$\Omega t_2 - \varphi_2 = k\pi \text{ для напряжения } u_2,$$

где $k=0, 1, 2, \dots$; Ω — круговая частота колебаний, подаваемых на вход фазометра.

Откуда

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \Omega(t_2 - t_1) = \Omega\Delta\tau, \quad (117)$$

где $\Delta\tau$ — временной сдвиг между импульсами, соответствующими началам периодов в пределах от 0 до 2π .

Входящая в формулу (117) величина $\Delta\tau$ измеряется в современных электронных цифровых фазометрах посредством счета квантующих импульсов, поступающих в счетчик от генератора квантующих импульсов за отмеченный интервал времени $\Delta\tau$.

Основное требование, которое предъявляется к таким импульсам, состоит в том, чтобы временной интервал между ними $T_{сч}$ (см. рис. 75) был строго постоянным и известным с необходимой точностью. Поскольку значение $T_{сч}$ связано с величиной $\Delta\tau$, входящей в основную рабочую формулу дальномера, соотношением

$$\Delta\tau = aT_{сч}, \quad (118)$$

где a — число подсчитанных квантующих импульсов за время $\Delta\tau$, то величина $T_{сч}$ должна быть известна с относительной точностью не ниже требуемой относительной точности $\Delta\tau$.

В современных геодезических фазовых дальномерах с электронными счетчиками квантующие импульсы формируются, как правило, из колебаний основной масштабной частоты, т. е. генератор масштабной частоты одновременно выполняет функции и генератора квантующих импульсов.

Необходимо заметить, что измерение величины $\Delta\tau$ за один период, т. е. с использованием одной пары импульсов u_1' и u_2' (см. рис. 75), как правило, не обеспечивает необходимой точности измерений. Поэтому в современных дальномерах применяют интегрирующие цифровые фазометры, позволяющие определять интересующий нас временной интервал по 100 периодам и более. Фазометр такого типа включает в себя дополнительное устройство, позволяющее автоматически прекратить измерения после прохождения заранее заданного числа периодов. При этом в счетчике фазометра после прохождения n периодов окажется зарегистрированным число квантующих импульсов, определяемое формулой

$$a = n \frac{\Delta\tau}{T_{сч}} = n\Delta\tau f_{сч}, \quad (119)$$

где $f_{сч} = 1/T_{сч}$ — частота следования квантующих импульсов.

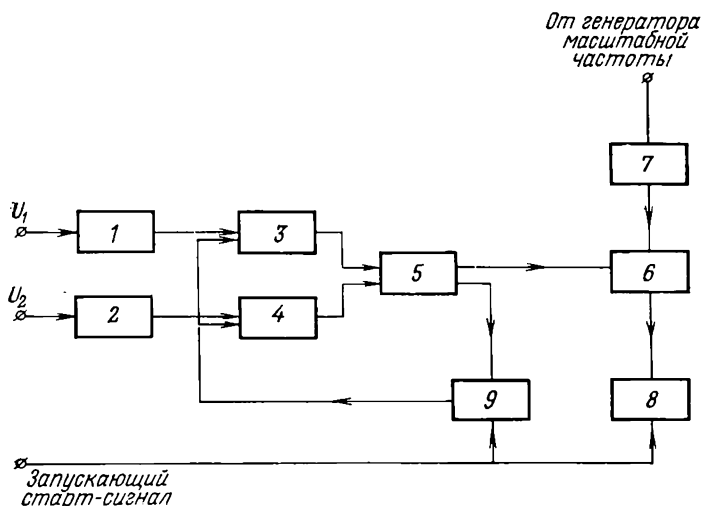


Рис. 80. Функциональная схема интегрирующего цифрового фазометра с время-импульсным преобразованием

Упрощенная функциональная схема интегрирующего цифрового фазометра с время-импульсным преобразованием приведена на рис. 80.

Основное назначение установленных на входе фазометра формирующих устройств 1 и 2 состоит в том, чтобы преобразовать гармонические сигналы, между которыми необходимо измерить разность фаз, в дискретную последовательность (в частности, в остроконечные импульсы, соответствующие переходам синусоиды через нулевые значения).

Включенные на выходах формирующих устройств схемы совпадения 3 и 4 (или так называемые схемы «И») выполняют функции электронных ключей. Они позволяют пропускать через себя сформированные импульсные сигналы в течение заранее заданного числа периодов n по командному сигналу, поступающему с выхода вспомогательного счетчика 9 числа периодов.

Входящая в состав приведенной на рис. 80 схемы триггерная ячейка 5 представляет собой электронное устройство с двумя устойчивыми состояниями равновесия. Эта ячейка под воздействием импульсных сигналов, сформированных из гармонических напряжений u_1 и u_2 , переходит из одного состояния равновесия в другое, в результате чего на ее выходе образуется сигнал прямоугольной формы (напряжение u_3 (см. рис. 75)). Длительность этого сигнала, равная Δt , является основным параметром, по которому измеряется интересующая нас разность фаз $\Delta \varphi$.

Отмеченный сигнал управляет работой основного электронного ключа 6, отпирая его на время Δt для пропускания квантовых импульсов от формирователя этих импульсов 7 в основной электронный счетчик 8. Последний представляет собой набор последовательно соединенных триггерных ячеек, которые вместе с подключенными к ним индикаторными устройствами позволяют регистрировать число поступивших в счетчик импульсов за интервал времени Δt .

Наряду с управлением работой электронного ключа триггерная ячейка 5 выдает сигналы во вспомогательный счетчик 9, который регистрирует количество последовательно прошедших сигналов u_3 (см. рис. 75). После того как в данном счетчике будет зарегистрировано заранее заданное число таких сигналов, с его выхода поступает команда, по которой схемы совпадения в трактах прохождения сигналов u_1 и u_2 запируются. На выходе триггерной ячейки исчезает при этом сигнал, управляющий работой электронного ключа, и счет числа квантовых импульсов прекращается. Несмотря на то что процесс фазовых измерений на этом заканчивается, цифры, зарегистрированные счетчиком импульсов, будут продолжать высвечиваться на световом табло до начала нового цикла измерений или до получения специального командного сигнала, выключающего этот счетчик.

Возобновление работы электронного цифрового фазометра осуществляется по команде оператора посредством подачи в схему запускающего старт-сигнала. Под его воздействием триггерные ячейки как основного, так и вспомогательного счетчиков переводятся в исходное состояние, после чего подается разрешающий сигнал на схемы совпадения, и процесс фазовых измерений может быть повторен.

Следует заметить, что момент появления запускающего старт-сигнала никак не согласован с моментами формирования импульсных сигналов u_1' и u_2' (см. рис. 75). В результате этого возникает опасность начала счета квантовых импульсов в первом цикле фазовых измерений не с момента прихода импульсного сигнала u_1' , а в произвольный момент времени, который может находиться в пределах интересующего нас интервала времени Δt . Это может привести к появлению ошибок в показаниях электронного цифрового фазометра. Тогда в схему фазометра вводят дополнительные устройства, позволяющие синхронизировать начало работы фазометра с моментом прихода импульсного сигнала u_1' , который при многократно повторяющихся циклах фазовых измерений является стартовым. Другой сигнал u_2' , по которому производится прекращение счета квантовых импульсов после каждого цикла измерения разности фаз, получил при этом название стопового.

Другая особенность работы электронного фазометра, требующая принятия специальных мер, состоит в том, что фазометры рассматриваемого типа начинают работать неустойчиво

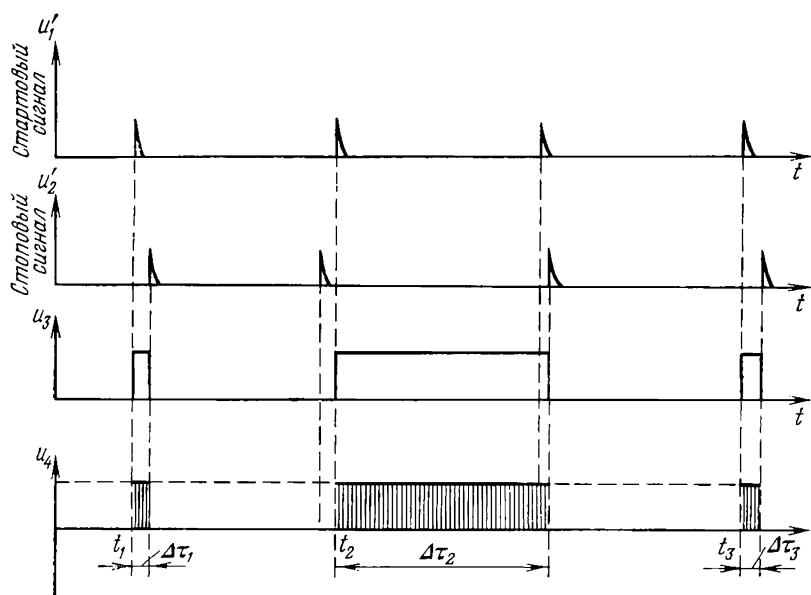


Рис. 81. Временные диаграммы, иллюстрирующие возникновение ошибочных показаний фазометра при работе вблизи нуля

и дают неверные результаты в тех случаях, когда два сравниваемых сигнала незначительно отличаются друг от друга по фазе, т. е. измеряемая разность фаз близка к нулю. В таких условиях из-за взаимных флуктуаций фазы в отдельных периодах импульсы, соответствующие информационному и опорному сигналам, могут как опережать один другого, так и отставать. Предположим, что в момент времени t_1 (рис. 81) стоповый сигнал u_2' отстает от стартового u_1' . При этом на выходе триггерной ячейки будет сформирован сигнал длительностью $\Delta\tau_1$. Если в один из следующих периодов под воздействием каких-либо причин стоповый сигнал u_2' будет опережать стартовый u_1' (момент времени t_2), то на выходе триггерной ячейки будет сформирован сигнал длительностью $\Delta\tau_2$, которая отличается от $\Delta\tau_1$ примерно на величину, близкую к времени одного периода. При автоматическом осреднении этих величин получается результат, совершенно не соответствующий измеряемой разности фаз.

Для исключения возможности появления таких неверных показаний фазометра к настоящему времени разработан целый ряд мер, позволяющих или подавить один из близко расположенных импульсных сигналов (стартовый или стоповый), или автоматически ввести в один из каналов прохождения фазосравниваемых сигналов дополнительную фазовую задержку.

При реализации последнего варианта перед началом фиксации измеряемой разности фаз производится предварительный анализ попадания результатов измерений в «опасную зону». Критерием этого являются значения цифр старшего разряда (обычно 0 или 9). Если такая ситуация имеет место, то автоматически в опорный или информационный канал вводится заранее известная фазовая задержка (равная, например, 180°). При этом стартовый и стоповый импульсы смещаются во времени относительно друг друга на величину, исключающую возможность их взаимного опережения или отставания под влиянием флуктуационных помех. Для того чтобы на цифровом табло фазометра не регистрировалось значение этой дополнительной задержки, одновременно с ее вводом корректируются на соответствующую величину и показания цифрового табло.

Электронный цифровой фазометр может без существенных усложнений схемы выполнять простейшие арифметические операции. Вследствие этого в таком фазометре легко реализуется возможность выполнения предварительных вычислений. Так, например, электронный счетчик импульсов, основанный на последовательном суммировании квантовых импульсов, без каких-либо переделок может быть использован для суммирования отдельных результатов измерений.

При автоматизации процесса измерений по линии оптического короткого замыкания (в светодальномерах) и при вычислении результирующего отсчета с использованием частот $+A$ и $-A$ (в радиодальномерах) возникает необходимость реализации операции вычитания. Такая задача также легко решается с помощью электронного цифрового фазометра. С этой целью при регистрации вычитаемого достаточно поменять местами стартовый и стоповый импульсы.

Наряду с суммированием и вычитанием электронный цифровой фазометр позволяет осуществить корректировку отсчетов за счет ручного или автоматического введения необходимых поправок (приборная поправка, поправки за центрировку станций и т. д.). Кроме того, входящие в состав электронного счетчика триггерные ячейки могут хранить результаты измерений в течение того времени, которое необходимо для их считывания или для переноса во внешние запоминающие устройства.

Локализованный во времени процесс фазовых измерений, характерный для работы электронного цифрового фазометра, открывает возможность формирования командных сигналов на переключение тех или иных узлов дальномера по завершении промежуточных циклов измерений, т. е. создаются все предпосылки для введения в схему дальномера программируемого устройства, с помощью которого может быть полностью автоматизирован весь измерительный процесс.

Таким образом, электронные цифровые фазометры достаточно полно отвечают большинству из перечисленных в начале

данного параграфа требований, открывая широкие возможности для создания автоматизированных свето- и радиодальномеров. Наиболее широко данные фазометры используются в современных электронных тахеометрах, позволяющих в автоматическом режиме выполнять как линейные, так и угловые измерения. Отсчетные устройства таких приборов, базирующиеся на использовании микропроцессоров, позволяют не только регистрировать в автоматическом режиме измеряемые величины, но и производить все необходимые вычислительные операции при работе с прибором в поле.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Обоснуйте целесообразность обобщения функциональных схем дальномеров.

2. По каким различительным признакам производится разделение дальномеров на две основные группы? Назовите эти группы.

3. Перечислите основные компоненты, входящие в передающую часть обобщенной функциональной схемы дальномера с пассивным ответом. Объясните взаимосвязь между этими компонентами.

4. Какие основные требования предъявляются к источникам излучения, модуляторам света и генераторам масштабной частоты в дальномерах с пассивным ответом?

5. Объясните назначение линии оптического короткого замыкания, показанной на рис. 25.

6. Покажите на рис. 25 путь прохождения опорного и информационного сигналов.

7. Поясните назначение приемной части дальномера с пассивным ответом и ее составных частей.

8. Для чего в схему, изображенную на рис. 25, введены смесители и вспомогательный генератор (гетеродин)?

9. Перечислите основные особенности работы дальномера, схема которого приведена на рис. 26.

10. Объясните сущность метода, позволяющего исключить фазовые задержки в электрических цепях дальномера с активным ответом.

11. Сформулируйте основные отличительные особенности работы ведущей и ведомой станций в дальномерах с активным ответом.

12. Объясните взаимодействие узлов дальномера, схема которого изображена на рис. 27.

13. Какие типы источников оптического излучения получили преимущественное распространение в современных светодальномерах?

14. Поясните принцип действия газового и полупроводникового лазеров.

15. Укажите различия между многомодовым, одномодовым и одночастотным режимами работы газового лазера.

16. В чем различие между люминесцентным светодиодом и полупроводниковым лазером?

17. Какие типы источников излучения используются в современных УКВ радиодальномерах и какие требования к ним предъявляются?

18. Перечислите преимущества и недостатки клистронных генераторов и генераторов на диодах Ганна.

19. Сформулируйте основные требования, предъявляемые к генераторам масштабной частоты.

20. Какие методы стабилизации частоты используются в современных генераторах масштабной частоты?

21. Какие способы модуляции света применяются в светодальномерах?

22. В чем заключается явление двойного лучепреломления и как оно используется для модуляции светового потока?

23. В чем принципиальное различие между продольным и поперечным электрооптическим эффектом?

24. Какую роль выполняет четвертьволновая пластинка в кристаллических модуляторах света?

25. Поясните физический смысл модуляционной характеристики. Какие требования к ней предъявляются?

26. Перечислите достоинства и недостатки модуляторов света, базирующихся на использовании эффекта Поккельса и эффекта Керра. В чем отличительные особенности их схемной и конструктивной реализации?

27. Какие методы модуляции СВЧ колебаний применяются в современных УКВ радиодальномерах?

28. Объясните принципы управления частотой колебаний в клистронных генераторах и генераторах на диодах Ганна.

29. Поясните назначение передающей, приемной и отражающей систем, используемых в светодальномерной технике.

30. Какие принципы построения передающей и приемной оптических систем находят применение в современных светодальномерах?

31. С какой целью применяют в светодальномерах коаксиальную приемопередающую оптическую систему?

32. Каково назначение таких элементов приемного оптического тракта светодальномера, как диафрагма, светофильтр и фильтр переменной плотности?

33. Объясните принцип действия совмещенной приемопередающей оптической системы для схемы, изображенной на рис. 60. Возникают ли в такой схеме дополнительные потери света из-за совмещения передающей и приемной оптических систем?

34. Поясните особенности работы схемы, приведенной на

рис. 61. В каком режиме должна работать приемная часть светодиода с такой оптической системой?

35. В чем преимущества трипельпризмы как отражающей оптической системы в сравнении с плоским зеркалом? Сформулируйте основные требования, предъявляемые к таким призмам.

36. Какие типы антенн находят преимущественное применение в современных УКВ радиодальномерах? Сравните их основные технические характеристики и сделайте выводы о том, в каких случаях должна применяться та или иная антенна.

37. Что понимают под диаграммой направленности антенной системы? Как влияет эта диаграмма на общие технические характеристики радиодальномера? От чего зависит ширина диаграммы направленности?

38. Какие функции выполняют фотоэлектронные приемники в светодиодах? Какие к ним предъявляются требования?

39. По каким техническим характеристикам оценивается качество работы фотоприемника? Сформулируйте требования, которые предъявляются к фотоумножителям, используемым в светодиодах.

40. Проведите сравнение основных технических характеристик фотоумножителя и фотодиода. Отметьте их преимущества и недостатки.

41. Поясните принцип работы входных приемных устройств, применяемых в УКВ радиодальномерах. Какова роль гетеродина и смесителя? Каково назначение усилителя промежуточной частоты?

42. Объясните принцип формирования АМ колебаний промежуточной частоты на выходе смесительного каскада радиодальномера в результате смешения двух ЧМ колебаний несущей частоты.

43. Сформулируйте требования, которые предъявляются к фазоизмерительным устройствам свето- и радиодальномеров.

44. Расскажите о принципе действия компенсационного фазометра, базирующегося на использовании градуированного фазовращателя и фазового детектора.

45. Раскройте механизм влияния основных источников ошибок на точность измерений электронным цифровым фазометром. Какие методы применяются для борьбы с влиянием таких источников?

46. Поясните принцип действия и назначение системы фазовой автоподстройки (ФАП), применяемой в сочетании с электронным цифровым фазометром.

47. Объясните причины неустойчивой работы электронного фазометра при измерении разности фаз, близкой к нулю. Какие методы позволяют устранить этот недостаток электронного фазометра?

48. Какие дополнительные функции может выполнять электронный цифровой фазометр в свето- и радиодальномерах?

§ 25. КЛАССИФИКАЦИЯ ДАЛЬНОМЕРОВ

Определяющим фактором, положенным в основу классификации современных дальномеров, является область их применения. За последние годы наиболее четкую классификацию по данному признаку получили светодальноммеры. В соответствии с действующими стандартами дальноммеры такого типа подразделяются на следующие три группы:

1) светодальноммеры группы Г, которые предназначены для выполнения линейных измерений в государственной геодезической сети;

2) светодальноммеры группы Т, используемые для измерения длин линий в геодезических сетях сгущения, а также для создания геодезического обоснования при выполнении топографических съемок;

3) светодальноммеры группы П, предназначенные для выполнения линейных измерений при решении разнообразных задач прикладной геодезии.

Наземные геодезические радиодальноммеры не получили до последнего времени такой четкой классификации по отмеченному выше признаку. Все разработанные к настоящему времени высокоточные радиодальноммеры УКВ диапазона можно условно объединить в две основные группы. К первой группе могут быть отнесены радиодальноммеры дальнего действия (с радиусом действия до 100—150 км), которые по своему назначению призваны решать те же задачи, что и светодальноммеры группы Г. Во вторую группу входят портативные радиодальноммеры с дальностью действия до 20—50 км. С помощью дальномеров последней группы решают задачи, характерные для светодальноммеров группы Т, а в отдельных случаях и для светодальноммеров группы Г.

Требования, которые предъявляются к дальномерам того или иного типа, существенно зависят от приведенной выше классификации. Так, например, одно из основных требований, которым должны удовлетворять светодальноммеры группы Г, состоит в том, чтобы обеспечить повышенную дальность действия (до 15—50 км) в сочетании с высокой точностью измерений. При создании таких дальномеров значительное внимание уделяют вопросам разработки вспомогательных средств и методов, позволяющих учитывать влияние внешних условий (в частности, изменения состояния атмосферы по пути распространения используемого электромагнитного излучения) на точность выполняемых измерений. Дальноммеры данной группы в сравнении с дальномерами других групп имеют, как правило, повышенные габари-

ты и вес в сочетании с повышенным потреблением электроэнергии.

К наиболее массовым дальномерам группы Т предъявляются прежде всего такие требования, как небольшие габариты и масса, а также малое потребление электроэнергии. При этом значительное внимание уделяется вопросам автоматизации процесса измерений и рациональному объединению в одном измерительном комплексе дальномерных и угломерных устройств.

Определяющим требованием для дальномеров группы П является повышенная приборная точность, которая для современных дальномеров этой группы оценивается десятными долями миллиметра.

Исходя из приведенной выше классификации, в настоящей главе приведены описания особенностей работы основных типов дальномеров различных групп, получивших наибольшее распространение в нашей стране.

§ 26. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ ГРУППЫ Г

За прошедший тридцатилетний период интенсивного развития современной светодальномерной техники вопросам совершенствования дальномеров рассматриваемой группы уделялось постоянное внимание. Разработанные в начале 50-х годов первые советские и зарубежные светодальномеры, нашедшие применение в геодезическом производстве, относились к дальномерам данной группы. За прошедшие годы в СССР и за рубежом разработано более десятка различных моделей таких дальномеров. Наряду с отличительными особенностями, свойственными каждой из этих моделей, дальномерам присущ и целый ряд общих признаков, характерных для всех приборов данной группы.

Одним из таких признаков является использование источников излучения с высокой энергетической яркостью, с помощью которых удается обеспечить требуемую дальность действия. В первых моделях светодальномеров группы Г в качестве таких источников использовались лампы накаливания максимальной яркости. Однако вскоре на смену этим излучателям пришли газосветные источники (ртутные лампы сверхвысокого давления и аргоно-циркониевые лампы). В середине 60-х годов в связи с развитием лазерной техники последние источники в дальномерх группы Г были повсеместно заменены газовыми гелий-неоновыми лазерами, которые до настоящего времени являются основными источниками излучения во всех светодальномерах данной группы.

Использование гелий-неоновых лазеров обусловило необходимость применения в дальномерх дальнего действия внешних модуляторов света (как твердотельных, так и жидкостных). Этот характерный признак является общим для дальномеров группы Г.

Требование обеспечения максимальной дальности действия оказывает существенное влияние и на выбор типа оптических систем, используемых для передачи и приема светового потока, несущего в себе информацию о величине измеряемого расстояния. При этом для дальномеров данной группы определяющими факторами являются такие показатели, как минимум потерь полезной световой энергии при прохождении света через оптическую систему, формирование выходящего из передающей оптической системы светового пучка с заданным углом расходимости, а также перехват максимального количества лучистой энергии, поступающей от удаленного отражателя, и концентрация ее на входе в фотоприемник. В дальномерх группы Г наибольшее распространение получили зеркальные и зеркально-линзовые системы как совмещенного типа (коаксиальные), так и разнесенные (биаксиальные). В сравнении с оптическими системами светодальномеров других групп отмеченные системы имеют большие размеры и массу.

Исходя из обеспечения максимальной дальности действия, выбирается и тип фотоэлектронного приемного устройства дальномера, которое прежде всего должно иметь высокую чувствительность к слабым световым сигналам, приходящим от удаленного отражателя. В качестве такого устройства в светодальномерх группы Г чаще всего используют фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

При разработке фазоизмерительных устройств для дальномеров данной группы предпочтение отдают фазометрам, позволяющим измерять фазовый угол с точностью до десятых долей градуса в условиях сильного влияния различного рода помех, воздействующих на информационные сигналы. Эта задача успешно решается как с помощью компенсационных фазометров аналогового типа, основанных на использовании градуированного фазовращателя и фазового детектора, так и электронных цифровых фазометров, работающих в сочетании с системами фазовой автоподстройки.

Для ознакомления с особенностями работы светодальномеров группы Г ниже подробно изложены принципы действия трех отечественных светодальномеров: «Кварц», «Гранат» и СГ-3, которые получили преимущественное распространение в нашей стране при выполнении высокоточных измерений линий значительной протяженности. О других типах дальномеров этой группы приведены лишь краткие сведения.

Светодальномер «Кварц»

Разработанный ЦНИИГАиК лазерный светодальномер «Кварц» (рис. 82) относится к дальномерам дальнего действия. Он выпускался серийно небольшими партиями до 1980 г. В топографо-геодезическом производстве используется и в настоя-

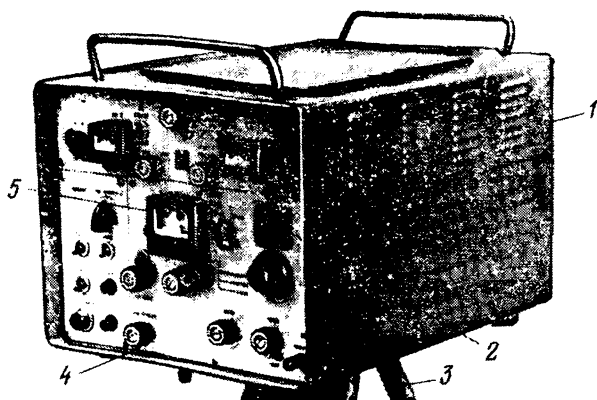


Рис. 82. Светодальномер «Кварц»:

1 — панель со стороны расположения оптических систем; 2 — отсчетное устройство фазовращателя; 3 — штатив; 4 — панель управления; 5 — индикатор разности фаз

щее время. Его основное назначение — измерение длин линий в государственных геодезических сетях различных классов. Дальность действия дальномера в условиях хорошей видимости — до 30 км днем и до 50 км ночью.

Среднюю квадратическую погрешность измерений для дальномеров принято характеризовать двучленной формулой вида

$$m_D = \pm (a + bD), \quad (120)$$

где a — коэффициент, характеризующий абсолютную приборную погрешность дальномера и имеющий размерность единиц длины; b — безразмерный коэффициент, учитывающий в относительных единицах влияние внешних условий на скорость распространения света и уход от номинального значения основной масштабной частоты; D — величина измеряемого расстояния, выраженная в тех же единицах, что и коэффициент a .

В комплект дальномера входят:

приемопередатчик с приспособлениями для установки его на століке геодезического сигнала или на штативе;

трипельпризменный отражатель (рис. 83) с аналогичными приспособлениями, размещаемый на удаленном конце измеряемой линии;

комплект метеоприборов (барометр-анероид и психрометр) для определения показателя преломления воздуха;

источник питания в виде бензоэлектрического агрегата.

Масса приемопередатчика 25 кг. Потребляемая от источника питания мощность 140 Вт.

Упрощенная функциональная схема светодальномера «Кварц» приведена на рис. 84. В качестве источника света $\mathcal{Z}$ в

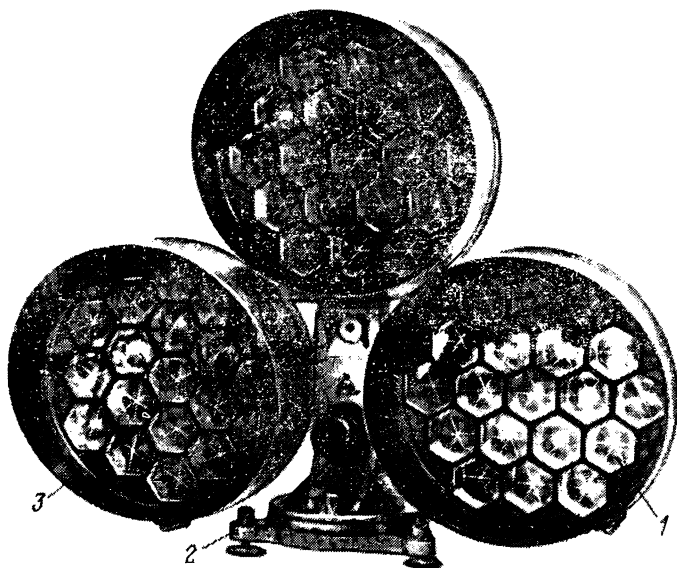


Рис. 83. Трипелъпризменный отражатель, входящий в комплект светодальномера «Кварц»:

1 — мозаика из трипелъпризм; 2 — подставка; 3 — козырек

нем применен гелий-неоновый лазер типа ЛГ-56, излучающий поляризованный свет с длиной волны $0,6328 \text{ мкм}$. Информационный сигнал передается с одного конца измеряемой линии на другой и обратно с использованием амплитудно-модулированных колебаний оптического диапазона. В дальномере применен внешний модулятор света, состоящий из конденсатора Керра 2 и анализатора 5. Управление работой модулятора осуществляется с помощью генератора масштабной частоты 1, генерирующего синусоидальные электрические колебания с частотой около 30 МГц .

С выхода модулятора света часть модулированного светового потока с помощью полупрозрачной пластинки 6 направляется по пути оптического короткого замыкания (ОКЗ), а основная его часть излучается в направлении на отражатель, установленный на другом конце измеряемой линии. Передающая оптическая система 8 используется для уменьшения расходимости светового пучка, в результате чего удастся увеличить дальность действия дальномера.

Перекидная шторка 7, установленная на пути прохождения света в передающей части дальномера, позволяет по желанию

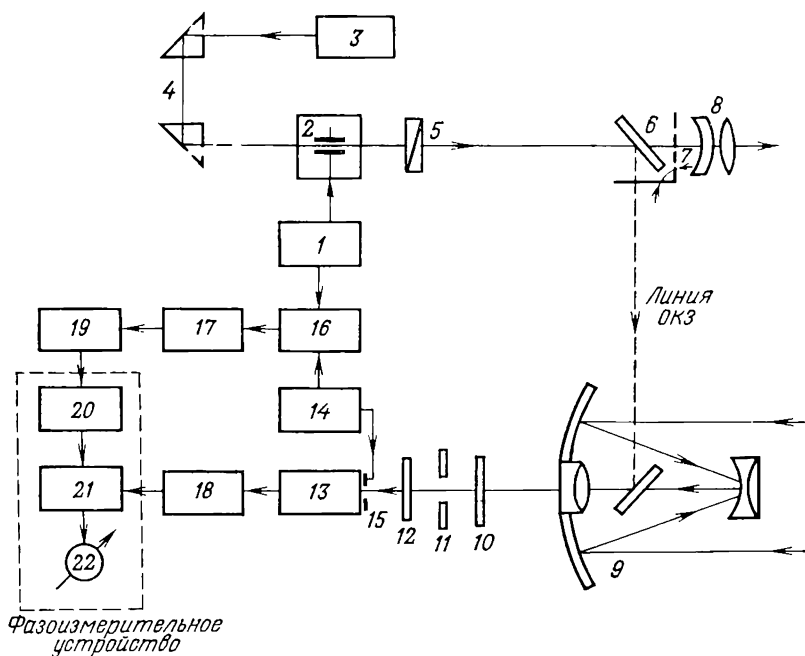


Рис. 84. Упрощенная функциональная схема светодальномера «Кварц»:

1 — генератор масштабной частоты; 2 — конденсатор Керра; 3 — гелий-неоновый лазер (источник излучения); 4 — поворотные призмы; 5 — анализатор; 6 — полупрозрачная пластинка; 7 — перекидная шторка; 8 — передающая оптическая система; 9 — приемная оптическая система; 10 — серый клин; 11 — полевая диафрагма; 12 — интерференционный фильтр; 13 — ФЭУ (фотоприемник); 14 — генератор вспомогательной частоты; 15 — накладной дисковый электрод; 16 — смеситель; 17 и 18 — усилители низкой частоты (УНЧ₁ и УНЧ₂); 19 — фазовый переключатель; 20 — фазовращатель; 21 — фазовый детектор; 22 — индикатор фазы

оператора производить работу с использованием или удаленно-го отражателя, или линии ОКЗ.

Принимаемый от удаленного отражателя слабый световой поток попадает в приемную зеркально-линзовую систему 9, с помощью которой значительный по диаметру пучок преобразуется в узкий луч, аналогичный лучу, поступающему по линии ОКЗ.

Установленный на пути прохождения принимаемого оптического сигнала серый клин 10 позволяет выравнивать величину светового потока, который может изменяться в широких пределах в зависимости от прозрачности атмосферы и от длины измеряемой линии и существенно отличаться от того потока, который проходит по пути оптического короткого замыкания. При отмеченном выравнивании, которое выполняется оператором вручную по показаниям соответствующего стрелочного прибора, удастся существенно стабилизировать работу фотоумножителя и уменьшить величину возникающих при этом дополнительных погрешностей измерений.

Другие элементы приемной оптической системы, такие, как полевая диафрагма 11 и интерференционный фильтр 12, позволяют осуществить пространственную и спектральную селекцию, за счет которых ослабляется влияние помех, создаваемых сторонними источниками света.

В качестве фотоприемника 13 в светодальнометре «Кварц» использован фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-38. Он выполняет в дальнометре несколько функций. С его помощью производится не только преобразование оптического сигнала в электрический и выделение колебаний модулирующей частоты, но также и гетеродинирование (т. е. преобразование) последних в колебания более низкой частоты, что связано с применением в схеме дальнометра низкочастотного метода фазовых измерений (см. § 10). Для реализации последней функции на полупрозрачный фотокатод ФЭУ накладывается вспомогательный дисковый электрод, к которому подводят электрические колебания от генератора вспомогательной частоты (гетеродина), частота которых отличается от соответствующей масштабной частоты на 15 кГц. В результате на выходе ФЭУ выделяются низкочастотные колебания с частотой 15 кГц, фаза которых несет в себе информацию о величине измеряемого расстояния. После соответствующего усиления с помощью УНЧ₂ (блок 18 на рис. 84) информационные колебания поступают на один из двух входов фазового детектора 21, который является составной частью компенсационного фазометра.

На другой вход фазометра поступают опорные колебания, образующиеся на выходе смесителя 16 в результате взаимодействия колебаний масштабной и вспомогательной частот и имеющие ту же частоту, что и информационные колебания, т. е. 15 кГц. Указанные колебания усиливаются низкочастотным усилителем УНЧ₁ (блок 17) и через фазовый переключатель 19 поступают на второй вход фазометра.

Фазовый переключатель позволяет оператору скачком изменять фазу опорного сигнала на 90°, что в сочетании с разворотом в 180° оси фазовращателя позволяет выполнять измерения при различных фазах опорного сигнала на входе фазового детектора (0, 90, 180 и 270°). Переключения необходимы для уменьшения погрешностей измерений, обусловленных взаимным влиянием электрических цепей, по которым проходят информационный и опорный сигналы, а также несовершенством работы используемого фазометра.

В качестве фазовращателя 20 в схеме светодальнометра «Кварц» применен индукционный фазовращатель типа БИФ-114, принцип действия которого рассмотрен в § 24. Он конструктивно связан с оцифрованной круговой шкалой, позволяющей с помощью стрелочного прибора регистрировать угол поворота оси фазовращателя, который пропорционален искомой разности фаз между информационным и опорным сигналами.

Анализ функциональной схемы светодальномера «Кварц» свидетельствует о том, что она полностью соответствует обобщенной функциональной схеме дальномера с пассивным ответом, приведенной в § 17. Для выполнения точных отсчетов и для разрешения неоднозначности в дальномере «Кварц» используются четыре масштабные частоты с номинальными значениями, равными 30,0; 29,99625; 29,925 и 28,5 МГц. Для повышения их стабильности колебания масштабной частоты возбуждаются с помощью кварцевых резонаторов, помещенных в термостат, внутри которого поддерживается постоянная температура, равная +50 °С. В этот же термостат помещены и кварцевые резонаторы, используемые для возбуждения колебаний вспомогательных частот, номинальные значения которых на 15 кГц выше соответствующих им масштабных частот.

Процесс измерения длин линий светодальномером «Кварц» складывается из установки дальномера и отражателя на конечных пунктах измеряемой линии, взаимного ориентирования, предварительного прогрева дальномера и взятия необходимого количества отсчетов по шкале фазовращателя с целью получения требуемой точности измерения искомой длины линии.

В качестве основной рабочей формулы, по которой вычисляется величина измеряемого расстояния, используется формула (80). Применительно к светодальномеру «Кварц» эта формула записывается в следующем виде:

$$D = N \frac{v}{2f} + l + K_z, \quad (121)$$

где N — число целых уложений отрезков, равных $\lambda/2 = v/(2f)$, в измеряемой длине линии D ; v — скорость света в реальной атмосфере для излучения с длиной волны 0,6328 мкм; f — одна из четырех масштабных частот, на которой выполняются измерения; $l = -\frac{\Delta\phi - \Delta\phi_0}{2\pi} \frac{v}{2f}$ — разность отсчетов по шкале фазометра

при измерениях на удаленный отражатель и по ОКЗ, выраженная в линейной мере; $\Delta\phi$ — измеренная фазометром разность фаз при посылке света на удаленный отражатель; $\Delta\phi_0$ — измеренная фазометром разность фаз при прохождении информационного сигнала по ОКЗ; $K_z = K_{\text{пр}} + K_{\text{отр}}$ — поправка дальномера за положение отсчетной точки в приемопередатчике и в отражателе; $K_{\text{пр}} = D_0$ — приборная поправка приемопередатчика; $K_{\text{отр}}$ — постоянная поправка отражателя.

Следует заметить, что в светодальномере «Кварц» вся шкала фазометра разбита на 400 делений, т. е. оцифровка сделана не в градусной мере. В связи с этим для вычисления величины l используется следующая методика: по формуле

$$a = \frac{1}{M} \frac{v}{2f}, \quad (122)$$

где M — полное число делений шкалы фазометра, равное 400, определяется цена одного деления шкалы a на соответствующей масштабной частоте f , а значение l вычисляется при этом по формуле

$$l = a(m - m_0). \quad (123)$$

Для повышения точности измерений в светодальномере «Кварц» все четыре масштабные частоты используют не только для разрешения неоднозначности, но и для получения точного значения определяемой дальности:

$$D_{\text{изм}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 D_i, \quad (124)$$

где $D_i = N_i \frac{v}{2f_i} + l_i + K_{\Sigma}$ — значение измеренного расстояния на i -й масштабной частоте.

Разрешение неоднозначности в светодальномере «Кварц», т. е. нахождение неизвестной величины N , производится на основе описанного в § 12 метода, базирующегося на использовании четырех фиксированных масштабных частот. Основная его отличительная особенность состоит в том, что значение коэффициента неоднозначности, определяемое в данном случае соотношениями

$$k = \frac{f_1}{f_1 - f_4} = \frac{f_1 - f_4}{f_1 - f_3} = \frac{f_1 - f_3}{f_1 - f_2}, \quad (125)$$

выбрано в рассматриваемом дальномере равным 20. Такое значение не позволяет использовать изложенную в § 12 декадную последовательность определения полного значения величины D . В связи с этим рассмотрим вкратце основные особенности методики разрешения неоднозначности, характерные для светодальномера «Кварц».

В соответствии с формулой (121) при последовательных измерениях на четырех масштабных частотах имеем

$$\left. \begin{aligned} D &= N_1 \frac{v}{2f_1} + l_1 + K_{\Sigma} \\ D &= N_2 \frac{v}{2f_2} + l_2 + K_{\Sigma} \\ D &= N_3 \frac{v}{2f_3} + l_3 + K_{\Sigma} \\ D &= N_4 \frac{v}{2f_4} + l_4 + K_{\Sigma} \end{aligned} \right\}, \quad (126)$$

где f_1, f_2, f_3 и f_4 — значения масштабных частот.

Поскольку $f_1 > f_2 > f_3 > f_4$, то соответствующие им длины волн связаны между собой неравенством $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4$. Так как при последовательном переходе от f_1 к f_2 , от f_2 к f_3 и от f_3 к f_4 длина используемого нами «метра» увеличивается, то число уложений N в значении искомой длины линии D будет при таком переходе уменьшаться, что соответствует условию $N_1 > N_2 > N_3 > N_4$. Исходя из этого, введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} N_2 &= N_1 - q \\ N_3 &= N_1 - p \\ N_4 &= N_1 - n \end{aligned} \right\}, \quad (127)$$

где q , p и n — целые числа, на которые отличаются N_2 , N_3 и N_4 от значения N_1 .

Из совместного решения первых двух уравнений системы (126) с учетом соотношения $N_2 = N_1 - q$ найдем величину q :

$$q = \frac{2(f_1 - f_2)}{v} (D - K_\Sigma) - \frac{2f_1}{v} \left(l_1 - l_2 \frac{f_2}{f_1} \right). \quad (128)$$

Эта величина соответствует числу уложений отрезков в длине D , значения которых определяются формулой

$$\frac{\lambda_{1-2}}{2} = \frac{v}{2(f_1 - f_2)}.$$

При использовании приведенных выше значений f_1 и f_2 длины таких отрезков равна 40 км, т. е. значение q будет изменяться на единицу при последовательном увеличении длины линии D на каждые 40 км. На основании вышеизложенного величину $(D - K_\Sigma)$ в формуле (128) можно заменить приближенным значением искомого расстояния $D_{\text{пр}}$, которое должно быть заранее известно с точностью ± 20 км.

Учитывая, что для светодиода «Кварц» $2(f_1 - f_2)/v = 0,025 \text{ км}^{-1}$, $\frac{2f_1}{v} = 0,2 \text{ м}^{-1}$ и $f_2/f_1 \approx 1$, формула (128) принимает вид

$$q = 0,025 D_{\text{пр}} + 0,2 (l_2 - l_1), \quad (129)$$

в которой значение $D_{\text{пр}}$ следует подставлять в км, а l_1 и l_2 — в м.

Формула (129) позволяет по приближенному значению расстояния $D_{\text{пр}}$ и измеренным величинам l_1 и l_2 определить величину q .

Из совместного решения всех четырех уравнений (126) с учетом соотношений (127) путем последовательного исключения величин D , N_1 , n и p получим следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{f_1 - f_3}{f_1 - f_2} q - \frac{2f_2}{v} \frac{f_1 - f_3}{f_1 - f_2} (l_2 - l_1) + \frac{2f_3}{v} (l_3 - l_1) \\ n &= \frac{f_1 - f_4}{f_1 - f_3} p - \frac{2f_3}{v} \frac{f_1 - f_4}{f_1 - f_3} (l_3 - l_1) + \frac{2f_4}{v} (l_4 - l_1) \\ N_1 &= \frac{f_1}{f_1 - f_4} n - \frac{2f_4}{v} \frac{f_1}{f_1 - f_4} (l_4 - l_1) \end{aligned} \right\}, \quad (130)$$

или с учетом характерных для светодиальномера «Кварц» значений масштабных частот:

$$\left. \begin{aligned} p &= 20q - 4(l_2 - l_1) + 0,2(l_3 - l_1) \\ n &= 20p - 4(l_3 - l_1) + 0,2(l_4 - l_1) \\ N_1 &= 20n - 3,8(l_4 - l_1) \end{aligned} \right\}. \quad (130a)$$

Вычисляемые по формулам (129) и (130a) значения q , p , n и N_1 используют затем для определения по формулам (127) искоемых величин N_2 , N_3 и N_4 . При этом необходимо иметь в виду, что по своему физическому смыслу величины q , p , n , N_1 , N_2 , N_3 и N_4 представляют собой целые числа. Поэтому при дальнейшем использовании они после вычислений должны быть округлены до ближайших целых чисел.

Анализ рассмотренной выше методики разрешения неоднозначности свидетельствует о том, что использование в дальномерах значений коэффициентов неоднозначности, отличных от 10 или 100, приводит к существенному усложнению способа нахождения полного значения искомой длины линии, и поэтому такой подход находит ограниченное применение в современных дальномерах.

Для упрощения вычислительного процесса, связанного с необходимостью определения реальной скорости света по измеренным значениям метеофакторов, исходную рабочую формулу (121) подвергают некоторым преобразованиям. С целью вычисления не полного значения величины v , а ее уклонений от скорости света v_0 , соответствующей стандартным метеорологическим условиям, запишем формулу (121) в следующем виде:

$$\begin{aligned} D &= N \frac{c}{2f(n_0 + \Delta n_{t,p} + \Delta n_e)} + l + K_{\Sigma} = \\ &= N \frac{v_0}{2f} + l + \delta_{t,p} + \delta_e + K_{\Sigma}, \end{aligned} \quad (131)$$

где c — скорость света в вакууме, равная 299 792,48 км/с; n_0 — групповой показатель преломления для стандартных метеоусловий и длины волны света 0,6328 мкм, равный 1,0003001; $v_0 = c/n_0$ — скорость света, соответствующая стандартным метеоусловиям и численно равная 299 702,5 км/с; $\Delta n_{t,p}$ — поправка к

величине показателя преломления, обусловленная несоответствием реальных значений температуры и давления воздуха принятым стандартным значениям этих параметров, равным $t_0 = 0^\circ\text{C}$ и $p_0 = 101,3$ кПа (760 мм рт. ст.); Δn_e — поправка за влияние влажности воздуха, стандартное значение которой принимается равным нулю; $\delta_{t,p} \approx -D_{\text{пр}} \Delta n_{t,p}$ и $\delta_e \approx -D_{\text{пр}} \Delta n_e$ — поправки, соответствующие значениям $\Delta n_{t,p}$ и Δn_e , но выраженные в линейной мере.

Связь поправок $\Delta n_{t,p}$ и Δn_e с измеренными значениями метеофакторов t , p и e нетрудно установить на основе анализа формулы (73), приведенной в § 14. Для облегчения их вычисления используют специально составленные таблицы.

Следует заметить, что помимо рассмотренных выше поправок в значение измеряемого расстояния вводят еще поправки за центрировку $\delta_{\text{ц}}$ приемопередатчика и редукцию $\delta_{\text{р}}$ отражателя. С учетом этого наклонная дальность вычисляется по формуле

$$D = N \frac{\lambda_0}{2} + l + \delta_{\text{мет}} + \Sigma \delta, \quad (132)$$

где $\lambda_0 = v_0/f$ — длина волны колебаний соответствующей масштабной частоты f в стандартных условиях; $\delta_{\text{мет}} = \delta_{t,p} + \delta_e$ — суммарная метеорологическая поправка; $\Sigma \delta = \delta_{\text{ц}} + \delta_{\text{р}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{отр}}$ — результирующая поправка, учитывающая приведение измеренного значения расстояния к геодезическим центрам, а также приборные поправки.

Для пояснения методики определения длины линии, измеренной светодальномером «Кварц», рассмотрим следующий пример.

Пусть на линии протяженностью около 10 км при использовании масштабной частоты f_1 получены следующие отсчеты по шкале фазовращателя:

при работе на удаленный отражатель $m = 230,1$ дел.;

при работе по ОКЗ $m_0 = 48,0$ дел.

Для упрощения отсчеты, получаемые при сдвиге фаз опорного сигнала на 90 , 180 и 270° , в расчет принимать не будем. За счет этих отсчетов производится лишь уточнение значений m и m_0 .

Цена деления шкалы фазовращателя на частоте f_1

$$a_1 = \frac{1}{M} \frac{v_0}{2f_1} = \frac{299\,702\,500}{400 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^7} = 0,01249 \text{ м.}$$

Разность отсчетов $(m - m_0)$, выраженная в линейной мере, будет при этом равна $l_1 = a_1(m - m_0) = 0,01249(230,1 - 48,0) = 2,274 \text{ м.}$

При измерениях на масштабных частотах f_2 , f_3 и f_4 аналогичным способом получены величины $l_2 = 0,826 \text{ м}$; $l_3 = 2,556 \text{ м}$; $l_4 = 2,298 \text{ м}$.

Определим по формулам (129) и (130а) значения q , p , n и N_1 :

$$q = 0,025 \cdot 10 + 0,2(0,826 - 2,274) = -0,040 \approx 0;$$

$$p = 0 - 4(0,826 - 2,274) + 0,2(2,556 - 2,274) = 5,848 \approx 6;$$

$$n = 20 \cdot 6 - 4(2,556 - 2,274) + 0,2(2,298 - 2,274) = 118,877 \approx 119;$$

$$N_1 = 20 \cdot 119 - 3,8(2,298 - 2,274) = 2379,909 \approx 2380.$$

На основании формулы (127) найдем значения N_2 , N_3 и N_4 :

$$N_2 = 2380 - 0 = 2380;$$

$$N_3 = 2380 - 6 = 2374;$$

$$N_4 = 2380 - 119 = 2261.$$

При вычислении метеорологической поправки $\delta_{\text{мет}}$ используют значения температуры, давления и влажности воздуха, которые несколько раз определяют с помощью метеоприборов в процессе выполнения дальномерных измерений на обоих концах искомой линии. Применительно к рассматриваемому примеру эти параметры характеризовались следующими осредненными величинами: $t = +18,2^\circ\text{C}$, $p = 98,72$ кПа (740,5 мм рт. ст.), $e = 1,21$ кПа (9,1 мм рт. ст.).

С помощью таблиц найдены следующие значения поправок $\Delta n_{t,p}$ и Δn_e : $\Delta n_{t,p} = -26,0 \cdot 10^{-6}$ и $\Delta n_e = -0,5 \cdot 10^{-6}$.

Для уменьшения погрешности определения величины $\delta_{\text{мет}}$ уточним приближенное значение искомого расстояния:

$$D'_{\text{пр}} = N_1 \frac{v_0}{2f_1} = 2380 \frac{3 \cdot 10^5}{2 \cdot 3 \cdot 10^7} = 11,9 \text{ км.}$$

Найдем значение суммарной метеорологической поправки $\delta_{\text{мет}}$:

$$\delta_{\text{мет}} = -D'_{\text{пр}} (\Delta n_{t,p} + \Delta n_e) = -11,9 \cdot 10^3 (-26,5 \cdot 10^{-6}) = 0,315 \text{ м.}$$

Величина приборной поправки K_{Σ} определяется периодически в начале и конце полевого сезона посредством измерения линии известной длины. Ее значение вносят в паспорт прибора.

Элементы центрировки $\delta_{\text{ц}}$ и редукции $\delta_{\text{р}}$ определяются одним из общепринятых геодезических методов в процессе выполнения всего комплекса работ, связанных с дальномерными измерениями конкретной линии.

Значения K_{Σ} , $\delta_{\text{ц}}$ и $\delta_{\text{р}}$ вносят в журнал для вычисления искомой длины линии. В рассмотренном выше примере реальных результатов измерений суммарная поправка $\Sigma\delta$ оказалась равной $-0,217$ м.

По полученным величинам N , l , $\delta_{\text{мет}}$ и $\Sigma\delta$ вычислим измеренные значения интересующей нас длины линии D на всех четырех масштабных частотах:

$$\begin{aligned} D_1 &= N_1 \frac{v_0}{2f_1} + l_1 + \delta_{\text{мет}} + \Sigma\delta = \\ &= 2380 \frac{299702,5 \cdot 10^3}{2 \cdot 3 \cdot 10^7} + 2,274 + 0,315 - 0,217 = 11890,570 \text{ м.} \end{aligned}$$

По аналогии

$$D_2 = 11\,890,609 \text{ м,}$$

$$D_3 = 11\,890,602 \text{ м,}$$

$$D_4 = 11\,890,594 \text{ м.}$$

По формуле (124) найдем результирующее значение измеренного наклонного расстояния $D_{\text{рез}} = (D_1 + D_2 + D_3 + D_4)/4 = 11\,890,594 \text{ м.}$

При необходимости в полученное значение вводят поправки за наклон линии, за редуцирование на референц-эллипсоид, а также за приведение к длине на сфере.

Светодальномер «Гранат»

Разработанный в 1979 г. в ЦНИИГАиК светодальномер «Гранат» является дальнейшим развитием светодальномера «Кварц». Благодаря использованию современной элементной базы, применению более компактной приемопередающей оптической системы, а также целому ряду других усовершенствований значительно уменьшены габариты, масса и потребляемая прибором мощность. Проведенные исследования по выявлению различного рода источников ошибок позволили по сравнению со светодальномером «Кварц» повысить приборную точность дальномера. В то же время изучение накопленного опыта эксплуатации светодальномера «Кварц» показало, что дальность действия дальномера может быть несколько уменьшена.

Диапазон измеряемых дальномером «Гранат» расстояний — от 100 м до 20 км. Средняя квадратическая погрешность опре-

деления длин линий в этом диапазоне $m_D = \pm (0,5 + 2 \cdot 10^{-6} D) \text{ см.}$ Масса приемопередатчика 15 кг. Потребляемая от 12-вольтовой аккумуляторной батареи мощность составляет 40 Вт.

Светодальномер «Гранат» (рис. 85) построен по той же функциональной схеме, что и светодальномер «Кварц» (см. рис. 84).

В качестве источника света в светодальномере «Гранат» применен гелий-неоновый лазер типа ЛГ-78, который в сравнении с лазером ЛГ-56 легче, портативнее и эконо-

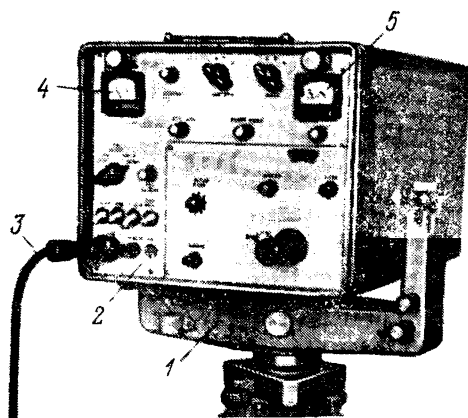


Рис. 85. Светодальномер «Гранат»

1 — подставка; 2 — панель управления; 3 — кабель питания; 4 — контрольный стрелочный прибор; 5 — индикатор фазы

мичнее по питанию. Существенным преимуществом является также его повышенная надежность в работе.

В приемной части дальномера использован более современный фотоумножитель ФЭУ-115, который по сравнению с ФЭУ-38 имеет меньшие размеры и требует для работы менее высокого напряжения питания.

В дальномере «Гранат», так же как и в «Кварце», применен низкочастотный метод фазовых измерений. Однако разностная частота, на которой выполняются фазовые измерения, уменьшена с 15 до 5 кГц. Такое понижение позволило улучшить стабильность работы низкочастотных узлов, используемых для передачи информационного и опорного сигналов, а также уменьшить их взаимное влияние, порождающее циклические ошибки измерений.

Для упрощения методики работы в светодальномере «Гранат» применена иная сетка масштабных частот, позволяющая реализовать декадную последовательность определения полного значения искомой длины линии и проградуировать шкалу фазометра непосредственно в единицах длины. Для выполнения указанных условий значение основной масштабной частоты f_1 в дальномере выбрано равным 29,970 253 МГц, для которой эквивалентная длина волны для принятых стандартных условий [$t_0=0^\circ\text{C}$, $p_0=101,3$ кПа (760 мм рт. ст.) и $e_0=0$], равна

$$\lambda_1 = \frac{v_0}{f_1} = \frac{299,702530 \cdot 10^6}{29,970253 \cdot 10^6} = 10 \text{ м.}$$

Поскольку в основу работы светодальномера «Гранат» положена та же функциональная схема, что и для «Кварца», то для него справедливы те же исходные рабочие формулы, устанавливающие взаимосвязь между искомой длиной линии D и такими параметрами, как длина волны масштабных колебаний λ , домер фазового цикла l и перечисленные выше различного рода поправки δ . Исходя из этого, проанализируем рабочую формулу (132) применительно к светодальномеру «Гранат».

Для того чтобы в качестве основного отсчетного отрезка длины сохранить величину $\lambda_1=10$ м (а не $\lambda_1/2=5$ м), представим формулу (132) без учета поправок $\delta_{\text{мет}}$ и $\Sigma\delta$ в следующем виде:

$$2D = N_1\lambda_1 + l_1', \quad (132a)$$

где величина $l_1'=2l$ имеет тот же смысл, что и величина l в формуле (132), но для удвоенного расстояния D .

Отсчетная шкала фазометра в светодальномере «Гранат» разбита на 100 делений, т. е. $M=100$. Цена одного деления шкалы на основной масштабной частоте f_1 для удвоенного расстояния при стандартных метеоусловиях оказывается равной

$$a = \frac{1}{M} \frac{v_0}{f_1} = 0,1 \text{ м.} \quad (133)$$

Поскольку точность светодальномера «Гранат» характеризуется погрешностью ± 5 мм (или для удвоенного расстояния ± 1 см), то отсчет со шкалы фазометра необходимо производить с точностью до десятых долей деления (т. е. до $0,1a=1$ см).

Исходя из полученного значения цены деления шкалы, выразим входящую в формулу (132а) величину l_1' через отсчет m по шкале фазометра с использованием соотношения (123):

$$l_1' = a(m - m_0) = 0,1(m - m_0). \quad (134)$$

В светодальномере «Гранат» с помощью дополнительных фазорегулирующих элементов имеется возможность при посылке света по линии ОКЗ установить нулевые показания стрелочного прибора «Индикатор фазы» при нулевом положении основной шкалы фазометра, что соответствует условию $m_0 = 0$, которое используется в дальномере при разрешении неоднозначности. При этом

$$l_1' = 0,1m. \quad (135)$$

Последнее соотношение свидетельствует о том, что в данном случае снимаемое со шкалы фазометра трехзначное число (с учетом десятых долей деления), соответствующее величине l_1' , оказывается выраженным непосредственно в сантиметрах для удвоенной величины измеряемого расстояния D .

Для разрешения неоднозначности, так же как и в дальномере «Кварц», используются четыре фиксированные масштабные частоты (одна основная и три вспомогательные), причем номинальные значения вспомогательных частот выбраны более высокие, чем основная масштабная частота. Значение коэффициента неоднозначности k , определяемое формулой (125), в светодальномере «Гранат» принято равным 10. С учетом этого

$$k = \frac{f_1}{f_2 - f_1} = \frac{f_2 - f_1}{f_3 - f_1} = \frac{f_3 - f_1}{f_4 - f_1} = 10. \quad (136)$$

Наблюдаемое в формулах (125) и (136) различие в индексах для вспомогательных масштабных частот объясняется тем, что в технических описаниях на светодальномеры «Кварц» и «Гранат» принят различный порядок нумерации этих частот. В тексте сохранена та же нумерация, что и в технических описаниях.

Соотношение (136) позволяет по выбранной ранее основной масштабной частоте f_1 рассчитать остальные масштабные частоты f_2 , f_3 и f_4 :

$$\begin{aligned} f_2 &= 1,1f_1 = 32,967278 \text{ МГц}; \\ f_3 &= 1,01f_1 = 30,269955 \text{ МГц}; \\ f_4 &= 1,001f_1 = 30,000223 \text{ МГц}. \end{aligned}$$

В отличие от дальномера «Кварц» в светодальномере «Гранат» вспомогательные масштабные частоты f_2 , f_3 и f_4 использу-

ются только для разрешения неоднозначности, но не для уточнения последних цифр в значении измеряемого расстояния D .

Для пояснения применяемой в светодальномере «Гранат» методики разрешения неоднозначности проанализируем прежде всего числовые значения разностей $f_2 - f_1$, $f_3 - f_1$ и $f_4 - f_1$:

$$\begin{aligned} f_2 - f_1 &= 0,1 f_1 = 2997025 \text{ Гц}; \\ f_3 - f_1 &= 0,01 f_1 = 299702 \text{ Гц}; \\ f_4 - f_1 &= 0,001 f_1 = 29970 \text{ Гц}. \end{aligned}$$

Вычислим длины волн λ , соответствующие этим разностным частотам:

$$\begin{aligned} \lambda_{2-1} &= \frac{v_0}{f_2 - f_1} = \frac{299,702530 \cdot 10^6}{2,997025 \cdot 10^6} = 100 \text{ м}; \\ \lambda_{3-1} &= \frac{v_0}{f_3 - f_1} = \frac{299,702530 \cdot 10^6}{299,702 \cdot 10^3} = 1000 \text{ м}; \\ \lambda_{4-1} &= \frac{v_0}{f_4 - f_1} = \frac{299,702530 \cdot 10^6}{29,970 \cdot 10^3} = 10\,000 \text{ м}. \end{aligned}$$

Полученные величины λ_{2-1} , λ_{3-1} и λ_{4-1} свидетельствуют о том, что при последовательных измерениях одного и того же значения $2D$ с применением частот f_1 , $f_2 - f_1$, $f_3 - f_1$ и $f_4 - f_1$ длина основного отсчетного отрезка (т. е. принятого нами условного «метра») увеличивается при каждой смене частот в 10 раз, принимая значения 10, 100, 1000 и 10 000 м. При этом если на частоте f_1 отсчет по шкале фазометра соответствует величине l_1' , выраженной в сантиметрах, то на частотах $f_2 - f_1$, $f_3 - f_1$ и $f_4 - f_1$ отсчеты m_{2-1} , m_{3-1} и m_{4-1} , снимаемые со шкалы фазометра, эквивалентны значениям $l_2' - l_1'$, $l_3' - l_1'$ и $l_4' - l_1'$, выраженным соответственно в дециметрах, метрах и десятках метров. При каждом переходе от f_1 к $f_2 - f_1$, от $f_2 - f_1$ к $f_3 - f_1$ и т. д. отсчет становится в 10 раз более грубым, но позволяет получить одну предыдущую неизвестную цифру в полном значении измеряемого расстояния D .

С целью конкретизации изложенной методики разрешения неоднозначности обоснуем рабочую формулу для полного значения D применительно к светодальномеру «Гранат», для чего представим отсчеты, снимаемые со шкалы фазометра, в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} l_4' - l_1' &= (10^2 a_{4-1} + 10 b_{4-1} + c_{4-1}) 10^3 \\ l_3' - l_1' &= (10^2 a_{3-1} + 10 b_{3-1} + c_{3-1}) 10^2 \\ l_2' - l_1' &= (10^2 a_{2-1} + 10 b_{2-1} + c_{2-1}) 10 \\ l_1' &= (10^2 a_1 + 10 b_1 + c_1) \end{aligned} \right\}, \quad (137)$$

где a , b и c — цифры в отсчетах, соответствующие десяткам, единицам и десятым долям делений шкалы при измерениях на частотах $f_4 - f_1$, $f_3 - f_1$, $f_2 - f_1$ и f_1 .

Поскольку в первых трех уравнениях при дальнейшем рассмотрении принимается в расчет только одна старшая цифра, то формула для удвоенного полного значения измеряемого расстояния $D_{\text{полн}}$ будет иметь вид, аналогичный формуле (57):

$$2D_{\text{полн}} = (10^5 a_{4-1} + 10^4 a_{3-1} + 10^3 a_{2-1} + 10^2 a_1 + 10b_1 + c_1). \quad (138)$$

Приведенная формула позволяет получить однозначную величину удвоенного расстояния $2D_{\text{полн}}$ в пределах до 10 км. Однако дальность действия светодальномера «Гранат» равна 20 км (что соответствует удвоенному значению, равному 40 км). В связи с этим необходимо предварительно знать длину определяемой линии.

С учетом данного замечания формула (138) может быть представлена в следующем виде:

$$D_{\text{полн}} = 5 \cdot 10^5 n + \frac{1}{2} (10^5 a_{4-1} + 10^4 a_{3-1} + 10^3 a_{2-1} + 10^2 a_1 + 10b_1 + c_1), \quad (138a)$$

где n — вспомогательный коэффициент, значения которого соответственно равны 0, 1, 2, 3 в диапазонах длин линии от 0 до 5 км, от 5 до 10 км, от 10 до 15 км и от 15 до 20 км.

Следует заметить, что в отдельных случаях из-за погрешностей измерений входящие в формулу (138) величины a_{4-1} , a_{3-1} и a_{2-1} могут содержать ошибку, равную ± 1 . Для исключения таких грубых промахов полное значение длины линии в практике дальномерных измерений определяют, как правило, не с помощью формулы (138), а с использованием соответствующей формы записи с поразрядным смещением отсчетов $l_4' - l_1'$, $l_3' - l_1'$, $l_2' - l_1'$ и l_1' [см. пример формулы записи (55), приведенной в § 12].

Поясним на конкретном примере методику измерения длин линий светодальномером «Гранат», которая наряду с целым рядом вспомогательных операций включает в себя как рассмотренную выше процедуру разрешения неоднозначности, так и полное вычисление искомой длины линии D .

Не останавливаясь на анализе последовательности выполняемых вспомогательных работ с прибором на геодезическом пункте (таких, как процесс установки дальномера и отражателя на конечных пунктах измеряемой линии, определение в случае необходимости элементов центрировки, предварительный прогрев и настройка отдельных узлов, измерение с помощью метеоприборов температуры, давления и влажности воздуха), которые характерны для различных типов светодальномеров (и в частности, для рассмотренного выше светодальномера «Кварц»), отметим, что одним из первых этапов непосредственного измерения длины линии является процесс разрешения неоднозначности. Применительно к светодальномеру «Гранат»

этот процесс сводится к взятию отсчетов l_1' , $l_4' - l_1'$, $l_3' - l_1'$ и $l_2' - l_1'$ по шкале фазометра при наблюдениях на удаленный отражатель с последовательным использованием частот f_1 , f_4 , f_3 и f_2 . Для того чтобы непосредственно со шкалы снять отсчеты, соответствующие разностям отсчетов на масштабных частотах $f_4 - f_1$, $f_3 - f_1$ и $f_2 - f_1$, в отсчетном устройстве предусмотрено приспособление, позволяющее после взятия отсчета на частоте f_1 установить на это место нуль шкалы.

Для иллюстрации особенностей обработки полученных таким способом разностных отсчетов приведем фактические данные измерения линии длиной около 2 км светодальномером «Гранат»: $l_1' = 537$, $l_4' - l_1' = 439$, $l_3' - l_1' = 411$, $l_2' - l_1' = 960$.

В полевом журнале эти отсчеты записывают с поразрядным смещением в следующем порядке:

$$\begin{array}{r} l_4' - l_1' = 439 \\ l_3' - l_1' = \underline{411} \\ l_2' - l_1' = \underline{960} \\ l' = \underline{537} \\ \hline 2D_{\text{полн}} = 439537 \text{ см} = 4395,37 \text{ м.} \end{array}$$

или $D_{\text{полн}} = 4395,37 : 2 = 2197,685 \text{ м.}$

Поскольку приближенное значение длины линии $D_{\text{пр}}$ меньше 5 км, то $n=0$, т. е. нет необходимости учитывать первое слагаемое в формуле (138а).

В разностях $l_4' - l_1'$, $l_3' - l_1'$ и $l_2' - l_1'$ принимается в расчет только одна наиболее достоверная цифра. В нашем примере эта цифра подчеркнута и соответствует десяткам делений шкалы. Однако обращает на себя внимание тот факт, что для разностного отсчета $l_3' - l_1'$ в результирующее значение $2D_{\text{полн}}$ введена цифра 3 вместо подчеркнутой цифры 4. Это обусловлено тем, что последующая принятая в расчет цифра 9 получена из разностного отсчета $l_2' - l_1'$. Следовательно, если учесть первые две цифры в разностном отсчете $l_3' - l_1'$, то он должен равняться 39 или 49. Полученное значение 41 ближе к 39, чем к 49. Из этого следует вывод, что при взятии разностного отсчета $l_3' - l_1'$ была допущена ошибка, равная двум делениям, которая при правильной интерпретации полученных значений отсчетов легко устраняется.

Приведенный пример свидетельствует о том, что в данном случае при формальном использовании формулы (138а) для определения полного значения длины линии $D_{\text{полн}}$ мог быть допущен грубый промах. Анализ смежных разностных отсчетов ($l_4' - l_1'$) и ($l_2' - l_1'$) с отсчетом ($l_3' - l_1'$) позволил избежать такого промаха.

Дальнейшая процедура измерения линии светодальномером «Гранат» связана с необходимостью уточнения последних цифр

в значении $D_{\text{полн}}$. С этой целью на основной масштабной частоте f_1 берут несколько отсчетов при посылке света на удаленный отражатель и по линии ОКЗ с использованием различных положений фазового переключателя, позволяющего изменять фазу опорного сигнала на 180 и на $\pm 90^\circ$. Полученное значение $l'_{1\text{ср}}$ используют для уточнения последних цифр в величине $D_{\text{полн}}$. Затем в значение $D_{\text{полн}}$ вводят поправки $\delta_{\text{мет}}$ и $\Sigma\delta$, которые определяют по той же методике, что и для светодальномера «Кварц».

Заключительным этапом вычислений является редуцирование измеренного значения длины линии на соответствующую отсчетную поверхность.

Светодальномер СГ-3

Разработанный около 15 лет тому назад отечественный светодальномер СГ-3 из-за высокой приборной точности до настоящего времени используется при выполнении высокоточных линейных измерений в нашей стране (главным образом при изучении горизонтальных деформаций земной коры на созданных в последние годы геодинамических полигонах).

Диапазон измеряемых длин линий: 0,7—20 км днем и 0,7—30 км ночью. Средняя квадратическая погрешность дальномера 3—4 мм. Масса комплекта без упаковки 120 кг. Потребляемая мощность 400 Вт.

В дальномере использован целый ряд оригинальных технических решений, касающихся как методики разрешения неоднозначности, так и выполнения точных измерений на выбранной масштабной частоте. Отличительная особенность этого светодальномера состоит в том, что он базируется на использовании двух синхронно работающих ячеек Керра, установленных в передающем и приемном трактах и управляемых колебаниями с плавно изменяемой масштабной частотой, т. е. на тех основных принципах, которые характерны для визуальных светодальномеров, широко применявшихся в нашей стране в 60-х годах.

Для пояснения основных особенностей работы светодальномера СГ-3 рассмотрим вкратце его упрощенную функциональную схему, которая приведена на рис. 86.

В качестве источника оптического излучения 3 в дальномере использован гелий-неоновый лазер ЛГ-56. Модуляция светового потока осуществляется с помощью ячейки Керра 4, входящей в состав передающего тракта дальномера. Управляющее напряжение поступает на такой модулятор от генератора масштабной частоты 2. Эту частоту с помощью соответствующих органов управления можно плавно изменять в пределах от 6,6 до 10,0 МГц. Принимаемый от удаленного отражателя световой поток поступает в другую ячейку Керра 7, входящую в состав при-

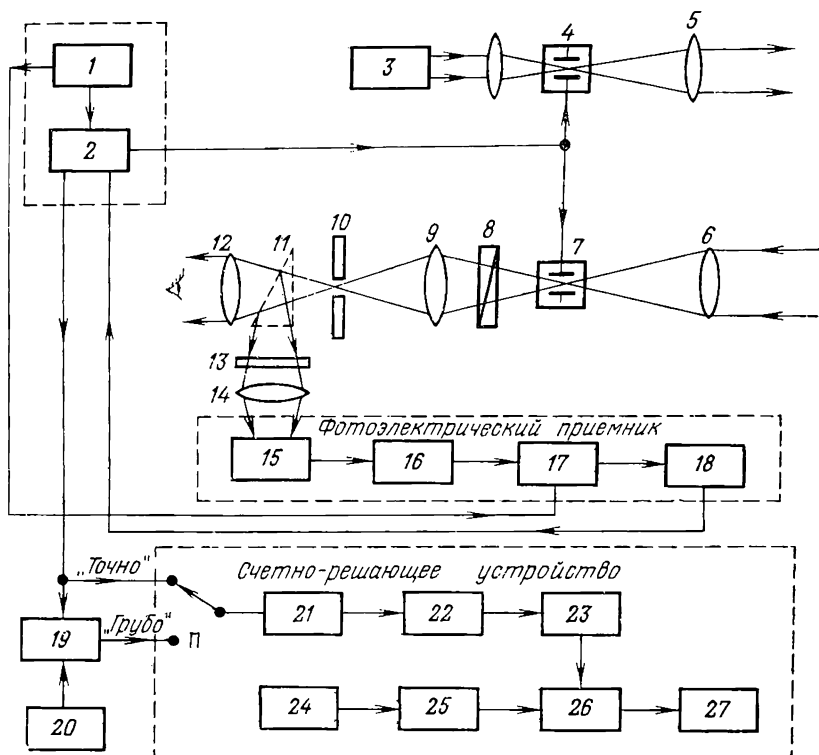


Рис. 86. Упрощенная функциональная схема светодальномера СГ-3:

1 — модулятор частоты; 2 — генератор масштабной частоты; 3 — гелий-неоновый лазер (источник излучения); 4 — модулятор света; 5 — объектив передающей системы; 6 — объектив приемной системы; 7 — демодулятор света; 8 — анализатор; 9 — фокусирующая линза; 10 — диафрагма; 11 — подвижная призма; 12 — окуляр приемной оптической системы; 13 — светофильтр; 14 — линза; 15 — ФЭУ (фотоприемник); 16 — избирательный усилитель; 17 — синхронный детектор; 18 — усилитель постоянного тока; 19 — смеситель; 20 — вспомогательный генератор; 21 — делитель частоты с коэффициентом деления k_1' ; 22 — делитель частоты с коэффициентом деления k_1'' ; 23 — блок интервала счета; 24 — генератор счетных импульсов; 25 — делитель частоты с коэффициентом деления k_2 ; 26 — электронный ключ; 27 — счетное устройство

емного тракта и выполняющую роль демодулятора. Управление ячейкой также происходит от того же генератора масштабной частоты, что и модулятора света. Входящие в состав ячеек конденсаторы Керра развернуты относительно друг друга на 90° , а плоскости их электродов составляют угол, равный 45° , с плоскостью поляризации анализатора и выходящего из источника света поляризованного излучения. Такое устройство, называемое компенсационной ячейкой Керра, позволяет получить на выходе из демодулятора световой поток с резко выраженными минимумами при определенных значениях масштабных частот. Без учета обычно вводимых поправок минимум наблюдаемого света,

соответствующий масштабной частоте f_m , отвечает при этом условию

$$D = N \frac{\lambda_m}{2} = N \frac{v}{2f_m}, \quad (139)$$

где D — величина измеряемого расстояния; N — число уложенных отрезков длиной $\lambda_m/2$ в искомой длине линии; λ_m — длина волны масштабных колебаний; v — рабочая скорость света.

Регистрация экстремального значения светового потока (и в частности, его минимального значения) обуславливает пониженную чувствительность дальномера к изменениям величины измеряемого расстояния и, как следствие, понижение его приборной точности. Для устранения этого недостатка в светодальномере СГ-3 реализован равносигнальный метод фазовых измерений, для чего с помощью показанного на функциональной схеме модулятора частоты I производится скачкообразное изменение масштабной частоты f_m с частотой «мерцаний» F , т. е. подаваемое на ячейку Керра модулирующее напряжение представляет собой частотно-модулированные колебания.

Центральная частота таких ЧМ колебаний соответствует масштабной частоте f_m , а девиация частоты ΔF определяется параметрами взаимодействия модулятора частоты с генератором масштабной частоты. Форма изменения светового потока на входе фотоэлектрического приемника при отмеченном скачкообразном изменении масштабной частоты будет существенно зависеть от того, насколько центральная частота отличается от частоты, соответствующей минимуму наблюдаемого света. Для иллюстрации на рис. 87 приведены графики изменения светового потока на входе ФЭУ для трех наиболее характерных случаев:

центральная частота f_c превышает частоту $f_{\min}$, на которой наблюдается минимум света, т. е. $f_c > f_{\min}$;

частота f_c совпадает с частотой $f_{\min}$, т. е. $f_c = f_{\min}$;

частота f_c меньше частоты $f_{\min}$, т. е. $f_c < f_{\min}$.

Как видно из приведенных на рис. 87 графиков, в первом и третьем случаях скачкообразное изменение масштабной частоты сопровождается заметными изменениями амплитуды светового потока на входе в фотоприемник, происходящими в такт со скачкообразными изменениями масштабной частоты. Различие состоит лишь в том, что в первом случае максимальное значение светового потока наблюдается на частоте $f_c + \Delta F$, а минимальное — на частоте $f_c - \Delta F$. В третьем случае, наоборот, частота $f_c + \Delta F$ соответствует минимальному значению светового потока, а $f_c - \Delta F$ — максимальному.

Наибольший интерес представляет второй случай, который соответствует равенству $f_c = f_{\min}$. В данном случае при скачкообразном изменении масштабной частоты амплитуда светового

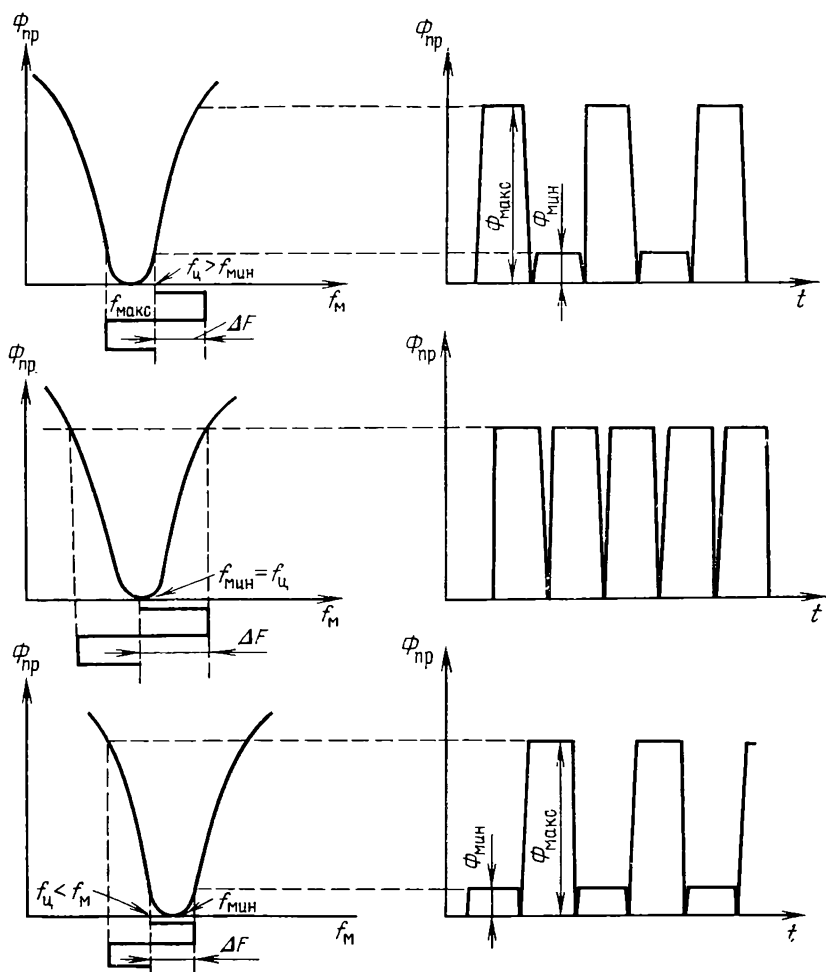


Рис. 87. Графики изменения светового потока на входе ФЭУ

потока практически остается неизменной. Такой режим соответствует основному рабочему режиму дальномера.

В светодальномере СГ-3 созданы условия для автоматического поддержания отмеченного режима, при котором $f_u = f_{\min}$. С этой целью выделяемый на выходе ФЭУ электрический сигнал, который по своей форме соответствует графикам изменения светового потока $\Phi_{\text{пр}} = \varphi(t)$, приведенным справа на рис. 87, после соответствующего усиления избирательным усилителем 16 (см. рис. 86) поступает в синхронный детектор 17. Последний по своему принципу действия аналогичен фазовому детектору, рассмотренному в § 24. При подаче на второй вход та-

кого детектора сигнала от модулятора частоты на его выходе формируется управляющий электрический сигнал, величина которого пропорциональна величине изменений светового потока между $\Phi_{\text{макс}}$ и $\Phi_{\text{мин}}$.

С помощью управляющего сигнала, которым воздействуют на частоту генератора масштабной частоты, в схеме дальномера автоматически поддерживается режим, при котором этот сигнал близок к нулю, что соответствует условию $f_{\text{ц}} = f_{\text{мин}}$ (или $f_{\text{м}} = f_{\text{мин}}$). Тем самым в светодальномере СГ-3 автоматически выполняется равенство (139), связывающее величину измеряемого расстояния D со скоростью распространения света v и масштабной частотой $f_{\text{м}}$, соответствующей минимуму наблюдаемого света. Задача измерения искомой длины линии сводится при этом к измерению значения автоматически поддерживаемой масштабной частоты $f_{\text{м}}$. С помощью входящего в состав дальномера счетно-решающего устройства, выполняющего функции электронно-счетного частотомера, удается проградуировать отсчетное табло дальномера непосредственно в единицах длины измеряемого расстояния для принятых стандартных метеорологических условий.

Для пояснения принципа реализации такого метода измерения масштабной частоты произведем анализ исходной рабочей формулы (139). Как и в ранее рассмотренных моделях дальномеров, в светодальномере СГ-3 непосредственно измеренное значение расстояния соответствует заранее принятым стандартным метеоусловиям [$t_0 = 0^\circ\text{C}$, $p_0 = 101,3$ кПа (760 мм рт. ст.), $e_0 = 0$], в которое затем вводят поправки за отклонение реальных метеопараметров от принятых. Тогда рабочая формула (135) без учета поправок принимает вид

$$D = N \frac{v_0}{2f_{\text{м}}}. \quad (139a)$$

При измерении частоты счетно-решающим устройством с помощью блока интервала счета (см. рис. 86) задается временной интервал $\Delta\tau$, который в данной схеме связан со значением искомой частоты $f_{\text{м}}$ соотношением

$$\Delta\tau = k_1 \frac{1}{f_{\text{м}}}, \quad (140)$$

где $k_1 = 2k_1'k_1''$ — коэффициент деления масштабной частоты.

Деление масштабной частоты осуществляется с помощью делителей частоты 21 и 22 (см. рис. 86) с коэффициентами k_1' и k_1'' . Коэффициент 2 в соотношении между k_1 и произведением $k_1'k_1''$ введен из-за того, что задающий генератор масштабных колебаний имеет частоту в два раза ниже, чем частота колебаний, поступающих на модулятор и демодулятор.

За интервал времени $\Delta\tau$ через электронный ключ 26 проходит a импульсов от генератора счетных импульсов 24 с периодом следования

$$T_{\text{сч}} = k_2 \frac{1}{f_k}, \quad (141)$$

где f_k — частота кварцевого генератора счетных импульсов; k_2 — коэффициент деления этой частоты за счет включения в тракт прохождения счетных импульсов делителя частоты 25.

Исходя из принципа действия электронно-счетного частотомера, имеем

$$\Delta\tau = aT_{\text{сч}}, \quad (142)$$

где a — количество поступивших в счетное устройство 27 за время $\Delta\tau$ импульсов (это значение непосредственно высвечивается на световом табло).

С учетом соотношений (140) и (141) уравнение (142) может быть записано в следующем виде:

$$k_1 \frac{1}{f_M} = ak_2 \frac{1}{f_k} \quad (142a)$$

или

$$\frac{f_k}{f_M} = a \frac{k_2}{k_1}. \quad (143)$$

Выражая частоту f_k через соответствующую ей длину волны λ_k в «стандартной» атмосфере $f_k = v_0/\lambda_k$, будем иметь

$$\frac{v_0}{f_M} = a \frac{k_2}{k_1} \lambda_k. \quad (144)$$

На основе полученного соотношения запишем исходную рабочую формулу (139a) в виде

$$D = N \frac{k_2}{2k_1} \lambda_k a. \quad (145)$$

В светодальномере СГ-3 частота кварцевого генератора счетных импульсов f_k принята равной 4 682 852 Гц, для которой $\lambda_k = 64 \text{ м} = 2^6 \text{ м}$. Коэффициенты деления делителей частоты имеют значения $k_1 = 2^{10} \cdot 10^3$ и $k_2 = 2^5$.

С учетом приведенных числовых значений входящих в формулу (145) величин

$$D = 10^{-3}a \text{ (в м)} = a \text{ (в мм)}. \quad (146)$$

Таким образом, посредством соответствующего подбора частоты генератора счетных импульсов и коэффициентов деления частоты введенных в схему светодальномера СГ-3 делителей частоты удастся проградуировать примененное в дальномере счетное устройство непосредственно в единицах длины искомого расстояния. Однако при этом значение коэффициента деления k_1 содержит неизвестную величину N , которая зависит

от конкретного значения измеряемого расстояния D и которая обычно определяется в процессе разрешения неоднозначности.

С целью автоматизации процесса определения величины N в схему светодальномера СГ-3 введены такие дополнительные узлы, как вспомогательный генератор 20 (см. рис. 86) с теми же техническими характеристиками, что и задающий генератор масштабной частоты, смеситель 19 и делитель частоты 22 со ступенчатой регулировкой коэффициента деления k_1'' .

Для подбора значения k_1'' , соответствующего величине N , оператор на начальной стадии измерений фиксирует один из минимумов светового потока, соответствующий масштабной частоте в начале диапазона перестройки генератора масштабных колебаний. Затем с помощью индикаторного устройства настраивает на эту частоту вспомогательный генератор. После этого переключатель П (см. рис. 86) переводит в положение «грубо» и перестраивает дальномер на соседний по масштабной частоте минимум светового сигнала. В результате на выходе смесителя удастся выделить колебания разностной частоты $F_p = f_{m_1} - f_{m_2}$, для которой $N=1$, а рабочая формула имеет вид

$$D = \frac{v_0}{2F_p}, \quad (147)$$

или с учетом выполненных выше преобразований

$$D = \frac{k_2}{2k_1} \lambda_K a. \quad (148)$$

Поскольку в начале измерений переключатель ступенчатого делителя частоты устанавливают в положение, при котором $k_1''=1$, то значение коэффициента k_1 в приведенной выше формуле определяется величиной $k_1' = 2^{10} \cdot 10^3$. Значения входящих в формулу (148) величин k_2 и λ_K остаются при этом неизменными, т. е. $k_2 = 2^5$, а $\lambda_K = 2^6$ м. В результате $D = 10^{-3} a$ (в м) = a (в мм). Таким образом, при измерениях на разностной частоте F_p непосредственно на световом табло высвечивается полное значение искомого расстояния D , но точность таких измерений весьма низкая. Как показывают расчеты, при определении расстояний, близких к 30 км, погрешность измерений на разностной частоте F_p составляет величину, равную нескольким сотням метров.

С целью повышения точности измерений оператор последовательно настраивает дальномер на соседние минимумы светового сигнала, для которых разностная частота соответственно равна $2F_p$, $3F_p$ и т. д. При каждом таком переходе на соседний минимум оператор последовательно переключает ступенчатый делитель частоты, коэффициент деления которого k_1'' принимает соответственно значения 2, 3 и т. д. При такой методике измерений исходная рабочая формула (146) остается неизменной.

В результате проведения описанной процедуры последовательного перехода с одного минимума света на другой и соответствующего изменения коэффициента деления ступенчатого делителя частоты удастся установить такое значение коэффициента k_1'' , которое при точных измерениях на масштабной частоте f_m равно интересующей нас величине N .

Для облегчения выполнения рассмотренного процесса последовательных перестроек прибора на соседние минимумы света разработаны специальные таблицы, позволяющие по ограниченному количеству таких перестроек установить то значение коэффициента деления k_1'' ступенчатого делителя, которое соответствует величине N при выполнении точных отсчетов. Основным критерием достаточного количества переходов с одного минимума света на другой являются показания светового табло, свидетельствующие о том, что при очередном переходе с одного минимума света на другой эти показания различаются друг от друга на величину не более 3 м.

Исходя из вышеизложенного, процесс измерений светодальнономером СГ-3 складывается из таких основных этапов, как грубое определение величины искомого расстояния D , при котором в ступенчатом делителе частоты устанавливается равенство $k_1'' = N$, и точное измерение величины D , при котором в автоматическом режиме поддерживается равенство $f_m = f_{\min}$ и измеряется значение масштабной частоты f_m . Непрерывное отслеживание частоты $f_{\min}$, соответствующей минимуму наблюдаемого светового сигнала, позволяет получить на световом табло счетного устройства среднее значение искомой длины линии за интересующий нас интервал времени.

Так же как и при работе с рассмотренными ранее моделями светодальнономеров, в результаты измерений после завершения программы наблюдений вводят поправки как за уклонение реальных метеоусловий от принятых за стандартные, так и за приведение полученного значения длины линии к центрам геодезических знаков.

Краткие сведения о других типах светодальнономеров группы Г

За рубежом разработкой и совершенствованием светодальнономеров группы Г занимаются немногие фирмы, что обусловлено ограниченными потребностями в приборах такого класса со стороны геодезического производства.

На протяжении ряда лет выпускает и совершенствует такие дальнометры шведская фирма «АГА Геотроникс». Разработанные этой фирмой 8-я и 600-я модели геодиметров базируются на тех же основных технических решениях, что и светодальнонометры «Кварц» и «Гранат».

Одна из отличительных особенностей 8-й модели геодиметра состоит в том, что в ней применен твердотельный модулятор

света, основанный на использовании эффекта Поггеля и составленный из четырех последовательно расположенных кристаллов KDP.

В 600-й модели геодинметра применена удобная в эксплуатации совмещенная коаксиальная приемопередающая оптическая система, выполненная в виде своеобразной зрительной трубы, которая может свободно поворачиваться вокруг оси вращения, расположенной перпендикулярно к оптической оси этой трубы.

В США фирма «Койфель и Эссер» совместно с одной из американских фирм, специализирующихся на разработке электронной аппаратуры, создала несколько модификаций лазерных дальномеров, получивших название «Рейнджер». Две такие модификации (Рейнджер V и Рейнджмастер) предназначены для измерения линий длиной до нескольких десятков километров. Они отличаются более высоким уровнем автоматизации измерительного процесса. В частности, в дальномерах этого типа автоматизированы процессы разрешения неоднозначности и переключения светового пучка при посылке его на отражатель и по линии ОКЗ, предусмотрена возможность ручного ввода в показания дальномера различного рода поправок (таких, как метеопоправка, приборная и др.). В результате непосредственно со светового цифрового табло можно считать откорректированную величину измеренного наклонного расстояния.

По таким основным техническим характеристикам, как точность измерений и предельная дальность действия, перечисленные зарубежные дальномеры эквивалентны рассмотренным ранее отечественным светодальномерам группы Г.

§ 27. СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ ГРУППЫ Т

Среди различных типов светодальномеров, применяемых в настоящее время при измерениях длин линий на местности, светодальномеры группы Т (топографические) наиболее широко используются на различных видах топографо-геодезических работ, предусматривающих определение линий небольшой протяженности. Около 20 фирм и заводов-изготовителей различных стран мира заняты разработкой, совершенствованием и серийным выпуском светодальномеров такого типа. При этом основное внимание уделяется тому, чтобы вновь создаваемые приборы имели минимальные габариты и массу, потребляли небольшое количество электроэнергии, были просты в эксплуатации, а процессы измерений и последующих вычислений характеризовались высокой степенью автоматизации. Дальнейшее совершенствование таких автоматизированных светодальномеров открыло возможность создания электронных тахеометров, позволяющих не только производить как линейные, так и угловые измерения в автоматизированном режиме, но и оперативно непосредственно на точке стояния прибора получать на световом

табло (а иногда и регистрировать с помощью того или иного запоминающего устройства) практически все интересующие нас величины (вертикальные и горизонтальные углы, наклонную дальность, горизонтальное проложение и взаимное превышение пунктов).

Несмотря на большое разнообразие созданных к настоящему времени топографических светодальномеров, большинству из них присущ целый ряд общих признаков, характерных для дальномеров этой группы. Так, в качестве источников оптического излучения широкое распространение получили полупроводниковые излучатели, которые наряду с портативностью и энергетической экономичностью позволяют управлять интенсивностью оптического излучения за счет использования внутренней модуляции, в результате чего отпадает необходимость применения отдельных модуляторов света.

Требования портативности конструкции наложили свой отпечаток и на выбор передающей оптической системы дальмера. При создании топографических светодальномеров использованы разнообразные технические решения, но общим признаком является применение линзовых оптических систем, которые в сравнении с зеркальными системами имеют меньшие габариты и массу. При этом передающая и приемная оптические системы, как правило, конструктивно объединяются, а их оптические оси совмещаются, что создает эксплуатационные удобства при измерении коротких линий. В отдельных моделях светодальномеров предпринята попытка применить съемные оптические системы, которые в зависимости от длины измеряемой линии могут иметь различные размеры.

С целью полной автоматизации всего процесса измерения переключение светового луча в направлениях на удаленный отражатель и по линии оптического короткого замыкания производится автоматически.

В качестве фотоприемника в топографических дальмерах последних лет все шире применяют полупроводниковые фотодиоды. Они по сравнению с фотоэлектронными умножителями имеют меньшие размеры и не требуют для питания высоких электрических напряжений.

Наибольший прогресс в современных топографических светодальномерах достигнут при разработке фазоизмерительных устройств, в качестве которых широкое распространение получили электронные цифровые фазометры. В последние годы в дальмерах широко применяют микропроцессоры. При их использовании открылась возможность не только оперативно измерять интересующие нас малые временные интервалы (или эквивалентные им разности фаз), но и выполнять все необходимые вычисления, связанные с получением окончательного значения искомой длины линии, вводить в него поправки. Кроме того, появилась возможность выдавать сигналы управления для авто-

матической коммутации тех или иных электрических цепей, что позволяет существенно сократить количество различных переключателей, управление которыми осуществляется, как правило, вручную.

Среди светодалномеров группы Т в нашей стране наибольшее распространение получили отечественные светодалномеры типа 2СМ-2, СМ-5 и «Блеск» СТ 5, а также светодалномер ЕОК 2000, разработанный фирмой «Карл Цейс Йена» (ГДР). Рассмотрим особенности работы этих далномеров.

Светодалномер 2СМ-2

Разработанный отечественной промышленностью в начале 70-х годов светодалномер 2СМ-2 нашел широкое применение в топографическом производстве при выполнении линейных измерений на местности. Диапазон измеряемых светодалномером длин линий от 2 м до 2 км. Средняя квадратическая погрешность измерений ± 2 см. Светодалномер 2СМ-2 (рис. 88) выполнен в виде двух конструктивно разделенных блоков: закрепляемого на штативе приемопередатчика и устанавливаемого рядом со штативом электронного блока. Масса приемопередатчика 5,5 кг, а электронного блока — 7 кг. Потребляемая далномером мощность около 20 Вт.

Упрощенная функциональная схема светодалномера приведена на рис. 89. Анализ этой схемы свидетельствует о том, что далномер базируется на использовании низкочастотного метода фазовых измерений.

Источником оптического излучения служит люминесцентный арсенид-галлиевый светодиод 1, работающий в ближней инфракрасной области оптического спектра (длина волны — около 0,9 мкм). Режим работы излучателя — непрерывный. Светодиод одновременно выполняет и функции модулятора. Через него наряду с постоянным током пропускают высокочастотный ток, частота которого соответствует частоте масштабных колебаний.

Возбуждение высокочастотных колебаний осуществляется в термостатированном генераторе масштабной частоты, имеющем кварцевую стабилизацию. Для обеспечения необходимой точности линейных измерений и градуировки отсчетного устройства непосредственно в единицах длины в далномере выбрана основная масштабная частота $f_{мз}$, равная 14,985 МГц, что при принятой для данного типа далномера скорости света в стандартных метеоусловиях, равной 299 700 км/с, соответствует длине волны масштабных колебаний, равной 20 м (или $\lambda/2 = 10$ м).

Применительно к светодалномеру 2СМ-2 расстояния можно вычислять (без учета приборных поправок и поправок за внешние условия) по формуле (22). Поскольку для светодалномера 2СМ-2 $\lambda/2 = 10$ м, то коэффициент N соответствует целому числу отрез-

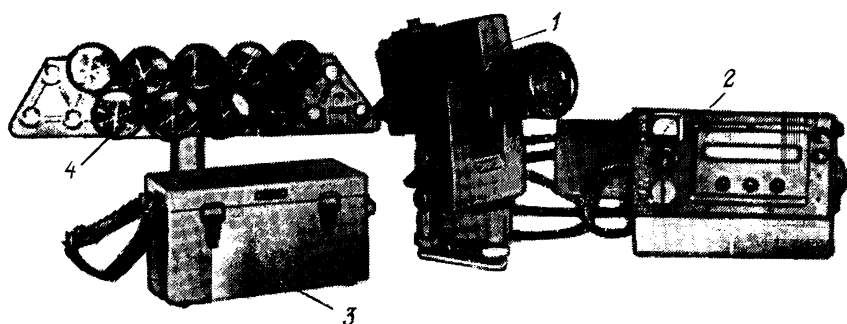


Рис. 88. Светодальномер 2СМ-2

1 — приемопередатчик; 2 — электронный блок; 3 — блок источников питания; 4 — отражатель

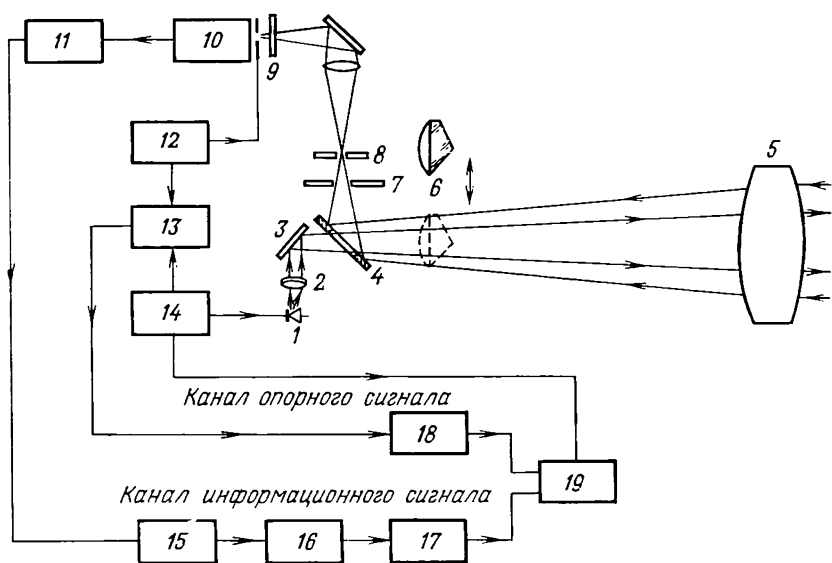


Рис. 89. Упрощенная функциональная схема светодальномера 2СМ-2

ков длиной 10 м, укладываемых в измеряемом расстоянии, а коэффициент ΔN — дробной части этого отрезка, которая дополняет целое число уложений отрезков $\lambda/2$ до величины измеряемого расстояния D . Длина волны масштабных колебаний λ вычисляется для «стандартных» метеоусловий, которые для светодальномера 2СМ-2 выбраны равными: $t_0 = -10^\circ\text{C}$, $p_0 =$

$= 102,5$ кПа (или 768,8 мм рт. ст.). Влиянием влажности для условий работы светодальномера 2СМ-2 пренебрегают.

Для разрешения неоднозначности, т. е. для нахождения значения N , в дальномере предусмотрены две вспомогательные масштабные частоты с номинальными значениями в 100 и 10 раз меньше, чем основная масштабная частота ($f_{m_1} = 149,85$ кГц, $f_{m_2} = 1498,5$ кГц).

Такая, кратная десяти, сетка масштабных частот позволяет вычислить величину N из соотношения

$$N = 10m_1 + m_2, \quad (149)$$

где m_1 и m_2 — цифры, соответствующие старшим разрядам в отсчетах, получаемых на вспомогательных масштабных частотах f_{m_1} и f_{m_2} .

При использовании в дальномере электронного цифрового фазометра и линии ОКЗ значение ΔN связано с отсчетами, снимаемыми со светового цифрового табло на основной масштабной частоте f_{m_3} , соотношением

$$\Delta N = \frac{F}{f_{сч}} (a - a_0), \quad (150)$$

где F — частота фазосравниваемых сигналов; $f_{сч}$ — частота счетных импульсов; a — отсчет, снимаемый с табло при посылке света на отражатель; a_0 — отсчет, снимаемый с табло при посылке света по линии ОКЗ.

В светодальномере 2СМ-2 частота F выбрана равной 14 985 Гц, а частота $f_{сч}$ — 14,985 МГц. С учетом этого

$$\Delta N = (a - a_0) 10^{-3}. \quad (150a)$$

Приняв во внимание соотношения (149) и (150a), формулу (22) можно записать в следующем виде:

$$D = [100m_1 + 10m_2 + (a - a_0) 10^{-2}]. \quad (151)$$

Следовательно, для получения полного значения D необходимо в отсчетах на двух вспомогательных масштабных частотах f_{m_1} и f_{m_2} учесть цифры старшего разряда, которые характеризуют соответственно число 100- и 10-метровых отрезков, укладываемых в измеряемом расстоянии, а на основной масштабной частоте f_{m_3} определить разность отсчетов, получаемых при посылке света на дистанцию и по линии ОКЗ. Если длина измеряемой линии превышает 1 км, то цифра, соответствующая целому числу километров, определяется из приближенного значения величины искомой длины линии.

Как показано на рис. 89, передающая и приемная оптические системы дальномера 2СМ-2 соосно совмещены, причем основным компонентом такой объединенной оптической системы является общий трехлинзовый объектив 5.

В передающем оптическом тракте модулированное излучение инфракрасного диапазона от светодиода 1 попадает на линзу 2, предназначенную для уменьшения расходимости светового потока и для ослабления влияния фазовой неоднородности светового пучка на результаты измерений. Далее пучок попадает на полупрозрачную пластину 3, установленную под углом в 45° к оптической оси объектива. Нанесенное на эту пластину покрытие отражает инфракрасное излучение светодиода, но пропускает без значительного ослабления лучи видимой части спектра. Необходимость использования такого покрытия обусловлена тем, что в дальномере предусмотрена возможность через линзовый объектив 5 с помощью визирной системы (не показанной на схеме) контролировать положение отражателя в течение всего процесса измерений. При этом визирная система расположена на оптической оси объектива, а излучающая система — под углом в 90° . Полупрозрачная пластина позволяет осуществить разделение этих каналов.

После изменения хода лучей на 90° излучаемый модулированный сигнал проходит через центральное отверстие кольцеобразного зеркала 4, коллимируется с помощью линзового объектива 5 и посылается в направлении удаленного отражателя.

Пройдя искомое расстояние до отражателя и обратно, световой пучок снова попадает на линзовый объектив 5, который фокусирует этот пучок в плоскости полевой диафрагмы 8. Зеркало с центральным отверстием своей периферийной частью изменяет направление хода лучей на 90° . На пути прохождения принимаемого оптического сигнала установлена клиновидная щелевая диафрагма 7, выполняющая роль серого клина. С помощью диафрагмы можно перекрывать часть светового потока и поддерживать тем самым постоянную величину сигнала на входе фотоэлектронного умножителя 10 при измерении линий различной протяженности. Полевая диафрагма 8 и интерференционный светофильтр 9 выполняют такую же роль, как и в светодальномере «Кварц», т. е. производят пространственную и спектральную селекцию. Пространственная селекция ограничивает величину поля зрения до размеров изображения отражателя, устраняя при этом влияние засветки фона. Спектральная селекция повышает отношение сигнала к помехе, создавая благоприятные условия прохождения для спектра полезного сигнала и ослабляя помеху, спектр которой лежит за пределами полосы пропускания интерференционного фильтра.

В фотоэлектронном умножителе 10 принимаемый световой сигнал преобразуется в электрический. Так же как в светодальномерах группы Г «Кварц» и «Гранат», ФЭУ в приборе выполняет несколько функций. Наряду с преобразованием оптического сигнала в электрический он используется также и для гетеродинирования, т. е. для смещения колебаний масштабной частоты с подаваемыми от гетеродина 12 электрическими колеба-

ниями вспомогательной частоты, выделения колебаний разностной частоты и усиления последних.

Номинальное значение разностной частоты F выбрано равным 14 985 Гц, т. е. в 1000 раз меньше, чем основная масштабная частота. Такое соотношение частот позволяет использовать масштабные колебания для формирования квантующих (счетных) импульсов, которые необходимы для работы электронного цифрового фазометра.

Снимаемые с выхода ФЭУ преобразованные низкочастотные информационные сигналы усиливаются как согласующим усилителем 11, который необходим для согласования высокоомного выхода фотоумножителя со сравнительно низкоомными входами последующих электрических узлов, так и усилителем низкой частоты 15 (см. рис. 89). К выходу последнего подключена схема установки начальных отсчетов 16, которая позволяет на каждой из масштабных частот вводить регулируемую фазовую задержку. В результате появляется возможность «обнулять» отсчеты, снимаемые с табло фазометра при работе по линии ОКЗ, что упрощает процедуру получения разностных отсчетов при последовательных измерениях на удаленный отражатель и по линии ОКЗ.

С помощью узкополосного фильтра-формирователя 17 удастся существенно очистить информационный сигнал от различного рода шумов и помех, частотный спектр которых лежит за пределами полосы пропускания узкополосного фильтра, а также сформировать последовательность прямоугольных импульсов, поступающих на один из входов счетного блока 19.

Для формирования опорного электрического сигнала в схеме светодаляномера 2СМ-2 предусмотрен специальный смесительный каскад 13, на два входа которого подаются сигналы от генератора масштабной частоты 14 и от генератора вспомогательной частоты (гетеродина) 12. На выходе этого смесителя выделяются колебания разностной частоты, равной 14 985 Гц, т. е. такой же, как и частота информационных низкочастотных сигналов. Гармонические опорные колебания поступают в формирователь импульсов 18, а затем в виде последовательности прямоугольных импульсов — на вход счетного блока 19.

Интервал времени между каждым опорным и следующим за ним информационным импульсами пропорционален величине измеряемой дистанции. Длительность этого интервала измеряется цифровым фазометром, составляющим основу счетного блока 19. Отсчетным устройством в фазометре служит шестизначное световое табло, составленное из полупроводниковых цифровых индикаторов. Для уменьшения ошибок измерений случайного характера высвечиваемое на световом табло значение искомой длины линии представляет собой результат осреднения не менее чем по 100 парам импульсов. Каждая пара соответствует одному периоду сравниваемых сигналов.

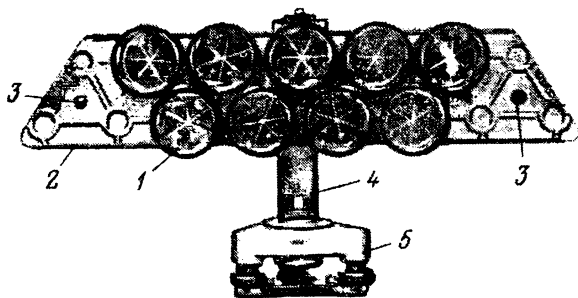


Рис. 90. Трипельпризменный отражатель светодальномера 2СМ-2:

1 — призма отражателя; 2 — плата для крепления блоков из трех призм; 3 — винты для крепления добавочных блоков; 4 — круглый уровень; 5 — подставка

Оптическое короткое замыкание реализовано в дальномере в виде устройства, состоящего из трипельпризмы и положительной линзы 6 (см. рис. 89). При введении такого устройства в оптический тракт излучаемый светодиодом световой поток отражается на выходе из кольцеобразного зеркала в обратном направлении, проходя от устройства ОКЗ до входа в ФЭУ тот же путь, что и сигнал, принимаемый от удаленного отражателя. Фокусное расстояние положительной линзы подобрано так, чтобы лучи сходились в той же точке, что и при работе с линзовым объективом, т. е. в плоскости полевой диафрагмы.

В качестве отражающего устройства (рис. 90), устанавливаемого на удаленном конце линии, используется закрепленный на плате набор трипельпризм, число которых на предельных дальностях может достигать до 15. Отражатель имеет форму вытянутой по горизонтали трапеции. Такая форма выбрана исходя из того, что излучающая поверхность светодиода, а следовательно, и поперечное сечение излучаемого светового пучка также растянуто в горизонтальной плоскости.

Процесс измерений длин линий светодальномером 2СМ-2 включает в себя такие основные этапы, как последовательное измерение на трех автоматически переключаемых масштабных частотах с попеременной посылкой света на удаленный отражатель и по линии ОКЗ. Это позволяет непосредственно с табло считать полное значение искомой длины линии, а также дополнительных измерений на основной масштабной частоте для уточнения последних цифр величины измеряемого расстояния.

Поскольку используемые при определении длины линии результаты измерений базируются на разностных отсчетах, получаемых при посылке света на отражатель и по линии ОКЗ, то для упрощения методики получения окончательного результата

показания фазометра, соответствующие прохождению света по ОКЗ, перед началом измерений устанавливаются близкими к нулю с помощью фазорегулирующего устройства. При этом на вспомогательных масштабных частотах такое «обнуление» производится с максимально достижимой точностью, а на основной масштабной частоте отсчет при посылке света по ОКЗ устанавливается равным не нулю, а около 0100 (или в линейной мере — примерно 10 см). Это сделано для того, чтобы регистрируемые в процессе измерения линии отсчеты по ОКЗ не переходили через нуль, так как могут возникнуть затруднения при вычислении верных значений разностных отсчетов.

Отсчеты с табло на основной масштабной частоте снимают с точностью до миллиметров и округляют измеренное значение длины до сантиметров.

С целью уменьшения влияния различных источников ошибок в дальномере использована методика многократных отсчетов. Так, для уменьшения ошибок, обусловленных «фазовостью» светового пучка, процесс измерений предусматривает многократное взятие отсчетов при нескольких наведениях дальномера на отражатель.

Ослабление влияния «циклической» ошибки, физический смысл которой раскрыт в гл. IV, достигается посредством введения соответствующей поправки, которая в виде графической зависимости от отсчета, снимаемого с табло, приводится в эксплуатационной документации, прилагаемой к дальномеру.

Светодальномер СМ-5

Топографический светодальномер СМ-5 (рис. 91), разработанный и серийно выпускаемый отечественной промышленностью, предназначен для измерения на местности длин линий небольшой протяженности. Диапазон измеряемых расстояний от 2 до 500 м. Средняя квадратическая погрешность измерений ± 3 см.

Дальномер имеет небольшие габариты и массу, причем оптический блок конструктивно объединен с электронным. Дальномер приспособлен как для установки на штатив (для чего используется подставка), так и сверху на теодолит серии 2Т.

Масса приемопередатчика с подставкой 5,5 кг. Дальномер питается от аккумуляторной батареи. Потребляемая мощность не более 5 Вт.

Одна из характерных особенностей дальномера состоит в том, что в нем использован импульсно-фазовый гетеродинный метод измерения расстояний, основанный на дальнейшем развитии фазового метода с применением отдельных узлов, работающих в импульсном режиме.

Применительно к светодальномеру СМ-5 схема импульсно-фазового гетеродинного дальномера (см. рис. 15) несколько видоизменена. Это обусловлено стремлением исключить необходи-

мость применения гетеродина для формирования опорного сигнала при низкочастотном фазовом (или импульсно-фазовом) методе дальномерных измерений. Такая возможность открывается при использовании системы фазовой автоподстройки (ФАП), позволяющей непрерывно синхронизировать фазу гетеродина с фазой генератора масштабной частоты. Для пояснения сущности этих изменений проанализируем особенности работы схемы, приведенной на рис. 92. Это упрощенная схема дальномера, основанная на использовании низкочастотного метода. Особенность схемы состоит в том, что в ней отсутствует смесительный каскад в тракте прохождения опорного сигнала.

Гармонические колебания, возбуждаемые генератором масштабной частоты 1, так же как и в других схемах дальномеров, поступают в передатчик 2, с помощью которого информационный сигнал излучается в направлении на удаленный отражатель. После отражения сигнал попадает в приемное устройство 3 дальномера. Если текущую фазу гармонических колебаний на входе в передатчик представить в виде $\psi_m = \omega_m t - \varphi_{m0}$, то после прохождения измеряемого расстояния в прямом и обратном направлениях она будет определяться выражением

$$\psi_m' = \omega_m (t - \tau) - \varphi_{m0}, \quad (152)$$

где $\tau = 2D/v$ — время, на которое запаздывает информационный сигнал относительно опорного из-за прохождения расстояния $2D$.

Если на смесительный каскад 4, включенный на выходе приемника, подать гармонические колебания от гетеродина 7 с текущей фазой $\psi_r = \omega_r t - \varphi_{r0}$, то пренебрегая задержками в смесительном каскаде, для текущей фазы колебаний разностной частоты на выходе смесителя при $f_m > f_r$ можно записать

$$\psi_\Omega = \psi_m' - \psi_r = \Omega t - \omega_m \tau - (\varphi_{m0} - \varphi_{r0}), \quad (153)$$

где $\Omega = \omega_m - \omega_r$.

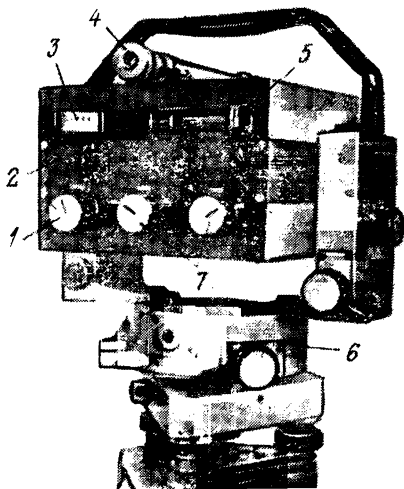


Рис. 91. Светодальномер СМ-5:

1 — ручка регулировки уровня сигнала; 2 — панель управления; 3 — контрольный прибор; 4 — зрительная труба; 5 — световое табло; 6 — основание дальномера; 7 — переключатели режимов работы

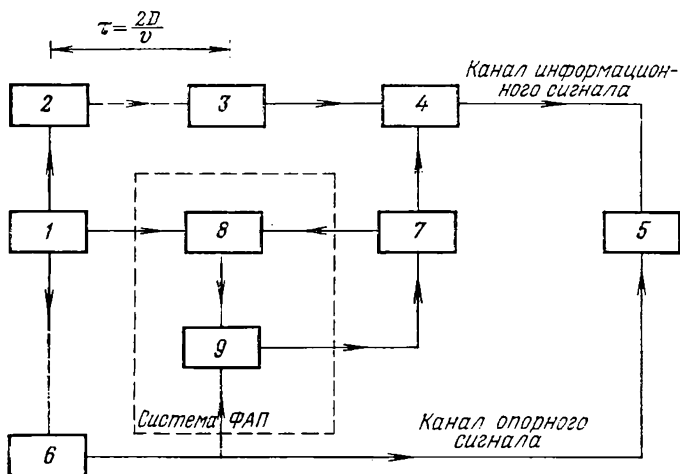


Рис. 92. Упрощенная схема дальномера с использованием несимметричного низкочастотного метода

При выводе аналогичного соотношения для опорного сигнала заметим, что в данной схеме масштабная и разностная частоты, обозначенные соответственно через ω_m и Ω , выбраны так, что они различаются друг от друга в целое число раз, обычно кратное десяти. Обозначим это соотношение через n :

$$n = \omega_m / \Omega, \quad (154)$$

и введем в схему дальномера делитель частоты 6 (см. рис. 92) с коэффициентом деления, равным n . Тогда текущая фаза низкочастотных колебаний на выходе делителя частоты будет определяться выражением

$$\psi_{\Omega}' = \frac{\omega_m}{n} t - \frac{\varphi_{m_0}}{n} = \Omega t - \varphi_{\Omega_0}, \quad (155)$$

где $\varphi_{\Omega_0} = \varphi_{m_0}/n$ — начальная фаза колебаний на выходе делителя частоты.

Для синхронизации фазы колебаний гетеродина подадим колебания от генератора масштабной частоты и от гетеродина на смеситель 8 (см. рис. 92) фазовой автоподстройки (ФАП). Выделяемые на выходе этого смесителя колебания разностной частоты будут при этом иметь текущую фазу, определяемую выражением

$$\psi_{\Omega}'' = \psi_m - \psi_{\Gamma} = \Omega t - (\varphi_{m_0} - \varphi_{\Gamma_0}). \quad (156)$$

Если данные колебания совместно с колебаниями, возникающими на выходе делителя частоты, подать на фазовый детектор 9, входящий в систему ФАП, то на выходе этого детектора представляется возможным выделить сигнал, величина которо-

го зависит от соотношения текущих фаз сигналов, поступающих на два входа в этот детектор:

$$U_{\text{ФД}} = k(\psi_{\Omega}' - \psi_{\Omega}''), \quad (157)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

При воздействии этого сигнала на гетеродин фаза колебаний последнего будет изменяться до тех пор, пока в результате действия цепи обратной связи сигнал $U_{\text{ФД}}$ не оказывается равным нулю.

При этом $\psi_{\Omega}' - \psi_{\Omega}'' = 0$. Откуда

$$\varphi_{\Gamma_0} = \varphi_{M_0} - \varphi_{\Omega_0} = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \varphi_{M_0}. \quad (158)$$

Следовательно, в результате работы системы ФАП начальная фаза колебаний гетеродина оказывается жестко связанной с начальной фазой колебаний масштабной частоты. Если с помощью фазометра 5 (см. рис. 92) измерить разность фаз между информационным и опорным сигналами (причем в качестве последнего использовать масштабные колебания, частота которых поделена на n), то значение этой разности будет определяться формулой

$$\Delta\varphi = \psi_{\Omega}' - \psi_{\Omega} = \omega_M \tau + \varphi_{M_0} - \varphi_{\Omega_0} - \varphi_{\Gamma_0}, \quad (159)$$

или с учетом соотношения (158):

$$\Delta\varphi = \omega_M \tau = \omega_M \frac{2D}{v}. \quad (159a)$$

Полученная формула свидетельствует о том, что в рассмотренной схеме измеряемая фазометром разность фаз $\Delta\varphi$ пропорциональна величине искомого расстояния D и не зависит от значений начальных фаз колебаний масштабной частоты и гетеродина (за исключением фазовых задержек в отдельных блоках этой схемы, влиянием которых мы пренебрегли). Иначе говоря, выполняются те же условия, что и в наиболее распространенных схемах дальномеров, основанных на использовании низкочастотного метода фазовых измерений, где с помощью гетеродина и смесителей одновременно преобразуется частота как информационного, так и опорного сигналов. Один из недостатков схемы, изображенной на рис. 92, состоит в том, что точность фазовых измерений зависит от точности синхронизации фазы гетеродина, которая производится с помощью системы ФАП.

С учетом вышеизложенного проанализируем особенности работы светодальномера СМ-5, упрощенная функциональная схема которого приведена на рис. 93.

В качестве источника оптического излучения в дальномере применен полупроводниковый арсенид-галлиевый светодиод 1, работающий в импульсном режиме. Длина волны излучения около 0,91 мкм, т. е. дальномер (как и 2СМ-2) работает в ближ-

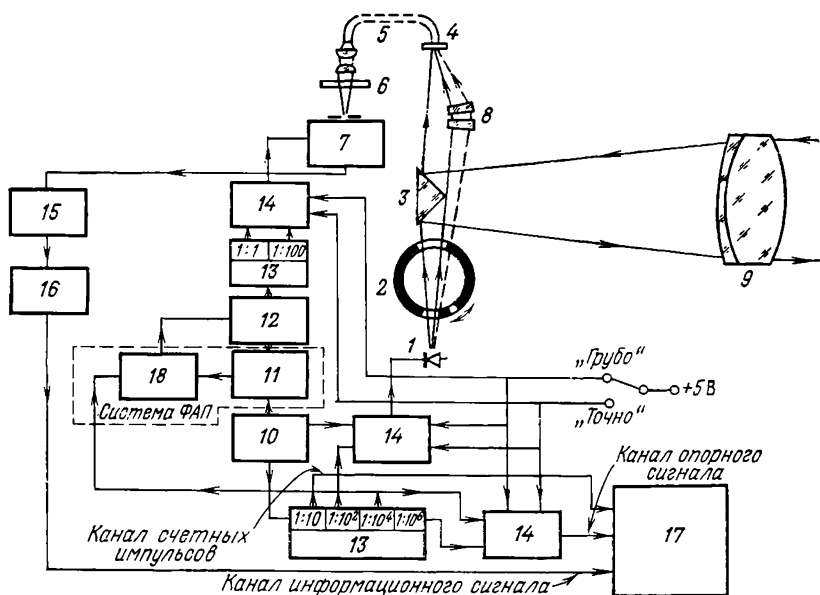


Рис. 93. Упрощенная функциональная схема светодальномера СМ-5:

1 — светодиод (излучатель); 2 — переключаемая диафрагма; 3 — разделительная призма; 4 — полевая диафрагма; 5 — световод; 6 — интерференционный фильтр; 7 — ФЭУ (фотоприемник); 8 — поворотная призма; 9 — линзовый объектив; 10 — генератор масштабной частоты; 11 — смеситель; 12 — вспомогательный генератор; 13 — делители частоты; 14 — коммутатор; 15 — усилитель с фильтром низкой частоты; 16 — формирователь импульсов; 17 — счетный блок; 18 — фазовый детектор

ней инфракрасной области оптического спектра. Модулирующие колебания возбуждаются в генераторе масштабной частоты 10, номинальное значение которой выбрано равным 14,9855 МГц, что для принятых стандартных метеоусловий соответствует половинному значению длины волны, равному 10 м. Для разрешения неоднозначности предусмотрена дополнительная масштабная частота, которая равна 149,855 кГц, т. е. точно в 100 раз меньше, чем основная. Формирование этих колебаний осуществляется с помощью делителя частоты 13 с коэффициентом деления, равным 100. На вход последнего поступают колебания основной масштабной частоты. Модулирующие колебания подаются на светодиод через коммутатор 14, который по сигналу управления пропускает через себя колебания основной или дополнительной масштабной частоты. Управление этим коммутатором осуществляется с помощью специального переключателя «Грубо» — «Точно», выведенного на панель управления.

Преобразование гармонических колебаний в импульсные на основной масштабной частоте производится непосредственно в излучателе за счет соответствующего выбора рабочей точки на модуляционной характеристике, а на дополнительной масштаб-

ной частоте — на выходе делителя частоты. Длительность излучаемых импульсов около 15 нс, что соответствует примерно четверти периода основных масштабных колебаний.

В дальномере применена совмещенная линзовая оптическая система 9. Разделение передающего и приемного оптических каналов осуществляется с помощью специальной разделительной призмы 3.

При передаче информационного сигнала в направлении на удаленный отражатель световой поток проходит через отверстие в переключаемой диафрагме 2, отражается от нижней грани разделительной призмы 3 и попадает на линзовый объектив 9, с помощью которого формируется в параллельный пучок и направляется на отражатель, установленный на другом конце измеряемой линии.

Используемый в светодальномере СМ-5 отражатель состоит из трех вертикально расположенных трипельпризм. Отраженный от него световой поток также попадает на линзовый объектив 9 и после отражения от верхней грани разделительной призмы 3 фокусируется в плоскости полевой диафрагмы 4. На выходе последней размещен торцевой вход световода 5, при прохождении через который свет фокусируется дополнительным объективом на фотокатode ФЭУ. Для осуществления спектральной селекции перед фотоумножителем 7 помещен интерференционный светофильтр 6.

Так же как и в других типах светодальномеров, фотоумножитель 7 в светодальномере СМ-5 выполняет не только роль преобразователя оптических сигналов в электрические, но и служит своеобразной схемой совпадения, с помощью которой осуществляется гетеродинирование импульсных сигналов. С этой целью на фотокатод ФЭУ через делитель частоты 13 и коммутатор 14 поступают электрические сигналы вспомогательной частоты от гетеродина 12. Частота гетеродина ниже основной масштабной частоты на 1498,55 Гц, т. е. на 0,01%.

При работе в режиме «Точно», т. е. на основной масштабной частоте, частота гетеродина 12 не подвергается делению, в результате чего на выходе фотоумножителя выделяются электрические сигналы разностной частоты, которая равна 1498,55 Гц.

Из-за небольшой скважности импульсных сигналов, под которой понимают отношение периода повторения импульсов к их длительности, форма преобразованных низкочастотных сигналов на выходе ФЭУ оказывается близкой к треугольной. В связи с этим указанные сигналы подвергаются дополнительному формированию в остроконечные импульсы с помощью формирователя импульсов 16 (см. рис. 93). Предварительно сигналы, снимаемые с ФЭУ, пропускают через фильтр нижних частот 15, что позволяет уменьшить уровень шумов, которые накладываются на полезный информационный сигнал при прохождении последнего через атмосферу и через фотоумножитель.

С выхода формирователя импульсов информационные сигналы совместно с опорными сигналами поступают в счетный блок 17, во входных узлах которого из них формируется сигнал, имеющий длительность Δt_0 .

Опорные сигналы в схеме светодальномера СМ-5 формируются из гармонических колебаний основной масштабной частоты посредством деления последней на 10 000, т. е. используется принцип формирования опорного сигнала, основанный на делении частоты масштабных колебаний. В результате такого деления частота повторения опорных сигналов оказывается равной 1498,55 Гц, т. е. совпадает с частотой повторения информационных импульсов, поступающих в счетный блок со стороны фотомножителя.

Так как в режимах «Точно» и «Грубо», т. е. при работе на основной и дополнительной масштабных частотах, частота повторения опорных импульсов различна, то опорные сигналы перед подачей в счетный блок проходят через коммутатор, управление которым осуществляется переключателем «Грубо» — «Точно».

В связи с применением несимметричного низкочастотного метода, при котором из тракта прохождения опорного сигнала исключается смеситель (или эквивалентная этому каскаду схема совпадения), в схеме светодальномера СМ-5 предусмотрена система ФАП, предназначенная для синхронизации фазы гетеродина 12 и состоящая из фазового детектора 18 и смесителя 11.

Формирование счетных импульсов, так же как и опорных, осуществляется из масштабных колебаний посредством деления на 10 основной масштабной частоты. При этом частота повторения счетных импульсов оказывается равной 1498,55 кГц. Разрешающая способность счетчика q может быть подсчитана по формуле

$$q = \frac{T_{\Omega}}{T_{\text{сч}}} = \frac{f_{\text{сч}}}{F}, \quad (160)$$

где T_{Ω} и F — период и соответствующая ему частота повторения информационных и опорных импульсов, поступающих в счетный блок; $T_{\text{сч}}$ и $f_{\text{сч}}$ — период и соответствующая ему частота счетных (квантующих) импульсов.

Для светодальномера СМ-5 при работе на основной масштабной частоте $f_{\text{сч}} = 1\,498\,550$ Гц, $F = 1498,55$ Гц. При этом $q = 1000$, т. е. счетчик позволяет измерять запаздывание информационного сигнала относительно опорного с точностью до одной тысячной доли периода масштабных колебаний, что в единицах длины соответствует 1 см. Практически на световом табло в режиме «Точно» высвечиваются четыре цифры, соответствующие метрам, дециметрам, сантиметрам и миллиметрам. Последний младший разряд является результатом осреднения от-

счетов при работе по многим парам информационных и опорных импульсов. Он используется в основном для правильного округления измеренного значения расстояния с точностью до единиц сантиметров.

Для получения предварительных цифр в значении искомого расстояния производят измерения в режиме «Грубо». При этом на светодиод через коммутатор подают модулирующие сигналы с делителя частоты, имеющего коэффициент деления $1 : 100$, в результате чего частота следования таких сигналов оказывается равной $149,855$ кГц, что соответствует половинному значению длины волны модуляции, равному 1000 м.

Частота гетеродинных колебаний, поступающих на фотокатод ФЭУ, также подвергается при этом делению на 100 , вследствие чего низкочастотные информационные сигналы на выходе ФЭУ имеют частоту повторения, равную $14,98$ Гц. Для того чтобы аналогичную частоту имели и опорные сигналы, последние снимают с выхода делителя частоты 13 (см. рис. 93), имеющего коэффициент деления 10^6 .

Следствием изменений частот является 100 -кратное увеличение периода следования информационного и опорного сигналов, поступающих в счетный блок. Поскольку частота повторения счетных импульсов при этом не изменяется, то при таком соотношении периодов повторения T_a и $T_{сч}$ величина $q = 100\,000$, т. е. в режиме «Грубо» вся отсчетная шкала дальномера, эквивалентная в линейной мере 1000 м, оказывается разбитой с помощью счетных импульсов на $100\,000$ делений. В светодальномере СМ-5 в данном режиме используется пятиразрядный электронный счетчик, позволяющий зарегистрировать в режиме «Грубо» однозначную величину измеряемого расстояния в пределах до 1 км с разрешающей способностью 1 см.

Для исключения влияния временных задержек, обусловленных прохождением информационного и опорного сигналов по электрическим цепям прибора, в светодальномере СМ-5 (как и в других типах светодальномеров) предусмотрена линия оптического короткого замыкания (ОКЗ). При работе в режиме ОКЗ переключаемая с помощью электромагнитного устройства диафрагма 2 поворачивается на заданный угол, в результате чего световой поток от излучателя проходит через дополнительное отверстие в этой диафрагме непосредственно в приемное устройство дальномера, минуя разделительную призму 3. Поворот переключаемой диафрагмы осуществляется в дальномере автоматически по команде, поступающей из программного устройства счетного блока в те моменты времени, когда завершается счет присылке световых сигналов на удаленный отражатель. При этом используемый в дальномере счетный узел 17 позволяет непосредственно на световом табло получить разность отсчетов $D_{дист} - D_{окз}$ как в режиме «Точно», так и в режиме «Грубо».

Методика работы с дальнометром в полевых условиях включает в себя как выполнение общепринятых подготовительных работ, связанных с установкой, наведением и контролем правильности функционирования отдельных узлов, так и проведение комплекса операций, непосредственно относящихся к определению искомой длины линии.

К специфическим особенностям работы со светодальнометром СМ-5 следует отнести такую процедуру, как взятие контрольного отсчета перед началом процесса измерений. С этой целью на объектив приемопередатчика одевается специальное отражающее устройство. При работе с таким устройством на световом табло в режиме «Точно» высвечивается значение контрольного отсчета, который однозначно связан с величиной приборной поправки. Наблюдаемое значение должно с точностью до ± 5 мм соответствовать паспортному значению этого отсчета. Если наблюдаемая величина выходит за отмеченные выше допуски, то вращением находящейся на панели управления ручки установки контрольного отсчета устанавливается предписанное значение этого отсчета. Такой технический прием позволяет на каждом пункте контролировать, а в случае необходимости и корректировать величину приборной поправки, которая вводится в показания фазометра и поэтому при окончательной обработке результатов измерений не учитывается.

Так же как и в светодальнометре 2СМ-2, отсчет, снимаемый с табло рассматриваемого дальнометра, является результатом осреднения большого количества пар информационных и опорных импульсов. Указанный режим позволяет не только уменьшить величину случайных ошибок измерений, но и открывает возможность работы дальнометра в условиях кратковременных исчезновений принимаемого от отражателя светового потока.

Принцип действия электронного цифрового фазометра позволяет легко реализовать такую возможность. Она базируется на том, что пропадание в отдельные периоды информационных сигналов может быть использовано для исключения возможности счета в такие моменты времени (например, если стартовые сигналы формируются из информационных импульсов, то при отсутствии последних вход счетчика открываться не будет). При этом в фазометре процесс накопления отсчетов, соответствующих отдельным периодам, будет продолжаться до тех пор, пока не наберется заданное число таких отсчетов.

В результате расширяются эксплуатационные возможности дальнометра, позволяющие выполнять измерения в условиях пересечения луча какими-либо движущимися объектами, а также при сильных флуктуациях принимаемых сигналов, обусловленных влиянием атмосферы. Однако время измерительного процесса при этом увеличивается. При затяжных исчезновениях сигналов повышается опасность ложных срабатываний ключевых схем под воздействием тех или иных помех. Поэтому при

значительном увеличении времени измерительного цикла рекомендуется делать повторные измерения. Применительно к светодальномеру СМ-5 такие повторения делают в тех случаях, когда счет производился более 5 с.

В обычных условиях процесс определения искомой длины линии светодальномером СМ-5 включает в себя взятие по световому табло одного-двух отсчетов в режиме «Грубо», серии отсчетов в режиме «Точно», вычисление среднего арифметического значения из этой серии, сопоставление грубых и точных отсчетов. В результате получаем значение измеряемого расстояния с введением необходимых поправок и редуцированием на соответствующую отсчетную поверхность. Поскольку в светодальномере СМ-5 (как и в светодальномерах СТ 5 и ЕОК 2000) кварцевый генератор масштабной частоты не термостатирован, то в результаты измерений вводится дополнительная поправка, учитывающая температурные изменения частоты генератора.

Для уменьшения погрешности измерений, обусловленной «фазовостью» светового пучка, рекомендуется при каждом измерении линии производить три независимых наведения на удаленный отражатель. При каждом таком наведении со светового табло в режиме «Точно» снимают три отсчета. Таким образом, используемое при дальнейшей обработке арифметическое значение представляет собой результат осреднения девяти точных отсчетов.

Разрешение неоднозначности производят по той же методике, что и в светодальномере «Гранат», т. е. посредством записи грубых отсчетов над точными с соответствующим смещением разрядов, из которых состоят эти отсчеты. Для иллюстрации приведем такую запись:

$$\begin{array}{r} D_{\text{грубо}} = 25347 \\ \Delta D_{\text{точно}} = \quad 3623 \text{ (среднее арифметическое значение)} \\ \hline D_{\text{полн}} = 253623 \text{ мм} = 253,623 \text{ м.} \end{array}$$

Из приведенного примера следует, что в перекрывающихся разрядах цифрам, полученным при работе в режиме «Точно», отдается предпочтение, как наиболее достоверным.

Светодальномер «Блеск» СТ 5

Отечественный светодальномер СТ 5 (рис. 94), получивший условное название «Блеск», является дальнейшей модернизацией светодальномера СМ-5. Он, так же как и СМ-5, базируется на использовании импульсно-фазового гетеродинного метода измерения дальностей и применении способа формирования опорного сигнала, основанного на делении масштабной частоты и синхронизации фазы гетеродина с помощью системы ФАП.

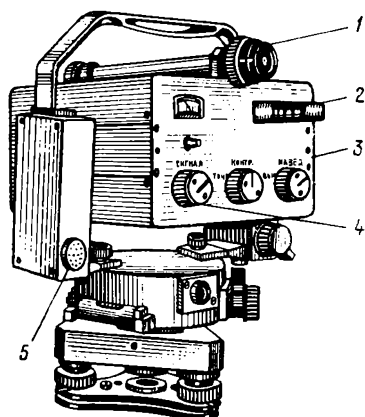


Рис. 94. Светодальномер «Блеск» СТ 5:

1 — зрительная труба; 2 — цифровое табло; 3 — панель управления; 4 — ручка регулировки уровня сигнала; 5 — микрофон

Электронная и оптическая схемы дальномеров СТ 5 и СМ-5 имеют непринципиальные различия, в связи с чем рассмотрим лишь основные отличительные особенности светодальномера СТ 5, касающиеся как эксплуатационных характеристик прибора, так и отдельных технических решений.

Сравнение таких основных показателей дальномера, как дальность действия и точность измерений, свидетельствует о том, что светодальномер СТ 5 существенно отличается от дальномера СМ-5 в лучшую сторону. Значительное увеличение предельной дальности действия с 500 м (для СМ-5) до 5 км (для СТ 5) достигнуто прежде всего

за счет использования в качестве излучателя полупроводникового светодиода, работающего в лазерном режиме. Кроме того, дальномер укомплектован отражателем, имеющим увеличенную отражающую поверхность (на предельных дальностях используется отражатель, составленный из 18 трипельпризм).

Меньшая фазовая неоднородность светового пучка, свойственная примененному в СТ 5 лазерному излучателю, а также принятые меры по стабилизации режимов работы отдельных узлов дальномера позволили заметно повысить приборную точность этого дальномера (с 3 см для СМ-5 до 1 см в СТ 5).

Усовершенствования достигнуты без увеличения потребляемой мощности и при сохранении тех же весовых и габаритных размеров, что и у дальномера СМ-5.

Номинальные значения основной и вспомогательной масштабных частот оставлены в светодальномере СТ 5 без изменений (14,9855 МГц и 149,855 кГц). В то же время изменена длительность излучаемых световых импульсов. В режиме «Точно», т. е. на основной масштабной частоте, эта длительность равна 10 нс, а в режиме «Грубо», т. е. на вспомогательной масштабной частоте, — 50 нс.

Отличительной особенностью светодальномера СТ 5 является то, что в режимах «Точно» и «Грубо» используются различные частоты следования счетных импульсов. В режиме «Точно» эта частота равна 7492,75 кГц, что обеспечивает разрешающую способность счетного устройства, равную 2 мм, т. е. в 5 раз более высокую, чем в СМ-5. В режиме «Грубо» частота следования счетных импульсов равна 1498,55 кГц. При этом разрешающая

способность счетчика равна 1 см, т. е. на вспомогательной масштабной частоте сохранена та же разрешающая способность, что и в СМ-5.

Для совершенствования процессов автоматизации в дальномере СТ 5 предусмотрен разъем для подключения внешнего регистрирующего устройства. В него могут быть автоматически переписаны измеренные значения дальностей, сохранены в течение требуемого интервала времени и использованы для совместной обработки с другими геодезическими данными (например, с результатами угловых измерений). В дальномере предусмотрена возможность определения температурных уходов частоты нетермостатированного кварцевого генератора масштабной частоты по показаниям светового табло счетного блока. Эти показания используются для получения температурной поправки за уход частоты, которая вводится в результаты измеренного расстояния.

Методика работы со светодальномером СТ 5, внешний вид которого показан на рис. 94, практически не отличается от аналогичной методики, используемой при работе с дальномером СМ-5.

Светодальномер ЕОК 2000

Топографический светодальномер ЕОК 2000 разработан в конце 60-х годов Народным предприятием «Карл Цейс Йена» (ГДР). Прибор до настоящего времени достаточно широко используется в нашей стране при выполнении линейных измерений на различных видах топографо-геодезических работ.

Максимальная дальность действия дальномера при использовании девятипризменного отражателя около 2,5 км. Погрешность измерений ± 1 см. Масса прибора с подставкой около 12 кг. В качестве источника питания применяется 12-вольтовая аккумуляторная батарея. Потребляемая дальномером мощность 10—12 Вт.

Светодальномер ЕОК 2000 изображен на рис. 95, а его упрощенная функциональная схема — на рис. 96.

Знакомство с приведенной функциональной схемой свидетельствует о том, что в приборе реализован наиболее распространенный в дальномерах низкочастотный метод фазовых измерений с применением в качестве фазометра градуированного фазовращателя, фазового детектора и стрелочного прибора.

Основная масштабная частота f_m выбрана равной 29 971 141 Гц. За стандартные метеоусловия приняты: температура воздуха $t = +15^\circ\text{C}$, атмосферное давление $p = 98,64$ кПа (740 мм рт. ст.), парциальное давление водяных паров $e = 1,33$ кПа (10 мм рт. ст.). При таких значениях метеоусловий для используемой в дальномере длины волны света, равной 0,9 мкм, групповой показатель преломления воздуха оказыва-

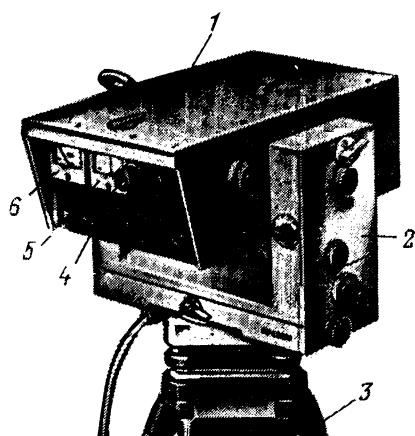
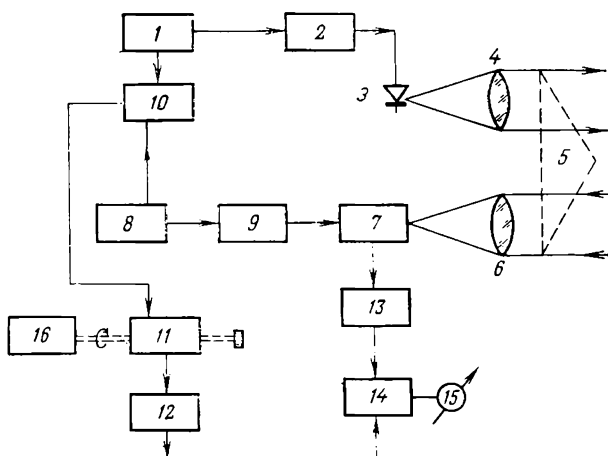


Рис. 95. Светодальномер ЕОК 2000:

1 — корпус светодальномера; 2 — П-образное основание; 3 — штатив; 4 — окуляр визирного устройства; 5 — нуль-индикатор; 6 — контрольный прибор

Рис. 96. Упрощенная функциональная схема светодальномера ЕОК 2000:

1 — генератор масштабной частоты; 2 — усилитель модулирующих колебаний; 3 — светодиод (излучатель); 4 — передающий линзовый объектив; 5 — призма ОКЗ; 6 — приемный линзовый объектив; 7 — ФЭУ; 8 — вспомогательный генератор; 9 — усилитель сигнала гетеродина; 10 — смеситель; 11 — градуированный фазовращатель; 12 — НЧ усилитель; 13 — НЧ усилитель с узкополосным фильтром; 14 — фазовый детектор; 15 — нуль-индикатор; 16 — счетчик



ется равным 1,0002705, а соответствующая ему скорость света в атмосфере $v=299\,711,4$ км/с. Основная единица измерения, соответствующая половине длины волны модуляции, равна при этом 5 м.

Для разрешения неоднозначности в пределах до 500 м в дальнометре предусмотрены две дополнительные масштабные частоты: $f_{m_2}=32\,968\,255$ Гц и $f_{m_3}=30\,270\,852$ Гц. Эквивалентные значения половин длин волн модуляции для разностей $f_{m_2}-f_{m_1}$ и $f_{m_3}-f_{m_1}$ соответственно равны $\lambda_{2-1}/2=50$ м, $\lambda_{3-1}/2=500$ м.

Источником модулирующих колебаний служит генератор масштабной частоты 1. Возбуждаемые в нем колебания через усилитель 2 поступают на люминесцентный арсенид-галлиевый светодиод 3, работающий в непрерывном режиме и выполняющий одновременно две функции — излучателя и модулятора.

В светодальномере ЕОК 2000 применены линзовые оптические системы, причем передающая и приемная конструктивно отделены друг от друга, а их оптические оси не совпадают. Как и в других типах дальномеров, передающая линзовая система 4 используется для уменьшения расходимости излучаемого светодиодом светового потока, а приемная линзовая система 6 — для фокусировки на фотокатоде ФЭУ приходящего от удаленного отражателя (или от призмы ОКЗ) оптического излучения.

Оптическое короткое замыкание (ОКЗ) в светодальномере ЕОК 2000 осуществляется за счет введения специальной призмы 5, перехватывающей на выходе передающего линзового объектива излучаемый световой поток и направляющей его в приемный оптический тракт.

Установленный на входе электронной схемы приемной части дальномера фотоумножитель 7 преобразует оптический информационный сигнал в электрический и с помощью поступающих от гетеродина колебаний понижает частоту модулирующих колебаний. Снимаемый с выхода ФЭУ низкочастотный информационный сигнал имеет частоту, равную 7,5 кГц.

Для улучшения отношения сигнала к помехе сигнал пропускается через усилитель 13 с узкополосным фильтром, осуществляющим спектральную селекцию, а затем подается в фазовый детектор 14, где производится фазовое сравнение информационного сигнала с опорным.

Формирование низкочастотного опорного сигнала в светодальномере ЕОК 2000 выполняется одним из наиболее распространенных способов, а именно, с помощью смесительного каскада 10, на вход которого подают сигналы от генератора масштабной частоты 1 и гетеродина 8. Образующиеся на выходе смесителя опорные колебания с частотой 7,5 кГц подвергаются регулируемой фазовой задержке с помощью градуированного фазовращателя 11, после чего поступают в фазовый детектор.

Регистрация угла поворота оси фазовращателя, по которому определяют разность фаз, выполняется с помощью механического счетчика оборотов 16, ось вращения которого жестко связана с осью вращения фазовращателя, а также с последовательно соединенными оцифрованными дисками. Последние позволяют зарегистрировать угол поворота оси фазовращателя с точностью до $1/1000$ от полного оборота этой оси, тем самым обеспечивая разрешающую способность фазометра, равную $1/1000$ от полного периода колебаний, поступающих в этот фазометр.

Одна из характерных особенностей примененного отсчетного устройства состоит в том, что счетчик снабжен сбрасывающим приспособлением, позволяющим производить «обнуление» отсчетов при любом положении оси фазовращателя. С помощью такого приспособления имеется возможность непосредственно со

шкалы считать разность отсчетов, соответствующих измерениям по линии ОКЗ и на удаленный отражатель.

С целью обоснования использованной в дальномере методики измерений рассмотрим основные математические соотношения, связывающие между собой отсчеты на основной и дополнительных масштабных частотах с величиной искомого расстояния. В качестве основной рабочей формулы для светодальномера ЕОК 2000 используется соотношение (22):

$$D = (N_1 + \Delta N_1) \frac{\lambda_1}{2}, \quad (161)$$

где $\lambda_1 = v/f_{m_1}$ — длина волны модуляции на основной масштабной частоте, равная 10 м; N_1 — число целых полуволн модуляции, укладывающихся в измеряемом расстоянии при использовании частоты f_{m_1} ; $\Delta N_1 = \Delta \phi_1 / 2\pi$ — измеряемая разность фаз в долях от полного периода, принятого за единицу.

Если искомую разность фаз $\Delta \phi_1$ выразить через показания a_1 отсчетного устройства, вся шкала которого поделена на 1000 делений, то формула (161) принимает вид

$$D = \left(N_1 + \frac{a_1}{1000} \right) \frac{\lambda_1}{2}. \quad (161a)$$

При последовательных измерениях на удаленный отражатель и по линии ОКЗ формула (161a) без учета приборных поправок может быть представлена в следующем виде:

$$D = \left(N_1 + \frac{a_1 - a_0}{1000} \right) \frac{\lambda_1}{2}.$$

или

$$2D = \left(N_1 + \frac{a_1'}{1000} \right) \lambda_1, \quad (162)$$

где a_0 — показания отсчетного устройства при посылке света по линии ОКЗ (этот отсчет в журнал не записывается, а после завершения измерений по ОКЗ сбрасывается со шкалы с помощью упомянутого выше приспособления); $a_1' = a_1 - a_0$ — показания отсчетного устройства при измерениях на удаленный отражатель, соответствующие условию «обнуления» предшествующего отсчета при работе по линии ОКЗ.

При измерениях на вспомогательных масштабных частотах f_{m_2} и f_{m_3} , снимаем разность отсчетов $a_3' - a_1'$ и $a_2' - a_1'$, относящиеся к частотам $f_{m_3} - f_{m_1}$ и $f_{m_2} - f_{m_1}$, и соответственно имеем:

$$2D = \left[(N_3 - N_1) + \frac{a_3' - a_2'}{1000} \right] \lambda_{3-1}; \quad (163)$$

$$2D = \left[(N_2 - N_1) + \frac{a_2' - a_1'}{1000} \right] \lambda_{2-1},$$

где $\lambda_{3-1} = v / (f_{m_3} - f_{m_1})$ и $\lambda_{2-1} = v / (f_{m_2} - f_{m_1})$ — эквивалентные длины волн для разностей масштабных частот; $N_3 - N_1$ и $N_2 - N_1$ — число целых уложений длин волн λ_{3-1} и λ_{2-1} в измеряемом расстоянии.

Поскольку в светодальномере ЕОК 2000 частоты f_{m_3} и f_{m_2} выбраны так, что $\lambda_{3-1} = 1000$ м, а $\lambda_{2-1} = 100$ м, то при измерении линий длиной до 500 м $N_3 - N_1 = 0$, т. е. отсчеты $a_3' - a_1'$ для линий указанного диапазона позволяют получить грубое, но однозначное значение величины D .

В связи с тем что коэффициент неоднозначности k выбран в светодальномере ЕОК 2000 равным 10:

$$k = \frac{f_{m_1}}{f_{m_2} - f_{m_1}} = \frac{f_{m_2} - f_{m_1}}{f_{m_3} - f_{m_1}} = 10,$$

то имеется возможность за счет ступенчатой (т. е. со смещением на один разряд) записи отсчетов $a_3' - a_1'$, $a_2' - a_1'$ и a_1' разрешить неоднозначность и обеспечить необходимую точность измерения искомой длины линии в пределах от 0 до 500 м.

Исходя из вышеизложенного, методика определения длин линий светодальномером ЕОК 2000 включает в себя операции в такой последовательности:

выполнение измерений по линии ОКЗ на частоте f_{m_1} без записи в журнал полученного отсчета;

после проведения «обнуления» предыдущего отсчета выполнение измерений на частоте f_{m_1} с посылкой света на удаленный отражатель и запись в журнал полученного при этом отсчета a_1' ;

«обнуление» отсчета a_1' , переключение на частоту f_{m_2} , выполнение измерений на удаленный отражатель с записью в журнал полученного отсчета, который при такой методике измерений будет соответствовать разности $a_2' - a_1'$;

переключение на частоту f_{m_3} без сбрасывания предыдущего отсчета, выполнение измерений на этой масштабной частоте при посылке света на удаленный отражатель и запись в журнал полученного отсчета, соответствующего разности $a_3' - a_1'$.

Фиксируемые отсчеты записываются каждый в свою строку со смещением на разряд, как показано в приведенном ниже примере:

$$\begin{array}{r} a_3' - a_1' = 580 \\ a_2' - a_1' = 622 \\ a_1' = 334 \end{array}$$

$$2D = 563,34 \text{ м или } D = 281,670 \text{ м}$$

Каждую линию измеряют одним приемом, включающим в себя взятие трех отсчетов на частоте f_{m_1} и двух отсчетов на частотах f_{m_2} и f_{m_3} . Если длина измеряемой линии превышает 500 м, то число 500-метровых отрезков в искомом расстоянии определяют вспомогательными методами. При этом в строке $2D$

перед старшим разрядом записывают цифру, соответствующую числу таких отрезков.

Полученное значение измеренной длины линии исправляют за величину приборной поправки, а также вводят поправки за уклонение метеоданных от принятых средних, за температурный уход масштабной частоты и за циклическую погрешность фазовращателя. После этого измеренное расстояние редуцируют на требуемую отсчетную поверхность.

§ 28. СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ ГРУППЫ П

Основным отличительным признаком светодальномеров группы П является их повышенная приборная точность, которая в соответствии с принятой классификацией оценивается ошибками, лежащими в пределах от 0,1 до 2 мм. Исходя из этого признака, дальномеры группы П иногда называют прецизионными. Их также называют инженерными, поскольку они предназначены для решения разнообразных задач прикладной геодезии, в том числе и для выполнения геодезических работ, связанных с созданием крупных инженерных сооружений, таких, как радиотелескопы большого диаметра, гидроэлектростанции, мосты, тоннели и др.

В отличие от светодальномеров группы Т число созданных к настоящему времени различных моделей дальномеров группы П сравнительно невелико. Несмотря на это, характерная для них высокая приборная точность во многом определяет общий прогресс развития дальномерной техники и позволяет рассматривать такие дальномеры как образцовые средства измерений для других технических средств, используемых при выполнении линейных измерений на местности.

Отдельные технические решения, применяемые при разработке дальномеров группы П, являются общими для различных моделей приборов этой группы. В то же время проблема получения максимальной приборной точности вынуждает изыскивать разнообразные пути решения этой задачи.

Общей тенденцией для всех светодальномеров группы П является стремление разработчиков использовать высокие масштабные частоты, лежащие в диапазоне от нескольких сотен до нескольких тысяч мегагерц. Другим общим признаком может служить ограниченная дальность действия, которая во многих случаях оценивается сотнями метров, хотя в последние годы наметилась тенденция увеличения дальности действия таких дальномеров до 5—10 км. Однако реализация высокой приборной точности на предельных дальностях сопряжена с большими трудностями, обусловленными отсутствием соответствующих по точности методов учета влияния внешних условий.

В отличие от светодальномеров рассмотренных выше групп в инженерных дальномерах находят применение различные тех-

нические решения при выборе источников излучения, модуляторов света, оптических систем и методов фазовых измерений. В современных дальномерах группы П в качестве источников излучения применяют и импульсные газосветные лампы, и газовые лазеры, и полупроводниковые светодиоды. Управление излучением осуществляется как с помощью внешних модуляторов света, так и за счет внутренней модуляции источников излучения.

Что касается методов фазовых измерений, которые используются в отдельных моделях светодальномеров группы П, то они достаточно разнообразны. Наряду с широко распространенными электронными цифровыми фазометрами в этих дальномерах применяют и специфические технические решения, основанные на изменении длины оптического хода лучей внутри дальномера.

В данном параграфе рассмотрены основные особенности работы отдельных типов светодальномеров группы П, нашедшие практическое применение в нашей стране при решении различных задач прикладной геодезии.

Светодальномер ДК 001

Созданный в середине 70-х годов отечественной промышленностью светодальномер ДК 001 (рис. 97) предназначался для высокоточных линейных измерений, которые приходится производить при создании крупных инженерных сооружений, при изучении движений земной коры, а также при решении целого ряда других задач инженерной геодезии. Диапазон измеряемых ли-

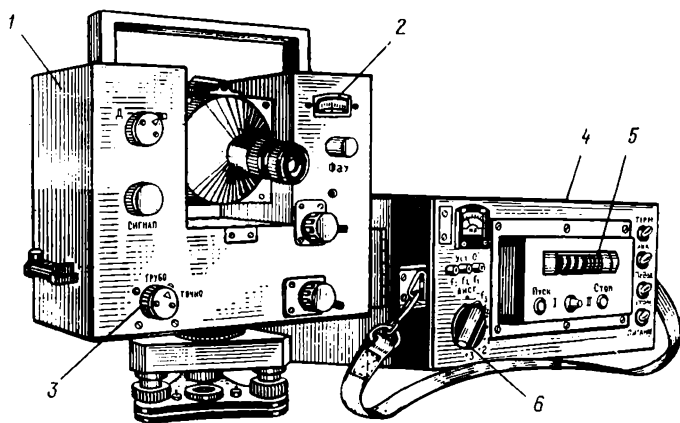


Рис. 97. Светодальномер ДК 001:

1 — приемопередатчик; 2 — стрелочный прибор для контроля уровня сигнала; 3 — переключатель «Грубо» — «Точно»; 4 — электронный блок; 5 — цифровое табло; 6 — переключатель режима работы электронного блока

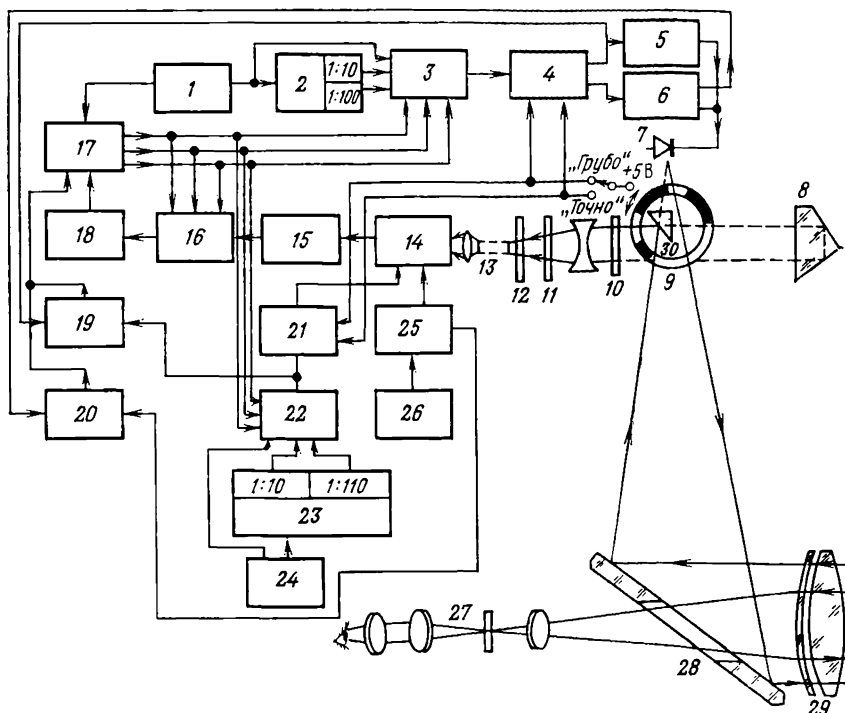


Рис. 98. Упрощенная функциональная схема светодальномера ДК 001:

1 — генератор масштабной частоты; 2 — делитель частоты; 3 — первый коммутатор; 4 — второй коммутатор; 5 — первый усилитель; 6 — умножитель частоты на 50; 7 — светодиод (излучатель); 8 — трипельпризма; 9 — переключаемая диафрагма; 10 — «серый» клин; 11 — интерференционный фильтр; 12 — полевая диафрагма; 13 — световод; 14 — ФЭУ; 15 — второй усилитель; 16 — схема установки начальных отсчетов; 17 — счетный блок; 18 — узкополосный фильтр; 19 — первый смеситель; 20 — второй смеситель; 21 — третий коммутатор; 22 — четвертый коммутатор; 23 — делитель частоты; 24 — первый вспомогательный генератор; 25 — умножитель частоты на 50; 26 — второй смеситель; 27 — визуальная оптическая система; 28 — зеркало с центральным отверстием; 29 — линзовый объектив; 30 — разделительная призма

ний от 0,5 до 500 м. Погрешность измерения линии одним приемом $\pm (0,8 + 1,5 \cdot 10^{-6} D)$ мм.

Дальномер устанавливают на одном из концов измеряемой линии. Он состоит из двух основных частей: приемопередатчика и электронного блока. Приемопередатчик укрепляют на штативе и центрируют над геодезической маркой, а рядом со штативом располагают электронный блок. Масса приемопередатчика с подставкой 7,5 кг, а электронного блока — 7 кг. В качестве отражателя, устанавливаемого на другом конце линии, используется одиночная трипельпризма. Питание дальномера осуществляется от аккумуляторной батареи напряжением 13—16 В. Потребляемая мощность — 35 Вт.

Упрощенная функциональная схема дальномера приведена на рис. 98. Основная особенность схемы состоит в том, что для повышения приборной точности светодальномера в нем наряду

с широко распространенной сеткой масштабных частот, лежащих в диапазоне от 150 кГц до 15 МГц, предусмотрена возможность работы при повышенном значении масштабной частоты, равном примерно 750 МГц.

В дальномере реализован низкочастотный метод фазовых измерений. В качестве фазоизмерительного устройства использован электронный цифровой фазометр.

Источником излучения служит полупроводниковый светодиод 7. Метод модуляции оптического излучения — внутренний (за счет питания светодиода переменным током масштабной частоты).

Колебания, которые используются для модуляции оптического излучения, возбуждаются в генераторе масштабной частоты 1 (см. рис. 98), работающем на частоте 14,985 МГц. Колебания той же частоты применены одновременно и для формирования счетных импульсов, необходимых для работы электронного цифрового фазометра, входящего в состав счетного блока 17.

Частота модуляции $f_3 = 14,985$ МГц, так же как и две другие частоты $f_2 = f_3/10 = 1498,5$ кГц и $f_1 = f_3/100 = 149,85$ кГц, образующиеся в результате применения соответствующего делителя частоты 2, используются в дальномере для разрешения неоднозначности измеряемого расстояния. Режим измерения на упомянутых масштабных частотах, получивший условное название режима «Грубо», обеспечивает однозначную величину искомого расстояния на линиях длиной до 1 км с погрешностью 2—3 см. Переключение частот f_3 , f_2 и f_1 может осуществляться в дальномере как вручную, так и автоматически с помощью коммутатора 3 по командам, получаемым от счетного блока 17. В зависимости от состояния коммутатора 3 колебания, соответствующие одной из масштабных частот (f_3 , f_2 или f_1), через коммутатор 4, усилитель 5 попадают на светодиод 7, вызывая амплитудную модуляцию оптического излучения.

Для реализации низкочастотного метода при работе дальномера в режиме «Грубо» в схеме предусмотрен гетеродин 24, в состав которого входят два кварцевых генератора, работающих на частотах $f_{г_3} = 14\,970,015$ кГц и $f_{г'} = 14\,835,150$ кГц. С помощью делителя частоты 23 из последней образуются частоты $f_{г_2} = f_{г'}/10 = 1483,515$ кГц и $f_{г_1} = f_{г'}/110 = 134,865$ кГц. Переключение частот гетеродина ($f_{г_3}$, $f_{г_2}$ или $f_{г_1}$) осуществляется с помощью коммутатора 22, синхронно работающего с коммутатором 3.

Для формирования опорного электрического сигнала в схему дальномера введен смеситель 19, на выходе которого выделяются опорные колебания с частотой $F = f_3 - f_{г_3} = f_2 - f_{г_2} = f_1 - f_{г_1} = 14,985$ кГц. Информационный сигнал с частотой F формируется на выходе фотоумножителя 14. Для этого в каскад наряду

с модулированным оптическим сигналом поступает и электрический сигнал гетеродина через коммутатор 21. Образующийся на выходе ФЭУ низкочастотный сигнал через усилитель 15, схему установки начальных отсчетов 16 и узкополосный фильтр 18 передается на соответствующий вход счетного блока.

Для измерения длин линий с высокой приборной точностью в дальномере ДК 001 предусмотрен режим «Точно», обеспечивающий работу на частоте модуляции оптического излучения около 750 МГц. С этой целью за счет соответствующей коммутации электрических цепей в коммутаторе 4 поступающие на его вход колебания с частотой 14,985 МГц направляются на вход умножителя частоты 6 с коэффициентом умножения 50. Образующиеся на выходе умножителя колебания с частотой $f_4 = 50f_3 = 749,250$ МГц используются для модуляции излучения полупроводникового светодиода.

Реализация низкочастотного метода в режиме «Точно» осуществляется за счет применения гетеродина 26 ($f_r = 14\,984\,700,3$ Гц), частота которого умножается соответствующим умножителем с коэффициентом 50 ($f_{r_4} = 50f_r = 749\,235\,015$ Гц). Образующиеся на выходе смесителя 20 и фотоумножителя 14 соответственно опорный и информационный сигналы имеют при этом частоту $F = f_4 - f_{r_4} = 14,985$ кГц, т. е. такую же, что и в режиме «Грубо».

В дальномере применена совмещенная приемопередающая оптическая система. При измерении на удаленный отражатель излучение от светодиода проходит через переключаемую диафрагму 9 (см. рис. 98), отражается от наклонного зеркала 28, коллимируется с помощью линзового объектива 29 и направляется на отражатель, установленный на другом конце измеряемой линии. Пришедший от отражателя свет отражается в дальномере наклонным зеркалом 28 в направлении разделительной призмы 30, а от последней направляется в приемный оптический тракт для подачи на вход ФЭУ.

Для регулировки величины светового сигнала, поступающего на ФЭУ, в приемный тракт дальномера введен нейтральный фильтр 10 переменной плотности («серый клин»). Спектральная и пространственная селекция полезного оптического сигнала осуществляется с помощью интерференционного фильтра 11 и полевой диафрагмы 12.

Для работы в режиме оптического короткого замыкания (ОКЗ) в оптическом тракте дальномера предусмотрена переключаемая диафрагма 9, при повороте которой на определенный угол излучение от светодиода 7 направляется с помощью разделительной призмы 30 на специально введенную в дальномер трипельпризму 8, а после отражения от нее — по тому же тракту, что и принимаемый с дистанции оптический сигнал.

С помощью встроенной зрительной трубы 27 имеется возможность визуального наведения дальномера на удаленный от

ражатель. В процессе измерения светодальномером ДК 001 предусмотрена серия грубых и точных отсчетов при посылке света как на удаленный отражатель, так и по линии ОКЗ. Цифровые индикаторы счетного блока позволяют считать со светового табло величину измеряемого расстояния: в режиме «Грубо» — до единиц миллиметров, в режиме «Точно» — до сотых долей миллиметра. Последние цифры снимаемых отсчетов не являются достаточно достоверными и используются лишь для правильного округления результатов измерения.

Измеренное значение искомой длины линии корректируется за счет введения приборных поправок, характерных для индивидуального экземпляра дальномера, постоянных поправок отражателей, а также метеорологических поправок, учитывающих уклонение реальных значений температуры, давления и влажности воздуха от принятых средних.

Светодальномер МСД 1М

Разработанный Всесоюзным научно-исследовательским институтом горной геохимии и маркшейдерского дела (ВНИМИ) светодальномер МСД 1М предназначен для выполнения линейных измерений при производстве геодезических и маркшейдерских работ, проводимых как на земной поверхности, так и на подземных горных выработках.

В условиях хорошей видимости и применения однопризменного отражателя светодальномер позволяет измерять линии длиной до 300 м. С отражателем из трех призм дальность действия увеличивается до 500 м. Средняя квадратическая погрешность измерения длин линий $\pm (2 + 5 \cdot 10^{-6} D)$ мм. Светодальномер выполнен во взрывобезопасном варианте. Масса приемопередатчика 9,5 кг. Питание дальномера осуществляется от встроенных аккумуляторных батарей напряжением 13,2 и 2,4 В.

В дальномере МСД 1М, так же как и в ДК 001, применены повышенные масштабные частоты. Основная масштабная частота выбрана равной 149,8552 МГц, что эквивалентно половине длины волны модуляции, равной 1 м. Две другие масштабные частоты, равные 150,1549 и 142,3624 МГц, используются для разрешения неоднозначности в пределах до 500 м.

Упрощенная функциональная схема светодальномера приведена на рис. 99. Колебания перечисленных выше частот возбуждаются в дальномере с помощью кварцевого генератора 1. Отличительная особенность схемы состоит в том, что фаза этих колебаний перед подачей в оптический источник излучения 3 (полупроводниковый светодиод) периодически изменяется скачком на 180° с помощью манипулятора фазы 2, управляемого низкочастотным генератором 12, имеющим частоту 80 Гц.

Принимаемый с дистанции световой поток попадает в фотумножитель 9, к внешнему накладному электроду которого приложено переменное напряжение масштабной частоты, поступаю-

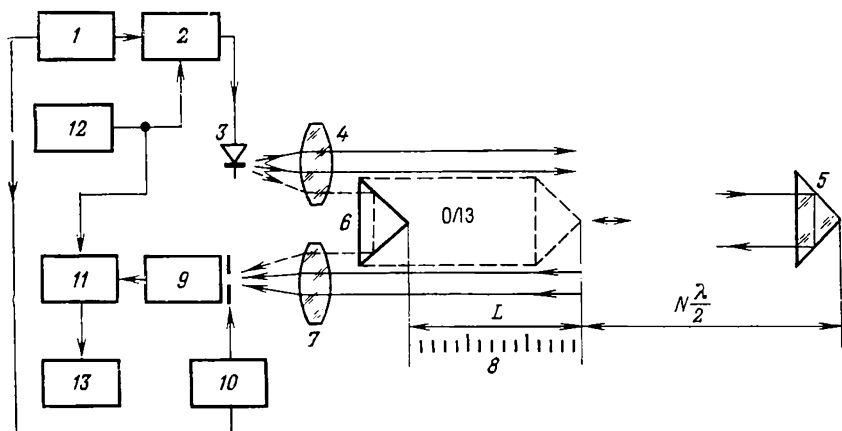


Рис. 99. Упрощенная функциональная схема светодальномера МСД 1М

1 — кварцевый генератор; 2 — манипулятор фазы; 3 — светодиод; 4 — объектив передающей системы; 5 — отражатель; 6 — трипельпризма ОЛЗ; 7 — объектив приемной системы; 8 — шкала ОЛЗ; 9 — ФЭУ; 10 — фазовращатель; 11 — синхронный детектор; 12 — низкочастотный генератор; 13 — стрелочный прибор

щее от кварцевого генератора через фазовращатель 10. В результате с выхода ФЭУ снимается низкочастотный сигнал с частотой 80 Гц, амплитуда которого в двух соседних полупериодах в общем случае различна. Различие зависит от соотношения фаз между принимаемым модулированным световым потоком и электрическим сигналом, поступающим на накладной электрод. Форма изменения сигнала аналогична форме изменения светового потока на выходе из демодулятора в светодальномере СГ-3 (см. рис. 87).

Сигнал с выхода ФЭУ подается на один из входов в синхронный детектор 11 (см. рис. 99), второй вход которого соединен с низкочастотным генератором 12. Величина постоянного напряжения, возникающего при этом на выходе синхронного детектора 11 и регистрируемая стрелочным индикатором 13, зависит от разности амплитуд двух соседних полупериодов низкочастотного сигнала, поступающего от фотоумножителя, а следовательно, и от разности фаз между информационным и опорным сигналами. Нулевые показания стрелочного индикатора наблюдаются при разности фаз, равной 90 или 270°.

Поскольку в общем случае фаза информационного сигнала в зависимости от длины измеряемой линии может принимать любые значения, то для установки стрелочного индикатора на нуль изменяют с помощью фазовращателя задержку опорного сигнала. Затем, не меняя этой задержки, световой сигнал направляют в оптическую линию задержки (ОЛЗ) и, изменяя длину этой линии, добиваются нулевых показаний индикаторного прибора. Регистрируемая при этом разность фаз в линей-

ной мере снимается со шкалы ОЛЗ, фиксирующей величину перемещения отражающего устройства, входящего в состав этой линии.

Процесс определения искомой длины линии состоит из последовательных измерений на трех упомянутых выше масштабных частотах. На основной масштабной частоте f_3 определяется домер до целого числа метров с точностью до 1 мм, на разностной частоте $f_3 - f_2$ — число целых метров в последнем неполном 20-метровом отрезке длины, укладываемом в измеряемом расстоянии. На разностной частоте $f_1 - f_3$ — общее число целых двадцатиметровых отрезков, укладываемых в искомой длине линии.

Полученное значение длины корректируется введением приборных и метеорологических поправок.

Дифференциальные светодальномеры типа ДВСД

При решении целого ряда инженерно-геодезических задач возникает необходимость применения дальномеров, позволяющих уточнять известные длины линий или периодически контролировать их изменения. В таких случаях появляется возможность выполнения измерений на одной масштабной частоте без разрешения неоднозначности. Этим требованиям отвечают дифференциальные светодальномеры типа ДВСД, разработанные Ереванским политехническим институтом.

Так же как и в других типах светодальномеров группы П, в них использованы повышенные значения масштабных частот (600 и 1200 МГц). В качестве источника света применен газовый гелий-неоновый лазер, высокая направленность излучения которого позволяет производить измерения линий небольшой длины (до 200—300 м) без применения в дальномере приемопередающей оптической системы. Модуляция излучения внешняя (за счет применения двоякопреломляющих кристаллов типа KDP, помещенных в объемный резонатор, электрическое поле в котором создается генератором масштабной частоты). Свет через модулятор проходит дважды — в направлении на удаленный отражатель и в обратном направлении после отражения от отражателя. Модулятор выполняет одновременно две функции: модулятора излучаемого оптического сигнала и демодулятора принимаемого сигнала. Величина светового потока на выходе из демодулятора зависит от соотношения разности фаз между приходящим с дистанции модулированным оптическим сигналом и электрическим сигналом, приложенным к демодулятору. С помощью фотоумножителя световой сигнал преобразуется в электрический, величина которого регистрируется индикатором, базирующимся на использовании электронно-лучевой трубки. При этом, как правило, регистрируются минимальные значения электрического сигнала, которые соответствуют вполне опреде-

ленной разности фаз между оптическим (информационным) и электрическим (опорным) сигналами. Для достижения этого значения, при котором в измеряемом расстоянии укладывается целое число половин длин волн модуляции, в дальномере предусмотрена возможность механического перемещения объемного резонатора в направлении на удаленный отражатель. С этой целью объемный резонатор устанавливается на специальную каретку, величина перемещения которой, соответствующая укорочению или удлинению значения искомого расстояния, регистрируется механическим микрометром часового типа.

В дальномерах дифференциального типа, к которым относятся различные модификации светодальномера ДВСД, не предусмотрена возможность разрешения неоднозначности искомым длин линий. Поэтому в процессе измерения получают не полную величину определяемого расстояния, а лишь дополнение к тому значению, в котором укладывается целое число половин длин волн колебаний масштабной частоты. Исходя из вышеизложенного, дальномеры данного типа чаще всего применяются в тех случаях, когда возникает необходимость определения изменений той или иной длины линии (например, при изучении деформаций крупных инженерных сооружений, локальных участков земной поверхности и т. д.). Точность измерений светодальномерами типа ДВСД характеризуется средними квадратическими погрешностями, равными 0,2—0,4 мм.

§ 29. РАДИОДАЛЬНОМЕРЫ И РАДИОГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Свойственные радиодальномерам особенности работы, связанные как со спецификой распространения радиоволн, так и с характерной для этих приборов аппаратурной реализацией, существенно расширили возможности выполнения геодезических измерений в различных физико-географических условиях. В частности, при использовании радиодальномеров появилась возможность производить измерения длин линий на местности при отсутствии оптической видимости (в условиях густого тумана, дыма, запыленности воздуха). Возможность отделения приемопередатчиков от индикаторных блоков и подъем их с помощью перевозимых раздвижных мачт на высоту до нескольких десятков метров над земной поверхностью позволили производить измерения при наличии на трассе различного рода препятствий (лесозащитные полосы, отдельные строения и т. п.).

Возможность выполнения радиодальномерных измерений в динамике с использованием различного рода движущихся объектов также широко применяется в настоящее время при развитии новых методов определения координат точек на земной поверхности. Они нашли применение в морской геодезии, при выполнении геодезических работ с применением различного рода летательных аппаратов, при создании наземных оперативных

топографических систем и т. д. Эксплуатационные возможности радиодальномерных систем обуславливают целесообразность постоянного их совершенствования и развития наряду со светодальномерной техникой.

В зависимости от требований к дальности действия и точности измерений существенно изменяются и технические решения, лежащие в основе создания той или иной разновидности радиодальномерной системы. Это обусловлено, в первую очередь, необходимостью использования различных диапазонов радиоволн.

Так, например, для измерения линий протяженностью в несколько тысяч километров с точностью около 1 км применяют радиосистемы, работающие в длинноволновом и сверхдлинноволновом диапазонах (система «Омега» с несущей частотой около 10 кГц и система Лоран-С с несущей частотой около 100 кГц). Для измерения расстояний до 500 км с точностью 10—30 м используются радиосистемы средневолнового диапазона (системы «Поиск», БРАС, Торан и др., несущие частоты которых выбирают в диапазоне около 2 МГц).

Упомянутые системы применяются, в основном, для навигационных целей. При выполнении геодезических работ, требующих, как правило, повышенной точности измерений, наибольший интерес представляют радиодальномерные системы, работающие в УКВ диапазоне. Такие системы в зависимости от конкретных условий работы обеспечивают точность измерений от нескольких сантиметров до нескольких дециметров при наличии между конечными пунктами прямой видимости. В данном параграфе основное внимание уделено рассмотрению принципов действия высокоточных радиодальномеров и радиогеодезических систем. Различие между радиодальномерами и радиогеодезическими (или радиодальномерными) системами состоит в том, что во-первых предусматривается один дальномерный канал, а во-вторых — два или три. Такое различие обусловлено спецификой их применения. Радиодальномеры, состоящие из двух одновременно работающих станций, применяют для измерения на местности длин линий между двумя неподвижными точками. Радиогеодезические системы в большинстве случаев используют для определения плановых координат движущихся объектов методом линейной засечки с применением не менее двух неподвижных станций.

Ниже приведено краткое описание основных принципов действия тех типов отечественных радиодальномеров и радиогеодезических систем, которые применяются в нашей стране при выполнении тех или иных видов топографо-геодезических работ.

Радидальномер «Луч»

Разработанный ЦНИИГАиК радиодальномер «Луч» относится к группе высокоточных геодезических радиодальномеров УКВ диапазона повышенной дальности действия. В этом дальномере

приемопередатчик отделен от индикаторного блока и приспособлен для установки наверху раздвижной переносной мачты. Блоки соединены между собой 25-метровым гибким кабелем. Такая конструкция позволяет производить измерения длин линий без постройки геодезических наружных знаков.

В отличие от рассмотренных выше светодальномеров радиодальномер «Луч» позволяет выполнять измерения в любых метеорологических условиях (за исключением сильного дождя), но при наличии прямой видимости между конечными пунктами.

В радиодальномере «Луч» использован трехсантиметровый диапазон радиоволн (длины волн 3,4—3,5 см). Радиодальномер позволяет измерять линии длиной от 200 м до 80—100 км. Верхний предел дальности ограничивается минимальной величиной принимаемого сигнала, которая, в свою очередь, зависит не только от длины измеряемой линии, но и от рельефа местности, а также от метеорологических условий. При выполнении производственных работ в благоприятных условиях радиодальномером были измерены линии, существенно превышающие 100 км.

Средняя квадратическая погрешность измерений ($3 + 3 \cdot 10^{-6} D$) см. Эта характеристика также является приближенной, так как реальная точность существенно зависит от влияния внешних условий (наличия отражений от подстилающей поверхности и равномерности распределения метеофакторов вдоль трассы прохождения радиолуча).

Питание радиодальномера осуществляется от 12-вольтовой аккумуляторной батареи. Потребляемая одной станцией мощность — около 60 Вт.

В основе принципа действия радиодальномера «Луч» лежит обобщенная функциональная схема дальномера с активным ответом (см. рис. 27). Станции радиодальномера «Луч» являются взаимозаменяемыми, т. е. каждая станция может работать как в режиме «ведущей», так и в режиме «ведомой».

Для пояснения особенностей работы радиодальномера «Луч» на рис. 100 приведена упрощенная функциональная схема, позволяющая прокомментировать характерные для этого дальномера технические решения. Упрощение схемы состоит в том, что на ней не показаны вспомогательные узлы, которые не оказывают существенного влияния на процесс измерений (радиотелефонный канал, контрольно-измерительные узлы и т. п.). Кроме того, на схеме не показан принцип совмещения функций «ведущей» и «ведомой» станций. Эта задача решается за счет соответствующего объединения узлов станций и введения необходимых коммутирующих узлов. В результате такого совмещения принцип действия радиодальномера изменениям не подвергается.

Источником колебаний масштабной частоты служит кварцевый генератор 1 (см. рис. 100). Он содержит четыре последовательно переключаемых кварцевых резонатора, с помощью ко-

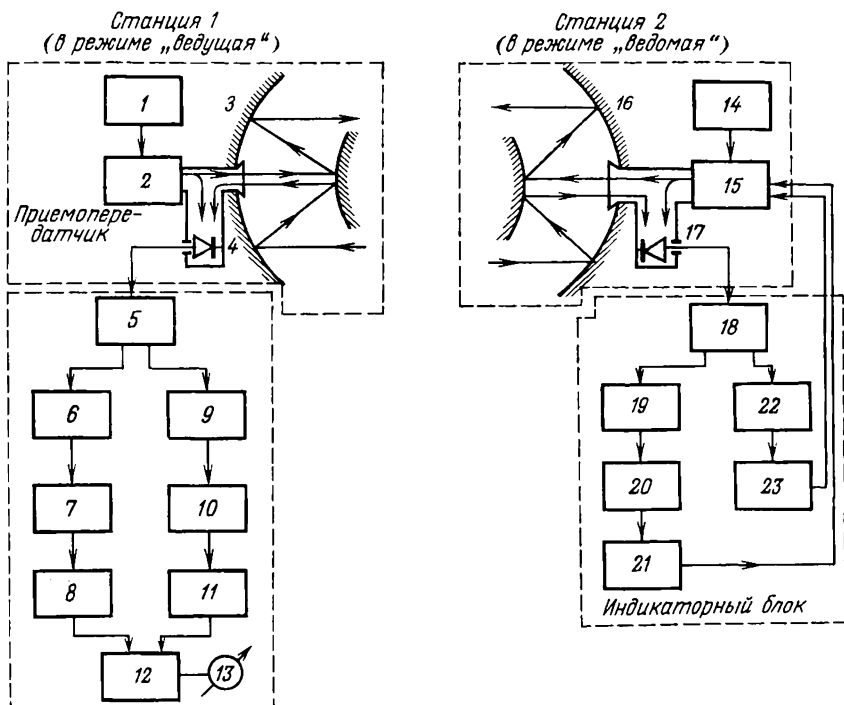


Рис. 100. Упрощенная функциональная схема радиодальномера «Луч»:

1 — генератор масштабной частоты; 2 и 15 — клистронные генераторы (источники несущих СВЧ колебаний и модуляторы); 3 и 16 — антенно-фидерные системы; 4 и 17 — СВЧ смесители; 5 и 18 — усилители промежуточной частоты (УПЧ); 6 — первый частотный детектор; 7 — усилитель поднесущей частоты; 8 — второй частотный детектор; 9 и 19 — амплитудные детекторы; 10 и 20 — усилители низкой частоты; 11 — градуированный фазовращатель; 12 — фазовый детектор; 13 — нуль-индикатор; 14 — генератор вспомогательной частоты; 21 — генератор поднесущей частоты; 22 — частотный детектор; 23 — система АПЧ

торых возбуждаются колебания с четырьмя различными частотами. Эти частоты принято обозначать прописными буквами (A, B, C и D). Частота A, равная 10 МГц, является основной масштабной частотой и используется при выполнении точных отсчетов. Частоты B, C и D, номинальные значения которых соответственно равны 9,99; 9,9 и 9 МГц, необходимы для разрешения неоднозначности. Процедура измерения на этих частотах получила название «взятие грубых отсчетов». Для реализации функциональной схемы радиодальномера в состав ведомой станции также введен кварцевый генератор 14, содержащий пять кварцевых резонаторов, с помощью которых возбуждаются колебания со следующими частотами: $f_{+A}=9,999$ МГц, $f_{-A}=10,001$ МГц, $f_B=9,989$ МГц, $f_C=9,899$ МГц и $f_D=8,999$ МГц.

Колебания от кварцевых генераторов (на ведущей и ведомой станциях) поступают соответственно в клистронные гене-

раторы 2 и 15. Клистронный генератор выполняет роль как генератора СВЧ колебаний, так и модулятора. Его частоту можно плавно изменять в пределах 200 ± 50 МГц. Такая плавная перестройка несущей частоты необходима как для взаимной настройки станций, так и для реализации методики измерений на нескольких различных несущих частотах, что позволяет ослабить влияние отраженных от подстилающей поверхности радио-сигналов на результаты измерений.

Передача информационных сигналов с одного конца измѐряемой линии на другой осуществляется с помощью частотно-модулированных колебаний трехсантиметрового диапазона, возникающих при совместной работе клистронного и кварцевого генераторов. Эти колебания по волноводным фидерам подводятся к антенным системам 3 и 16, представляющим собой зеркальные антенны (антенны Кассегрена). Ширина диаграммы направленности такой системы при диаметре зеркала примерно 0,5 м около 5° . В фидерной системе предусмотрен разветвитель, позволяющий реализовать характерный для радиодальномеров режим работы, при котором основная часть энергии от клистронного генератора излучается в направлении на удаленную станцию, а небольшая часть (примерно около 1%) ответвляется и попадает на СВЧ смеситель своей станции (соответственно 4 и 17). Кроме того, в такой фидерной системе создаются условия для беспрепятственного попадания принимаемого сигнала со входа антенны на вход СВЧ смесителя, в котором смешиваются два ЧМ сигнала (от своей и удаленной станций).

В результате смещения возникают амплитудно-модулированные колебания промежуточной частоты, причем в радиодальномере «Луч» промежуточная частота выбрана равной 33 МГц, а частота модуляции (частота биений), соответствующая разности частот кварцевых генераторов ведущей и ведомой станций, равна 1 кГц.

Эти колебания с выхода СВЧ смесителя поступают на вход усилителей промежуточной частоты 5 и 18, где производится усиление в несколько десятков тысяч раз, после чего колебания подвергаются детектированию с помощью амплитудных детекторов 9 и 19. В результате детектирования из АМ колебаний промежуточной частоты выделяются низкочастотные синусоидальные колебания с частотой 1 кГц, фаза которых зависит от величины измеряемого расстояния.

В соответствии с функциональной схемой НЧ колебания с выхода амплитудного детектора 19 ведомой станции необходимо с помощью соответствующего кодирующего устройства передать с ведомой станции на ведущую. В радиодальномере «Луч» такое кодирование осуществлено на основе генератора поднесущей частоты 21. С этой целью низкочастотный сигнал с выхода амплитудного детектора 19 через усилитель 20 поступает в генератор поднесущей частоты 21, вызывая тем самым частот-

ную модуляцию колебаний последнего. ЧМ колебания поднесущей частоты поступают в клистронный генератор 15, где происходит вторичная частотная модуляция.

В качестве декодирующего устройства на ведущей станции применена система из двух последовательно включенных частотных детекторов 6 и 8, причем вход первого из них связан с выходом усилителя промежуточной частоты 5 ведущей станции. Со второго частотного детектора 8 снимается низкочастотный синусоидальный сигнал, представляющий собой отклик на тот сигнал, который снимается с выхода амплитудного детектора 19 ведомой станции.

Для измерения разности фаз между двумя синусоидальными сигналами, возникающими на выходах амплитудного и второго частотного детекторов ведущей станции, в радиодальномере «Луч» применен компенсационный метод с использованием фазовращателя 11 и фазового детектора 12. При таком методе фазовых измерений фаза сигнала, поступающего с амплитудного детектора 9, плавно изменяется с помощью градуированного фазовращателя 11. Если разность фаз, подаваемых на фазовый детектор сигналов, равна 90 или 270°, то показания стрелочного прибора 13, включенного на выходе фазового детектора, оказываются равными нулю. Таким образом, фазовый детектор со стрелочным прибором используются в рассматриваемой схеме как индикаторное устройство, а измеряемая разность фаз снимается со шкалы фазовращателя.

Отсчетная шкала в радиодальномере «Луч» имеет 50 делений. С помощью специального приспособления со шкалы считываются разности отсчетов $\alpha_{+A}-\alpha_B$, $\alpha_{+A}-\alpha_C$, $\alpha_{+A}-\alpha_D$, $\alpha_{+A}-\alpha_{-A}$. При этом цена деления для разности отсчетов $\alpha_{+A}-\alpha_{-A}$ равна 1 нс, а для разности отсчетов $\alpha_{+A}-\alpha_D$, $\alpha_{+A}-\alpha_C$, $\alpha_{+A}-\alpha_B$ соответственно 20, 200 и 2000 нс.

В процессе разрешения неоднозначности в радиодальномере «Луч» определяют полное значение времени распространения $\tau_{\text{полн}}$ в наносекундах, а по нему — полное значение измеряемого расстояния D . Методика разрешения неоднозначности базируется на ступенчатой записи грубых и точных отсчетов. С учетом приведенных выше значений цены делений грубые отсчеты $\alpha_{+A}-\alpha_B$, $\alpha_{+A}-\alpha_C$ и $\alpha_{+A}-\alpha_D$, применяемые для поступенчатого определения $\tau_{\text{полн}}$, удваиваются. Для пояснения приведем пример записи грубых и точных отсчетов и вычисления значения $\tau_{\text{полн}}$: $\alpha_{+A}-\alpha_B=35,4$; $\alpha_{+A}-\alpha_C=04,0$; $\alpha_{+A}-\alpha_D=36,6$; $\alpha_{+A}-\alpha_{-A}=31,7$.

$$\begin{array}{r}
 2(\alpha_{+A}-\alpha_B)=70,8 \\
 2(\alpha_{+A}-\alpha_C)=08,0 \\
 2(\alpha_{+A}-\alpha_D)=73,2 \\
 \alpha_{+A}-\alpha_{-A}=31,7 \\
 \hline
 \tau_{\text{полн}}=70731,7 \text{ нс}
 \end{array}$$

Последние цифры в значении $\tau_{\text{полн}}$ уточняют в результате многократного отсчитывания на основной масштабной частоте.

За счет использования рассмотренной выше сетки масштабных частот удастся получить однозначную величину $\tau_{\text{полн}}$ в пределах до 100 000 нс, что эквивалентно расстоянию в 15 км. Если измеряемое расстояние превышает 15 км, то первая цифра, соответствующая сотням тысяч наносекунд в значении $\tau_{\text{полн}}$, приписывается на основании приближенного значения длины этой линии.

В процессе выполнения измерений с помощью метеоприборов определяют температуру, давление и влажность воздуха. Используя метеоданные и формулы (75) и (63) или специально составленные таблицы, вычисляют рабочую скорость распространения радиоволн. Искомое расстояние вычисляют по формуле

$$D = \frac{v}{2} \tau_{\text{полн}}.$$

и корректируют введением приборной поправки радиодальномера, элементов центрировки ведущей и ведомой станций, а в случае необходимости редуцируют на соответствующую поверхность.

В связи со спецификой работы радиодальномера с приемопередатчиком, установленным на мачте, в последний введено устройство, позволяющее осуществлять поворот антенной системы в горизонтальной плоскости. В состав такого устройства входит реверсивный электродвигатель, органы управления которым размещены на панели управления индикаторного блока. Кроме того, в выносном приемопередатчике имеется устройство для дистанционной механической настройки клистронного генератора. Сигнальная система и органы управления этим устройством также расположены на панели управления индикаторного блока.

Для исключения необходимости подстройки частоты клистронных генераторов, которая в процессе выполнения измерений может изменяться под воздействием различных причин (например, из-за изменений температуры воздуха или разрядки аккумуляторной батареи), в схему радиодальномера «Луч» введена система автоматической подстройки несущей частоты 23 (см. рис. 100). Такая система позволяет в случае ухода частоты одного из клистронных генераторов (ведущей или ведомой станций) сохранять неизменной величину промежуточной частоты, обеспечивая тем самым общую работоспособность станций.

Одна из станций радиодальномера «Луч» показана на рис. 101. Точкой относимости, от которой измеряется расстояние, в таком дальномере служит центр станового винта в основании блока приемопередатчика.

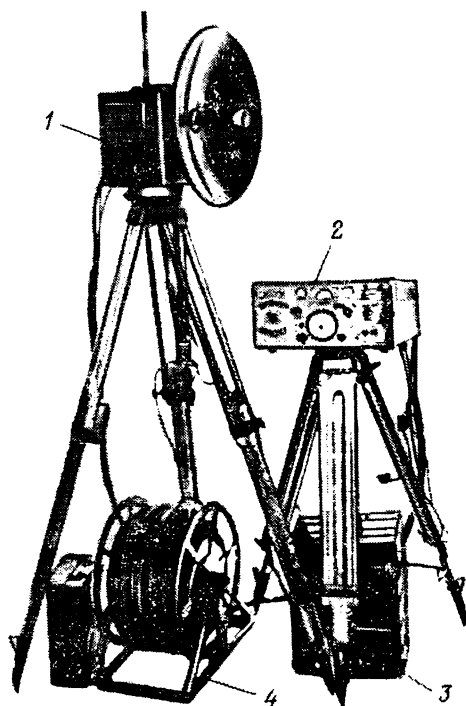


Рис. 101. Станция радиодальномера «Луч»:

1 — выносной приемопередатчик; 2 — индикаторный блок; 3 — аккумуляторная батарея;
4 — барабан с соединительным кабелем

При эксплуатации радиодальномера индикаторный блок с источником питания устанавливается вблизи от основания мачты. При неблагоприятных метеорологических условиях они могут устанавливаться внутри палатки, автомашины и в других укрытых местах. Место расположения индикаторного блока не оказывает при этом влияния на результаты измерений.

Радиядальномеры «Волна» и РДЛ

Современные достижения в области электроники, а также проведенные исследования в области радиодальномерных измерений открыли возможность создания облегченного, экономичного по питанию радиодальномера с упрощенной методикой работы. Такая возможность была реализована в радиодальномере «Волна», разработанном в ЦНИИГАиК в конце 70-х годов.

Радиядальномер «Волна» (рис. 102) предназначен для измерения длин линий при выполнении различного рода геодезиче-

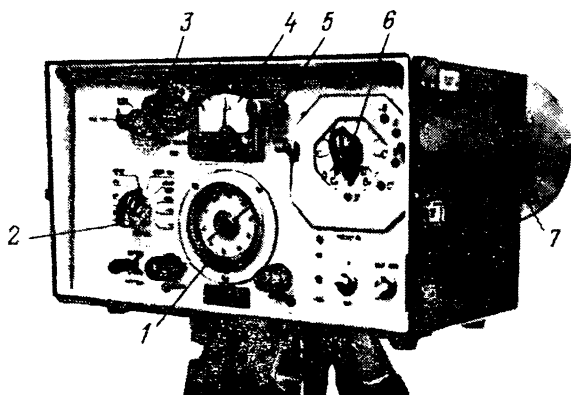


Рис. 102. Станция радиодальномера «Волна»:

1 — отсчетная шкала градуированного фазовращателя; 2 — переключатель контролируемых величин; 3 — ручка механической настройки СВЧ генератора; 4 — стрелочный прибор; 5 — ручка электронной настройки СВЧ генератора; 6 — переключатель частот кварцевого генератора; 7 — антенна

ских работ (сгущение сетей, геодезическое обоснование крупномасштабных съемок, проведение изыскательских, землеустроительных и других видов работ). Изучение специфики перечисленных геодезических работ показало, что диапазон измеряемых линий лежит в пределах от нескольких сотен метров до 15—20 км. Исходя из этого и дальность действия радиодальномера «Волна» приведена в соответствии с требованиями топографо-геодезических работ.

Средняя квадратическая погрешность измерений $\pm(3 + 3 \cdot 10^{-6}D)$ см. Диапазон несущих частот 8,6—8,9 ГГц, т. е. тот же, что и в радиодальномере «Луч».

В комплект радиодальномера «Волна» входят три взаимозаменяемые станции.

Основные принципы построения функциональной схемы радиодальномера «Волна» те же, что и в радиодальномере «Луч». Отличительные особенности электронной схемы радиодальномера «Волна» состоят в следующем:

схема дальномера полностью транзисторизована, включая и источник СВЧ колебаний (в качестве последнего использован генератор на диоде Ганна);

для упрощения методики вычисления искомой длины линии применена сетка масштабных частот, позволяющая проградуировать шкалу отсчетного устройства для принятых стандартных метеорологических условий непосредственно в единицах длины;

для уменьшения величины циклической ошибки, обусловленной взаимным влиянием радиоканалов, в схему радиодальномера введено дополнительное преобразование передаваемого с ве-

домой станции на ведущую низкочастотного сигнала (деление частоты этого сигнала на ведомой станции и соответствующее умножение частоты его на ведущей станции);

с целью уменьшения количества потребляемой прибором электроэнергии термостатирование кварцевых генераторов заменено термокомпенсацией электронной схемы этого генератора;

для ослабления влияния внутренних отражений на результаты радиодальномерных измерений повышены требования к согласованию элементов антенно-фидерного тракта и произведено упрощение конструкции этого тракта за счет использования рупорных антенн.

Перечисленные усовершенствования позволили уменьшить потребляемую одной станцией мощность до 12 Вт, отказаться от необходимости выполнения измерений на нескольких несущих частотах, сократить время прогрева станций и существенно упростить методику вычисления искомой длины линии.

За стандартные показатели метеофакторов в радиодальномере «Волна» приняты следующие значения температуры, давления и влажности воздуха: $t = +20^{\circ}\text{C}$, $p = 101,3$ кПа (760 мм рт. ст.), $e = 1,33$ кПа (10 мм рт. ст.), что соответствует скорости распространения радиоволн в атмосфере, равной $v = 299\,695,0$ км/с.

Номинальное значение основной масштабной частоты A выбрано равным 14 984 750 Гц, что для принятой скорости распространения соответствует половине длины волны, равной 10 м.

Отсчетная шкала в радиодальномере «Волна» имеет такую же конструкцию и число делений, как в радиодальномере «Луч». Она позволяет непосредственно считывать разность отсчетов при измерении на частотах $\pm A$, B , C и D . При этом цена одного деления шкалы применительно к радиодальномеру «Волна» для разности отсчетов $\alpha_{+A} - \alpha_{-A}$ равна 10 см. Непосредственно со шкалы снимают отсчеты с точностью до 0,1 деления, что в линейной мере соответствует 1 см.

Для разрешения неоднозначности в пределах до 5 км в радиодальномере «Волна» применены следующие три вспомогательные масштабные частоты: $f_B = 14\,954\,780$ Гц, $f_C = 14\,685\,055$ Гц, $f_D = 11\,987\,800$ Гц.

Для разности отсчетов $\alpha_{+A} - \alpha_D$, $\alpha_{+A} - \alpha_C$, $\alpha_{+A} - \alpha_B$ цена одного деления шкалы соответственно равна 2; 20 и 200 м.

С целью исключения циклической ошибки измерений на каждой из масштабных частот берут два отсчета, соответствующих нулевому и 180-градусному фазовому сдвигу низкочастотного сигнала на ведомой станции.

Для пояснения примененной в радиодальномере «Волна» методики определения полного значения искомой длины линии в табл. 3 приведен пример записи грубых и точных отсчетов и вычисления искомой длины линии $D_{\text{изм.}}$.

Таблица 3

Масштабная частота	Отсчет по шкале при значении фазы НЧ сигнала		Сумма отсчетов
	0°	180°	
+A—B	49,0	49,4	98
+A—C	45,0	45,0	90
+A—D	48,0	48,2	96
+A—(—A)	30,2	30,2	60,4

$2D_{изм} = 98960,4 \text{ дм}$
 $D_{изм} = 4948,02 \text{ м}$

В полученную величину $D_{изм}$ вводят поправку за уклонение реальных значений метеофакторов от принятых средних, приборную поправку радиодальномера и суммарную поправку за центрировку станций. В случае необходимости вычисленную дальность редуцируют на требуемую поверхность относимости.

В процессе дальнейшего совершенствования радиодальномера «Волна» Ереванским политехническим институтом и ЦНИИГАиК разработан портативный лаговый радиодальномер РДЛ, основная отличительная особенность которого состоит в том, что он позволяет не только измерять длину линии между двумя неподвижными точками, но и отслеживать изменения длины искомой линии, когда одна из станций установлена на движущемся объекте.

Дальномер имеет облегченную конструкцию. Каждая станция, способная работать как в режиме «ведущей», так и в режиме «ведомой», состоит из выносного приемо-передатчика массой 2,5 кг и индикаторного блока массой 3,8 кг.

Дальность действия радиодальномера РДЛ при работе в статических условиях, т. е. при измерении линий между двумя неподвижными точками, от 20 м до 5 км. При работе в динамике, когда одна из станций установлена на движущемся объекте, дальность действия уменьшается до 2 км. Средняя квадратическая погрешность измерений в статике 5 см, в динамике 15—20 см. Мощность, потребляемая одной станцией, около 12 Вт.

В первых моделях в качестве отсчетного устройства использовался механический счетчик. В последних моделях механический счетчик заменен портативным электронным цифровым фазометром, что открыло возможность регистрации величины измеряемого расстояния как с помощью светового цифрового табло, размещенного на панели управления индикаторного блока, так и передавать информацию об измеряемой дальности во внешние запоминающие устройства для обработки и регистра-

ции результатов дальномерных измерений совместно с другими измеряемыми величинами в автоматизированном режиме.

Комплект из двух пар станций радиодальномера РДЛ послужил основой для разработки портативной радиодальномерной системы, позволяющей в динамике определять плановые координаты движущегося объекта. Такая система применена в разработанной в ЦНИИГАиК автоматизированной топографической системе АТОС.

Самолетная радиодальномерная ультракоротковолновая система РДС

Самолетная радиодальномерная система РДС, разработка которой выполнена в ЦНИИГАиК, предназначена для определения в полете плановых координат самолета, используемого при проведении аэрофототопографических и геодезических работ.

В состав системы входят самолетная и две-три наземные станции. Такой комплект позволяет производить измерения одновременно по двум-трем дальномерным каналам. Дальность действия системы при наличии прямой видимости — до 350 км. Точность измерений на таких протяженных линиях существенно зависит от влияния внешних условий. Для системы РДС точность измерений порядка нескольких метров.

Система РДС базируется на тех же принципах действия, что и рассмотренные выше радиодальномеры «Луч» и «Волна». Основные отличительные особенности схемы РДС обусловлены, в первую очередь, спецификой выполнения измерений в динамике. Кроме того, они продиктованы необходимостью рационального объединения отдельных узлов при создании двух- или трехканальной системы. Для иллюстрации этих особенностей на рис. 103 приведена упрощенная функциональная схема РДС, предусматривающая одновременную работу с двумя наземными станциями.

Роль ведущей станции на данной схеме выполняет самолетная станция, причем передающая часть является общей при работе с двумя наземными станциями. Масштабные колебания, длина волны которых задает отрезок длины, которым измеряется искомое расстояние, возбуждаются в кварцевом генераторе 2. Основная масштабная частота выбрана равной $f_A = 1,498\,475$ МГц, что в линейной мере при принятых средних метеорологических условиях [$t = +20^\circ\text{C}$; $p = 101,3$ кПа (760 мм рт. ст.); $e = 1,33$ кПа (10 мм рт. ст.)] соответствует 100 м. Для разрешения неоднозначности в пределах до 10 км в кварцевом генераторе 2 предусмотрены две дополнительные масштабные частоты ($f_A' = 0,9f_A = 1,348\,628$ МГц и $f_A'' = 0,99f_A = 1,483\,490$ МГц).

Генератор несущей частоты 3 самолетной станции работает на частоте 350 МГц, что соответствует длине волны 0,86 м (дециметровый поддиапазон ультракоротких волн).

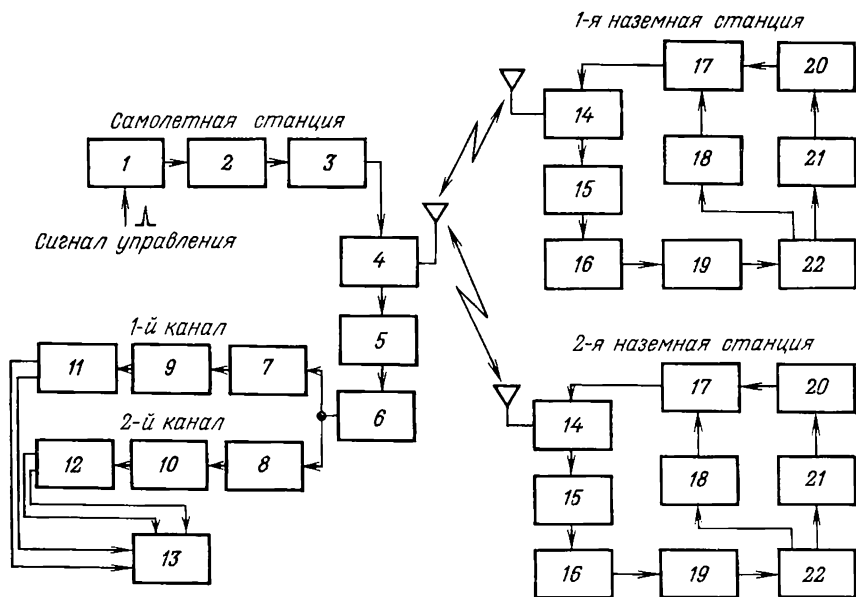


Рис. 103. Упрощенная функциональная схема самолетной радиодальномерной системы РДС:

1 — электронный коммутатор; 2 — кварцевый генератор масштабных частот; 3 и 17 — генераторы несущей частоты; 4 и 14 — разветвители; 5 и 15 — усилители высокой частоты; 6 и 16 — смесители; 7, 8 и 19 — УПЧ; 9, 10 и 22 — амплитудные детекторы; 11 и 12 — блоки разделения опорного и информационного сигналов; 13 — двухканальное фазоизмерительное устройство; 18 — формирователь импульсов; 20 — кварцевый генератор переключаемых вспомогательных частот; 21 — блок выделения сигналов управления

Такой выбор диапазона несущих частот предопределяет необходимость работы с наземными станциями в пределах прямой видимости.

Для управления несущими колебаниями применена амплитудная модуляция. В качестве антенной системы самолетной станции использован вертикальный четвертьволновый штырь, имеющий круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости и задающий вертикальную плоскость поляризации излучаемых колебаний.

Для реализации возможности одновременной работы самолетной станции с несколькими наземными станциями применен принцип частотной селекции. При этом несущая частота каждой из наземных станций отличается от несущей частоты самолетной станции на различную величину. Так, например, если несущая частота 1-й наземной станции (см. рис. 103) выбрана равной 314 МГц, то несущая частота 2-й наземной станции принята при этом равной 322 МГц. В результате промежуточные частоты, на которые настраиваются усилители промежуточной частоты (УПЧ), также имеют различные значения (для первого дальномерного канала эта частота равна 36 МГц, а для второго

дальномерного канала — 28 МГц). Для более полной развязки двух дальномерных каналов низкая частота, на которой выполняются фазовые измерения, выбрана различной для обоих каналов. Так, если вспомогательные частоты кварцевого генератора 1-й наземной станции отличаются по своим номинальным значениям от соответствующих масштабных частот самолетной станции на 1500 Гц, то для 2-й наземной станции это отличие составляет 1400 Гц.

С целью повышения дальности действия на наземных станциях применены антенны направленного действия. Конструктивно такая антенна состоит из полуволнового вибратора, расположенного в створе уголкового отражателя, образующего плоский двугранный угол, равный 90° . Ширина диаграммы направленности такой антенны в горизонтальной плоскости равна $60-70^\circ$.

Принципы работы приемных трактов наземных станций РДС во многом совпадают с принципами работы рассмотренных ранее ведомых станций радиодальномеров. Одна из специфических особенностей состоит в том, что смещение сигналов от удаленной самолетной станции и от своего собственного генератора несущей частоты производится после предварительного усиления этих колебаний с помощью усилителя высокой частоты. В смесительном каскаде, подключенном к выходу усилителя, образуются при этом колебания промежуточной частоты, которые, так же как и в случае использования частотно-модулированных несущих колебаний, оказываются промодулированными по амплитуде с частотой биений, равной разности модулирующих частот самолетной и наземной станций. Эти биения, имеющие форму синусоидальных колебаний, выделяются амплитудным детектором, включенным на выходе УПЧ, преобразуются затем в импульсные сигналы и передаются с помощью амплитудно-импульсной модуляции несущих колебаний наземной станции на самолетную.

В приемном тракте самолетной станции сигналы, одновременно принимаемые от двух наземных станций, разделяются двумя УПЧ, настроенными на различные промежуточные частоты. С удаленной наземной станции передается импульсный сигнал и синусоидальный сигнал, образующийся в результате биений АМ колебаний несущих частот самолетной и наземной станций. Сигналы разделяются на выходе амплитудного детектора соответствующего дальномерного канала с помощью амплитудных ограничителей, входящих в состав блока разделения опорного и информационного сигналов.

В качестве двухканального фазоизмерительного устройства в первых моделях РДС использовалась электронно-лучевая трубка с линейной ждущей разверткой. Отсчеты в таком фазометре снимаются с фотопленки, которая размещается перед экраном трубки и на которую проектируется изображение, воз-

никающее на экране. В последних моделях РДС фазоизмерительное устройство заменено электронными цифровыми фазометрами.

Необходимость выполнения измерений в движении накладывает свой отпечаток и на процесс разрешения неоднозначности, к которому предъявляются такие дополнительные требования, как быстроедействие и обеспечение синхронного переключения модулирующих частот на удаленных друг от друга самолетной и наземной станциях. Для выполнения этих требований ручное переключение частот модуляции приходится заменять автоматическим с введением системы дистанционного переключения.

В РДС эта задача решена за счет введения на самолетной станции электронного коммутатора, управление работой которого производится с помощью импульсных сигналов, поступающих от командного устройства, находящегося на борту самолета. При этом по поступившей команде осуществляется переключение масштабных частот в предписанной последовательности. Для синхронного переключения частот кварцевого генератора на наземной станции в схему последней введен блок выделения сигналов управления. Принцип действия блока базируется на выделении с помощью фильтров, включенных на выходе амплитудного детектора, сигналов с частотой, которая образуется в результате взаимодействия сигнала масштабной частоты, возникающего после произведенного переключения на самолетной станции, с модулирующим сигналом кварцевого генератора наземной станции, существовавшим до того момента, когда было выполнено переключение.

При разрешении неоднозначности необходимо, чтобы отсчеты на основной и дополнительной масштабных частотах, из которых образуется используемая при обработке разность отсчетов, относились к одному и тому же моменту времени. После каждого перехода на дополнительную масштабную частоту осуществляется обратный переход на основную масштабную частоту, т. е. измерения выполняются в следующей последовательности: f_A , $f_{A'}$, f_A , $f_{A''}$ и f_A .

Практически регистрация измеряемых расстояний на основной масштабной частоте f_A осуществляется в системе РДС непрерывно. Только в определенные моменты времени по сигналам, поступающим от командного прибора, измерения выполняются с использованием дополнительных масштабных частот $f_{A'}$ и $f_{A''}$, а также вспомогательных частот f_B^- и f_B^+ . Это позволяет получить полные значения измеряемых дальностей в пределах до 10 км и определить величину поправки γ , которая вызвана фазовыми задержками электрических сигналов при их прохождении по цепям самолетной и соответствующей наземной станций.

Для возможности редуцирования измеряемых наклонных дальностей на земную поверхность в комплект аппаратуры,

устанавливаемой на самолете, включают радиовысотомер и статоскоп, с помощью которых регистрируются высота полета самолета над местностью и изменения высоты полета.

С целью определения поправок за влияние метеоусловий на борту самолета в необходимых случаях устанавливается электрометеорограф, а на наземных станциях — барометр-анероид и психрометр Ассмана.

При определении с помощью РДС плановых координат центров проекции аэроснимков используют одноразовые измерения расстояний. В тех случаях, когда с помощью РДС методом пересечения створа определяют длину линии на земной поверхности, которая входит в те или иные геодезические построения, используют серию измерений, соответствующих многократным (8—10) пересечениям створа.

При обработке результатов измерений системой РДС в полученные значения дальностей вводят следующие поправки: приборная поправка соответствующей пары станций (самолетной и наземной), за уход масштабной частоты от своего номинального значения, за кривизну радиолуча, редуцированные за приведение измеренного расстояния к исходным точкам, находящимся на отсчетной поверхности.

Морская радиодальномерная ультракоротковолновая система ГРАС

Разработанная отечественной промышленностью морская радиодальномерная система ГРАС предназначена для определения координат судов (плавсредств) при выполнении гидрографических, топографо-геодезических и других видов работ, проводимых в шельфовых районах.

Радиядальномерная система ГРАС, так же как и РДС, относится к круговым системам, позволяющим одновременно и независимо измерять две дальности до береговых станций с последующим вычислением плановых координат движущегося объекта методом линейной засечки. В состав системы входят одна корабельная (бортовая) и две береговые станции.

Система ГРАС работает в сантиметровом диапазоне радиоволн. Дальность действия системы при обеспечении между корабельной и береговыми станциями прямой видимости — около 60 км. Приборная точность измерений $\pm (0,7 + 1 \cdot 10^{-5} D)$ м. Реальная точность с учетом влияния внешних условий и погрешностей вводимых в результаты измерений различного рода поправок $\pm (1—3)$ м.

Система базируется на тех же принципах действия, что и рассмотренные выше радиодальномеры. Для обеспечения одновременной работы с двумя береговыми станциями применен метод частотной селекции.

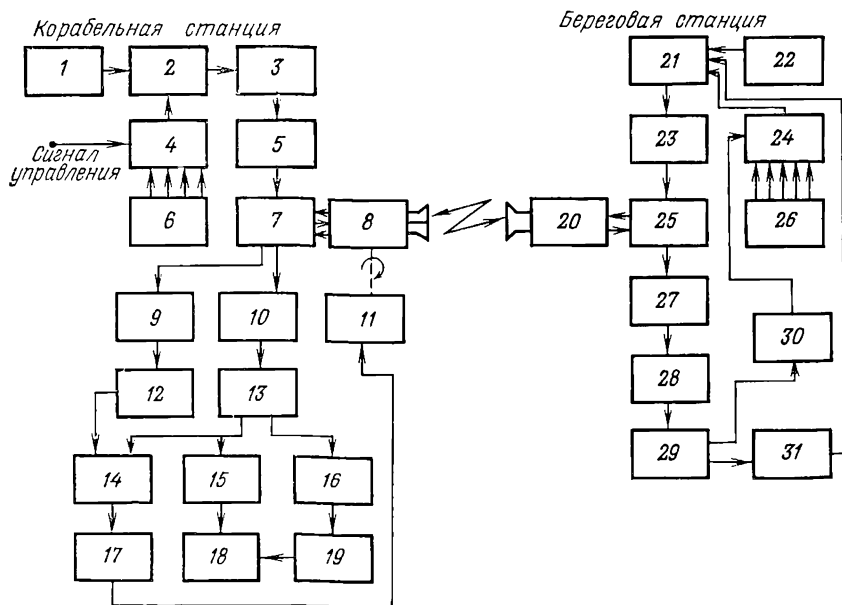


Рис. 104. Упрощенная функциональная схема одного дальномерного канала морской радиодальномерной системы ГРАС:

1 и 22 — возбуждители несущих колебаний; 2 и 21 — фазовые модуляторы; 3 и 23 — умножители частоты; 4, 5 и 24 — коммутаторы; 6 — кварцевый генератор масштабных частот; 7 и 25 — разветвители; 8 — двояная антенна; 9, 10 и 27 — СВЧ смесители; 11 — электродвигатель; 12, 13 и 28 — УПЧ; 14 — фазовый детектор; 15 и 29 — амплитудные детекторы; 16 — первый частотный детектор; 17 — схема управления электродвигателем; 18 — электронный цифровой фазометр; 19 — второй частотный детектор; 20 — антенна; 26 — кварцевый генератор вспомогательных частот; 30 — селектор сигнала управления; 31 — генератор поднесущей частоты

Для увеличения дальности действия при ограниченной мощности излучения на корабельной станции применены антенные системы направленного действия с устройствами автоматического наведения их в направлении на береговые станции. Такое техническое решение обусловило необходимость использования на корабельной станции двух отдельных передающих устройств (передатчик каждого дальномерного канала работает со своей береговой станцией). Ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости 14° , а в вертикальной — 16° .

С целью обслуживания одной парой береговых станций нескольких судов, находящихся в их сфере обслуживания, передатчики корабельных станций работают в прерывающемся режиме.

Поскольку оба дальномерных канала в системе ГРАС базируются на использовании одних и тех же схемных решений, то для пояснения особенностей работы системы на рис. 104 приведена упрощенная функциональная схема одного дальномерного канала ГРАС. Величину отрезка, которым измеряют зна-

чения искоемых дальностей, задают кварцевые генераторы масштабных частот корабельной станции, которая выполняет роль ведущей станции. При этом для обоих дальномерных каналов основная масштабная частота $f_A = 1,498\,468$ МГц, что для принятого среднего значения показателя преломления воздуха, равного 1,000330, соответствует линейному эквиваленту, равному 100 м (половинное значение длины волны модулирующих колебаний). Для разрешения неоднозначности в схеме каждого дальномерного канала предусмотрены три дополнительные масштабные частоты: $f_B = 1,348621$ МГц, $f_C = 1,483483$ МГц и $f_D = 1,496970$ МГц, что позволяет получать однозначное значение измеряемой дальности в пределах до 100 км.

Для автоматического переключения масштабных частот в схеме корабельной станции предусмотрен коммутатор 4 (см. рис. 104), переключение электрических цепей в котором осуществляется с помощью внешнего управляющего сигнала, поступающего от соответствующего командного устройства.

Формирование несущих колебаний и управление ими посредством воздействия сигналов масштабной частоты осуществляется в системе ГРАС с помощью нескольких различных электрических узлов. В связи с тем, что работа в системе ГРАС осуществляется на строго фиксированных несущих частотах (для первого дальномерного канала значение несущей частоты корабельной станции принято $f_1 = 4145$ МГц, а для второго дальномерного канала — $f_2 = 4200$ МГц), то в качестве возбудителей несущих колебаний применены генераторы с кварцевой стабилизацией частоты. Модуляция несущих колебаний осуществляется при этом с помощью отдельного устройства — фазового модулятора, на который через коммутатор 4 поступают управляющие сигналы от генератора масштабных частот.

Возникающие на выходе фазового модулятора 2 фазомодулированные колебания по своим основным параметрам аналогичны частотно-модулированным колебаниям, что позволяет применять при их дальнейшей передаче, преобразовании и детектировании те же технические средства и методы, которые использовались в рассмотренных ранее радиодальномерах с частотной модуляцией несущих колебаний. Фазомодулированные (ФМ) колебания через умножитель частоты 3, коммутатор 5 и разветвитель 7 поступают в антенную систему 8 корабельной станции, представляющую собой сдвоенный рупор, на основе которого реализована система автоматического наведения и отслеживания направления на береговую станцию.

Передающая часть береговой станции системы ГРАС имеет аналогичную схему построения. Вспомогательные частоты модуляции, необходимые для реализации низкочастотного метода, лежащего в основе всех рассмотренных выше радиодальномеров и радиодальномерных систем, возбуждаются с помощью дистанционно переключаемого кварцевого генератора 26. Номинальные

значения этих частот отличаются от соответствующих масштабных частот f_A , f_B , f_C и f_D корабельной станции в сторону уменьшения на величину $F_1=5,6$ кГц для первого дальномерного канала и $F_2=6,4$ кГц для второго дальномерного канала.

Для реализации методики исключения фазовых задержек на береговых станциях предусмотрены частоты f_{+A} и f_{-A} , отличающиеся от основной масштабной частоты f_A на величину $\pm F_1$ и $\pm F_2$ соответственно для первой и второй береговых станций.

Несущие колебания на береговых станциях, так же как и на корабельной, возбуждаются в генераторе с кварцевой стабилизацией частоты. Их модуляция осуществляется с помощью фазового модулятора 21. При этом для первой береговой станции номинальное значение несущей частоты выбрано $f_1'=4125$ МГц, а для второй — $f_2'=4228$ МГц. Исходя из этого, промежуточная частота для первого дальномерного канала оказывается равной 20 МГц, а для второго — 28 МГц.

В качестве антенной системы на береговых станциях используется рупорная антенна 20 с расширенной диаграммой направленности: в горизонтальной плоскости ширина диаграммы 90° , а в вертикальной — 16° . Расширение диаграммы в горизонтальной плоскости позволяет исключить необходимость автоматического отслеживания за направлением на корабельную станцию в процессе выполнения работ.

Приемный тракт береговой станции построен по тому же принципу, что и рассмотренные выше радиодальноммеры. На вход смесителя 27 со стороны разветвителя 25 (см. рис. 104) поступают два ФМ сигнала несущей частоты: от удаленной корабельной станции и от своего передающего устройства. Возникающий при этом на выходе СВЧ смесителя амплитудно-модулированный сигнал промежуточной частоты усиливается резонансным УПЧ 28. Резонансная частота такого усилителя для одной береговой станции равна 20 МГц, а для другой — 28 МГц.

Выделяемый с помощью амплитудного детектора 29 информационный сигнал, соответствующий «огibaющей» АМ колебаний промежуточной частоты и несущий информацию о величине измеряемого расстояния, также имеет различную частоту для двух береговых станций: для одной из них 5,6 кГц, для другой — 6,4 кГц. Передача этого сигнала с береговой станции на корабельную осуществляется тем же способом, что и в радиодальномере «Луч», т. е. с использованием модулируемого по частоте генератора поднесущей частоты 31 ($f_{пн}=100$ кГц).

Дистанционное переключение частот кварцевого генератора береговой станции f_{+A} , f_{-A} , f_B' , f_C' и f_D' осуществляется с помощью коммутатора 24 синхронно с масштабными частотами корабельной станции по заранее заданной программе. Командным сигналом для начала переключения частот служит кратковременная посылка с корабельной станции сигнала с частотой f_C . Выделяемый на выходе амплитудного детектора 29 бе-

реговой станции сигнал управления, имеющий частоту $F_{\text{упр}} = f_{+A} - f_c$ (для одной береговой станции $F_{\text{упр}} = 9,385$ кГц, для другой — $F_{\text{упр}} = 8,585$ кГц), фильтруется соответствующим селектором 30 и подается на коммутатор 24 переключения частот кварцевого генератора береговой станции.

В системе ГРАС принята следующая последовательность переключения частот: f_{+A} , $f_{B'}$, f_{+A} , $f_{C'}$, f_{+A} , $f_{D'}$, f_{+A} , f_{-A} , f_{+A} . Продолжительность работы на каждой из перечисленных частот равна 25,6 мс.

Отличительная особенность работы приемного тракта корабельной станции состоит в том, что на выходе тракта необходимо выделить не только информационный и опорный сигналы, фазовое соотношение между которыми используется для определения величины искомой дальности, но и сигнал, позволяющий автоматически наводить антенную систему в направлении на требуемую береговую станцию. В связи с этим приемный тракт каждого дальномерного канала реализован в виде двух параллельно работающих электрических цепей, на вход каждой из которых поступает сигнал от одной из антенн, входящих в состав сдвоенного антенного комплекса. Включенный на выходах двух УПЧ 12 и 13 фазовый детектор 14 формирует сигнал рассогласования, величина которого зависит от отклонения сдвоенной антенны от направления прихода электромагнитных волн от удаленной береговой станции. Сигнал через схему управления 17 воздействует на электродвигатель 11, с помощью которого осуществляется ориентировка антенны корабельной станции. Критерием наведения антенны в нужном направлении является нулевое значение величины сигнала рассогласования.

Принцип выделения информационного и опорного сигналов, поступающих на вход электронного цифрового фазометра 18, тот же, что и в радиодальномере «Луч». Для двух дальномерных каналов корабельной станции, входящей в систему ГРАС, выбраны различные значения частот фазосравниваемых сигналов (5,6 и 6,4 кГц).

С помощью двух электронных цифровых фазометров на световых табло одновременно высвечиваются значения двух измеряемых расстояний до соответствующих береговых станций. Эти значения оцифрованы непосредственно в метрах с дискретностью 0,1 м.

В системе ГРАС предусмотрена возможность выдачи получаемой информации во внешние запоминающие и обрабатывающие устройства.

Управление работами коммутаторов, входящих в состав корабельной станции, осуществляется с помощью сигнала запуска, поступающего от устройства управления (на рис. 104 это устройство не показано). Продолжительность рабочего цикла на каждой из масштабных частот выбрана равной 25,6 мс. Общее время, на которое включается передатчик для однократного изме-

рения полного значения дальности, равно 230 мс. Такая кратковременная работа передатчика корабельной станции обусловлена необходимостью обслуживания одной парой береговых станций нескольких плавсредств.

В системе ГРАС предусмотрено три режима запуска: ручной (нажатием кнопки); по сигналам, поступающим от эхолота или какого-либо другого внешнего командного устройства, и автоматический (через равные интервалы времени: 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 или 256 с).

Процесс измерений системой ГРАС включает в себя два основных этапа — подготовительный и рабочий. Первый предусматривает установку станций (как на берегу, так и на корабле), предварительную проверку работоспособности, ориентировку антенн в нужных направлениях и установление радиосвязи между взаимодействующими станциями. На втором этапе производится оперативное измерение дальностей в те моменты времени, которые предусмотрены программой выполнения тех или иных работ.

При последующей обработке результатов измерений в них вводят следующие поправки: за влияние внешних условий, за положение электрического центра (приборная поправка), за редуцирование на требуемую отсчетную поверхность и др. Откорректированные значения используют для вычисления плановых координат точек снимаемой акватории и оценки точности их определения.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. По каким признакам классифицируются современные светодальномеры? Назовите группы, в которые они объединяются.

2. Сформулируйте требования, которые предъявляются к светодальномерам различных групп.

3. Поясните назначение основных составных частей оптической системы, изображенной на рис. 84.

4. Объясните назначение и взаимодействие отдельных узлов, входящих в состав функциональной схемы светодальномера «Кварц» (рис. 84).

5. Охарактеризуйте основные особенности методики разрешения неоднозначности, используемой в светодальномере «Кварц».

6. Сопоставьте технические характеристики и схемные решения для светодальномеров «Кварц» и «Гранат». Обоснуйте целесообразность усовершенствований, сделанных в светодальномере «Гранат».

7. Исходя из каких предпосылок выполнен расчет сетки масштабных частот в светодальномере «Гранат»?

8. Перечислите основные этапы, из которых складывается

процесс измерений и последующих вычислений в светодальномере «Гранат».

9. Поясните особенности работы светодальномера СТ-3.

10. Чем отличается методика разрешения неоднозначности, примененная в светодальномере СТ-3, от аналогичных методик, используемых в других типах светодальномеров?

11. Какие основные требования предъявляются как к составным частям, так и ко всей конструкции в целом для светодальномеров группы Т?

12. Объясните принцип действия функциональной схемы светодальномера 2СМ-2 (см. рис. 89).

13. Обоснуйте необходимость введения схемы установки начальных отсчетов в дальномере 2СМ-2.

14. Какие основные причины ограничивают дальность действия светодальномера 2СМ-2?

15. В чем состоят основные отличия принципов действия светодальномеров СМ-5 и 2СМ-2?

16. Поясните особенности работы функциональной схемы, приведенной на рис. 93.

17. Какие этапы измерительного процесса автоматизированы в светодальномере СМ-5?

18. Перечислите основные источники ошибок, свойственные светодальномеру СМ-5. Какие меры принимаются для уменьшения их влияния?

19. Проведите сравнение основных технических характеристик светодальномеров СТ 5 и СМ-5. За счет каких технических решений удалось существенно улучшить эти характеристики у дальномера СТ 5?

20. Объясните принцип действия светодальномера ЕОК 2000 на основе анализа функциональной схемы, приведенной на рис. 96.

21. Сформулируйте основные требования, которые предъявляются к светодальномерам группы П.

22. За счет каких технических решений удастся существенно повысить приборную точность светодальномеров?

23. Охарактеризуйте основные особенности работы светодальномера ДК 001 и поясните его функциональную схему, изображенную на рис. 98.

24. Для чего в светодальномере ДК 001 используются режимы «Грубо» и «Точно»?

25. Какой метод регистрации разности фаз применен в дальномере МСД1М?

26. Поясните взаимодействие отдельных узлов схемы, приведенной на рис. 99.

27. Перечислите отличительные особенности работы дифференциальных светодальномеров типа ДВСД.

28. Проведите сравнительный анализ эксплуатационных характеристик светодальномеров и радиодальномеров. Назовите

перспективные области применения для тех и других дальномеров.

29. В чем состоит основное отличие радиогеодезических (или радиодальномерных) систем от радиодальномеров?

30. Какие функции в радиодальномерах выполняют ведущая и ведомая станции? С какой целью эти функции совмещают в одной станции?

31. Зачем в станциях радиодальномера «Луч» приемопередатчики отделены от индикаторных блоков?

32. Изменятся ли результаты радиодальномерных измерений, если в процессе работы радиодальномера произвести перемещение вдоль измеряемой линии: а) индикаторного блока; б) приемопередатчика?

33. Перечислите преимущества и недостатки радиодальномера «Волна» в сравнении с радиодальномером «Луч».

34. За счет каких мер удается осуществить градуировку отсчетного устройства дальномеров непосредственно в линейной мере?

35. Укажите основные отличительные особенности радиодальномера РДЛ.

36. Для каких целей предназначена радиодальномерная система РДС? Каковы ее основные технические характеристики?

37. Укажите основные отличительные особенности самолетной радиодальномерной системы РДС в сравнении с наземными радиодальномерами.

38. Объясните принцип дистанционного автоматического переключения частот кварцевого генератора наземной станции.

39. За счет каких мер удастся обеспечить в РДС одновременную независимую работу с двумя-тремя наземными станциями?

40. Зачем в радиодальномерных системах, предназначенных для измерения дальностей с подвижных объектов, уменьшают значения масштабных частот?

41. Для решения каких задач предназначена радиодальномерная система ГРАС?

42. Какие дополнительные меры приходится применять в радиодальномерных системах для уверенного разрешения неоднозначности при работе на движущихся объектах?

Глава IV

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛИН ЛИНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ДАЛЬНОМЕРАМИ

§ 30. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основной задачей дальномерных измерений (как и других видов геодезических измерений) является получение измеряемой величины с требуемой точностью наиболее экономичными методами.

Используемые в топографо-геодезических работах методы дальномерных измерений обработки получаемых результатов существенно зависят от требуемой точности. В связи с этим уже на стадии разработки дальномеров значительное внимание уделяют исследованиям различных источников ошибок и отработке методов исключения или существенного ослабления влияния выявленных источников.

Ошибки измерений тех или иных физических величин принято подразделять на систематические и случайные. Оба вида ошибок характерны и для дальномерных измерений. Систематические ошибки удается уменьшить за счет применения специально разрабатываемых методов измерений. Влияние случайных ошибок можно существенно ослабить посредством выполнения многократных измерений одной и той же величины. При этом количество измерений зависит от соотношения величин, характеризующих систематическую и случайную ошибки (число измерений, используемых для уменьшения случайных ошибок, целесообразно выбирать таким, чтобы случайная ошибка измерений была несколько меньше систематической).

Несмотря на большое разнообразие свето- и радиодальномеров, общность физических принципов позволяет в обобщенном виде проанализировать влияние отдельных источников ошибок, рассмотреть методы измерения длин линий на местности и обосновать рациональные методы обработки результатов дальномерных измерений. Краткому изложению перечисленных проблем и посвящена настоящая глава.

§ 31. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК ДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для выявления и анализа влияния основных источников ошибок на результаты дальномерных измерений воспользуемся обобщающей рабочей формулой для вычисления измеренной дальномером линии, которая может быть представлена в следующем виде:

$$D = \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \frac{v}{2f} + \Sigma K, \quad (164)$$

где N — целое число отрезков длины, укладываемых в измеряемом расстоянии (таким отрезком, как правило, служит половинное значение длины волны основных масштабных колебаний); $\Delta\varphi$ — разность фаз, измеряемая фазометром; $v=c/n$ — рабочая скорость распространения электромагнитных волн в атмосфере; c — скорость электромагнитных волн в вакууме; n — среднее значение показателя преломления воздуха вдоль траектории распространения электромагнитных волн; f — основная масштабная частота; ΣK — сумма поправок, вводимых в получаемое при измерениях значение длины линии.

С целью подсчета результирующей точности определения длины линии D на основе знания погрешностей определения отдельных входящих в формулу (164) величин находят частные производные от значения D по каждой из них, возводят их в квадрат и суммируют.

При выполнении этих процедур необходимо учитывать особенность определения величины N . По своему физическому смыслу N является целым числом, поэтому при вычислениях ее округляют до целого. Таким образом, в практике дальномерных измерений всегда оперируют с числом N , ошибка которого равна нулю. Если же при вычислении N допущена ошибка, то она обязательно равна целому числу, что приводит к грубым промахам. Результаты таких измерений исключают. Поэтому при оценке погрешности определения D число N считают безошибочным.

С учетом вышеизложенного формула для априорного подсчета средней квадратической погрешности длины линии D принимает вид

$$m_D = \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi} \frac{v}{2f} m_{\Delta\varphi}\right)^2 + D^2 \left[\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_v}{v}\right)^2\right] + m_{\Sigma K}^2}, \quad (165)$$

где средние квадратические погрешности: $m_{\Delta\varphi}$ — фазовых измерений; m_f — определения масштабной частоты; m_v — определения рабочей скорости распространения электромагнитных волн в атмосфере; $m_{\Sigma K}$ — определения поправок, которые приходится учитывать в процессе вычисления окончательного значения искомой длины линии.

Формула (165) не является достаточно строгой. Во-первых, при ее выводе сделано допущение о независимом характере всех рассмотренных выше источников ошибок. Практически такая независимость очень часто не обеспечивается. Во-вторых, исходная формула (164) базируется на целом ряде предположений, которые в реальных условиях могут нарушаться. Так, например, при ее выводе предполагалось, что электромагнитные волны распространяются по прямолинейной траектории, соединяющей конечные точки измеряемой линии. При прохождении электромагнитных волн через атмосферу наблюдается искривление тра-

ектории, что в отдельных случаях приводит к необходимости введения дополнительных поправок. При измерении длин линий радиодальномерами из-за влияния отражений на вход приемного устройства попадают радиосигналы, прошедшие расстояние между конечными точками линии как по прямому пути, так и по ломаному. Такая ситуация также не учитывалась при выводе формулы (164), в то время как погрешности из-за отражений в отдельных случаях могут значительно превышать все остальные погрешности определения отдельных параметров. В некоторых типах светодальномеров заметным источником ошибок является «фазовость» светового пучка, также не поддающаяся учету при выводе основной рабочей формулы дальномерных измерений.

Исходя из вышеизложенного, проанализируем совокупность источников ошибок, оказывающих существенное влияние на результаты дальномерных измерений. При этом не явно выраженные источники ошибок могут быть учтены в слагаемом $m_{\Sigma K}$ из формулы (165).

Ошибки фазовых измерений

В современных геодезических свето- и радиодальномерах фазового или импульсно-фазового типа измеряемая фазометром разность фаз между сигналами, несущими информацию о величине искомой длины линии, является основным параметром таких дальномеров. Точность измерения этого параметра оказывает во многих случаях определяющее влияние на результирующую приборную точность того или иного дальномера.

Анализ выполненных исследований свидетельствует о том, что точность фазовых измерений зависит как от особенностей работы выбранного типа фазометра, так и от параметров фазосравняемых сигналов. При этом измеряемая величина $\Delta\varphi$ в большинстве случаев оказывается отягощенной ошибками как систематического, так и случайного характера.

Так, например, нерегулярные процессы, происходящие в атмосфере, а также шумы, свойственные тем или иным узлам дальномера, через которые проходят информационные и опорные сигналы, приводят к хаотическим изменениям измеряемой разности фаз и, как следствие, к появлению случайных ошибок фазовых измерений.

Для уменьшения влияния таких ошибок в фазометрах аналогового типа широко применяют метод осреднения с использованием различного рода интегрирующих устройств (включение перед индикаторным прибором электрической цепи с большой постоянной времени, погружение подвижной части стрелочного индикаторного прибора в вязкую жидкость и т. д.). В современных электронных цифровых фазометрах дискретного типа,

где разность фаз определяется из измерений временного интервала между соседними двумя импульсами в пределах одного периода фазосравниваемых колебаний, для уменьшения случайных ошибок не ограничиваются взятием отсчетов по одной паре импульсов, т. е. в пределах одного периода. В фазометрах такого типа используют принцип накапливания информации по 100 периодам и более, и на отсчетное табло выдается осредненный результат.

Систематические ошибки, характерные для выполняемых в дальнометрах фазовых измерений, обусловлены: 1) несовершенством схемы или конструкции используемого фазометра, 2) отклонениями параметров реальных фазосравниваемых сигналов от заданных (в частности, искажениями формы сигналов, уходами их частоты и т. д.). Систематические ошибки могут иметь постоянную величину в пределах всей шкалы фазометра или изменяться по определенному закону.

Для уменьшения влияния первой разновидности ошибок в дальномерной технике широко используют метод разностных отсчетов. Так, например, в светодальнометрах при выполнении измерений на удаленный отражатель, а затем по линии короткого оптического замыкания с последующим использованием разности отсчетов [см. формулу (80)] все ошибки, которые сохраняют одно и то же значение в этих двух измерениях, исключаются. В радиодальнометрах аналогичные результаты достигаются за счет измерений на частотах $+A$ и $-A$ [см. формулу (97)].

Влияние второй разновидности систематических ошибок, которые в пределах шкалы фазометра подвержены циклическим изменениям, удастся уменьшить за счет использования специальных методов, основная сущность которых заключается в том, что искомая разность фаз отсчитывается по шкале дважды в различных ее участках, где циклическая погрешность имеет одинаковую величину, но противоположна по знаку. Во многих случаях эта цель достигается тем, что в процессе измерений фазу одного из фазосравниваемых сигналов изменяют на 180° . В отдельных случаях для более полного исключения циклических ошибок измерения выполняют также и со сдвигом сигнала на 90 и 270° .

Используемые в современных дальнометрах фазометры позволяют в сочетании с упомянутыми выше методами измерять искомую разность фаз с относительной ошибкой $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$. В соответствии с соотношением (165) эквивалентная этим ошибкам погрешность в длине измеряемой линии зависит также от выбранной масштабной частоты (или соответствующей ей длины волны масштабных колебаний λ_m):

$$m_{\Delta D} = \frac{v}{2f} \frac{m_{\Delta \Phi}}{2\pi} = \frac{\lambda_m}{2} \frac{m_{\Delta \Phi}}{2\pi}. \quad (166)$$

В светодальномерах группы Т значение λ_m выбирается в большинстве случаев равным 20 м. Для такой длины волны погрешность фазовых измерений обуславливает ошибки в длине искомого расстояния, лежащие в пределах от 1 до 10 мм.

Ошибки, обусловленные неточностью знания масштабной частоты

Поскольку масштабная частота определяет длину волны модулирующих колебаний, т. е. длину используемого при дальномерных измерениях «метра», то все отклонения этой частоты от заданного номинального значения обуславливают появление ошибок в измеряемом расстоянии, абсолютная величина которых пропорциональна длине искомой линии. Уклонения масштабной частоты зависят как от точности первоначальной ее установки в номинальное значение, так и от изменения с течением времени параметров задающего генератора масштабной частоты.

Обычно к стабильности масштабной частоты предъявляются условия, состоящие в том, что ее отклонения от номинального значения в момент измерения расстояния должны быть в 2—3 раза меньше, чем требуемая относительная результирующая погрешность определения искомого расстояния.

В практике свето- и радиодальномерных измерений к генераторам масштабной частоты предъявляются требования обеспечения стабильности этой частоты не хуже $1 \cdot 10^{-6}$ за интервал времени не менее длительности полевого сезона. Для удовлетворения этим требованиям применяют генераторы с кварцевой стабилизацией частоты.

В связи с тем, что масштабная частота является одним из метрологических параметров дальномера, она подвергается периодическим поверкам. Такие поверки осуществляются с помощью аттестованных электронно-счетных частотомеров в начале и конце полевого сезона. В процессе проведения поверки определяется уход масштабной частоты от ее номинального значения с соответствующей записью в паспорт или формуляр прибора и в случае необходимости установка этой частоты в номинал с помощью предусмотренного в схеме подстроечного элемента.

Если измеренный уход масштабной частоты превышает допустимое значение, то в необходимых случаях, используя предположение о линейном изменении частоты в интервале между двумя соседними поверками, в результаты измерений длин линий вводят поправки за уход масштабной частоты.

Ошибки определения рабочей скорости распространения электромагнитных волн

Используемая при дальномерных измерениях скорость распространения электромагнитных волн определяется практически с некоторой ошибкой, величина которой в соответствии с формулой (63) зависит как от ошибки определения скорости электромагнитных волн в вакууме m_c , так и от ошибки определения среднего вдоль трассы значения показателя преломления m_n :

$$\left(\frac{m_v}{v}\right)^2 = \left(\frac{m_c}{c}\right)^2 + \left(\frac{m_n}{n}\right)^2. \quad (167)$$

Скорость электромагнитных волн в вакууме, являющаяся физической константой, определена в настоящее время с высокой точностью ($m_c/c = 4 \cdot 10^{-9}$). Поэтому первое слагаемое в формуле (167) не оказывает заметного влияния на точность определения рабочей скорости распространения электромагнитных волн.

Наибольшего внимания заслуживает второе слагаемое, величина которого обусловлена несовершенством используемых в практике дальномерных измерений методов определения показателя преломления воздуха. Из анализа приведенных в § 14 сведений следует, что величина этого показателя вычисляется по измеренным значениям температуры, давления и влажности воздуха, которые определяются с помощью метеоприборов на концах искомой длины линии. Допускаемые при этом ошибки измерения метеорологических характеристик обуславливают ошибку в значении индекса преломления воздуха:

$$m_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial T}\right)^2 m_T^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial p}\right)^2 m_p^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial e}\right)^2 m_e^2}, \quad (168)$$

где m_T , m_p и m_e — ошибки определения температуры, давления и влажности воздуха.

Значения частных производных $\partial N/\partial T$, $\partial N/\partial p$ и $\partial N/\partial e$, подсчитанные на основе использования формул (73) и (75), для стандартной атмосферы [$t_0 = +20^\circ\text{C}$, $p_0 = 101,3$ кПа (760 мм рт. ст.) и $e_0 = 1,33$ кПа (10 мм рт. ст.)] имеют следующие количественные оценки:

для оптического диапазона: $\partial N/\partial T = \partial N/\partial t = -1,0$; $\partial N/\partial p = 0,4$ и $\partial N/\partial e = -0,06$;

для радиодиапазона: $\partial N/\partial T = \partial N/\partial t = -1,3$; $\partial N/\partial p = 0,4$ и $\partial N/\partial e = 5,7$.

Практически температура, давление и влажность воздуха определяются приближенно с ошибками, равными: $m_t \approx 0,5^\circ\text{C}$, $m_p \approx 0,13$ кПа (1 мм рт. ст.) и $m_e \approx 0,04$ кПа (0,3 мм рт. ст.). В результате показатель преломления воздуха n вычисляется с точностью: для оптического диапазона $1 \cdot 10^{-6}$; для радиодиапазона $2 \cdot 10^{-6}$.

На линиях значительной протяженности (более 1 км) заметное влияние оказывает ошибка, возникающая из-за непредставительности метеофакторов, измеренных на концах линии, для всей трассы в целом. При измерении расстояний длиной 50—100 км эта ошибка во многих случаях становится определяющей. Из-за ее влияния результирующая точность светодальномерных измерений на протяженных трассах может снижаться до $(5 \div 10) \cdot 10^{-6}$, а для радиодальномерных измерений — до $(1 \div 2) \cdot 10^{-5}$.

Основные методы борьбы с рассмотренным источником ошибок — выбор наиболее благоприятных метеорологических условий, характеризующихся повышенной однородностью определяемых метеофакторов, а также проведение многократных, растянутых во времени измерений с тем, чтобы возникающие ошибки измерений носили по возможности знакопеременный характер.

Ошибки из-за искривления траектории распространения электромагнитных волн

Обобщающая рабочая формула (164), используемая при вычислении измеряемых длин линий, выведена в предположении, что применяемые в дальномерах электромагнитные излучения распространяются по прямолинейному пути. Однако встречающиеся на пути распространения электромагнитных волн изменения плотности воздуха приводят к искривлению траектории этих волн. В результате траекторию приходится отождествлять с изогнутой линией (чаще всего с дугой окружности).

В оптическом диапазоне поправки из-за искривления траектории достаточно хорошо предвычисляются по формуле (62). Приведенные в § 13 их количественные оценки свидетельствуют о том, что из-за малости величин необходимость практического учета таких поправок возникает очень редко (на линиях большой протяженности при точности измерений выше $1 \cdot 10^{-6}$).

В радиодиапазоне могут наблюдаться более ощутимые искривления траектории, причем в зависимости от конкретных состояний атмосферы кривизна пути может изменять свой знак. Однако для рассматриваемых в настоящем учебнике ультракоротковолновых радиодальномерных систем отмеченные влияния проявляются не столь контрастно, как в средневолновом и длинноволновом диапазонах. В связи с этим при работе с УКВ радиодальномерами, так же как и со светодальномерами, поправки, обусловленные искривлениями траектории, как правило, в результаты измерений не вводятся.

Ошибки радиодальномерных измерений, обусловленные отражениями

При измерении длин линий радиодальномерами наряду с искривлениями траектории распространения волн наблюдаются случаи «многопутности» прохождения радиосигналов, обуслов-

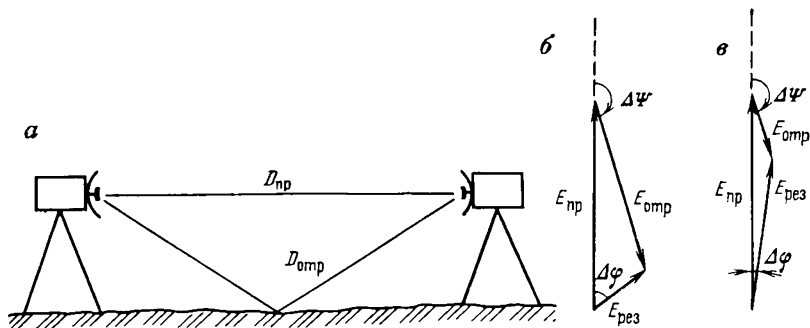


Рис. 105. Схемы, поясняющие возникновение ошибок радиодальномерных измерений из-за отражений от подстилающей поверхности

ленные отражениями радиоволн от различных объектов, попадающих в зону облучения. На рис. 105, а схематически показан случай единичного отражения от подстилающей поверхности. На вход приемного устройства удаленной станции попадают два сигнала (прямой и отраженный), которые прошли разные геометрические пути, вследствие чего фазы этих сигналов в точке приема будут различными. Фаза образующегося результирующего радиосигнала, которая используется в дальнейшем для вычисления измеряемого расстояния, получает дополнительный сдвиг, воспринимаемый как ошибка в определяемой длине линии, зависящая от параметров отраженного сигнала.

Для количественного предрасчета ошибки необходимо знать геометрию распространения прямого и отраженного радиолучей, отражающую способность подстилающей поверхности и характеристики используемых радиосигналов (длину волны несущих и модулирующих колебаний, вид поляризации, направленные свойства антенных систем).

Вывод обобщенных формул для предрасчета величины ошибки, обусловленной отражениями, сопряжен с громоздкими вычислениями. Поэтому проиллюстрируем методику их получения на простейшем примере, когда в качестве информационных радиосигналов используются немодулированные гармонические колебания.

В данном случае как прямой, так и отраженный сигналы, поступающие на вход приемного устройства удаленной станции, могут быть представлены соответствующими векторами $E_{\text{пр}}$ и $E_{\text{отр}}$, сдвинутыми по фазе на величину

$$\Delta\psi = \omega \frac{\Delta D}{v}, \quad (169)$$

где ω — угловая частота информационного сигнала; $\Delta D = D_{\text{отр}} - D_{\text{пр}}$ — длина избыточного пути для отраженного сигнала; v — рабочая скорость распространения этого сигнала. Ве-

личина результирующего сигнала $E_{рез}$ определяется как геометрическая сумма векторов $E_{пр}$ и $E_{отр}$. Его фазовый сдвиг $\Delta\varphi$, который воспринимается как погрешность в измеряемой радиодальномером разности фаз, существенно зависит от величины отраженного сигнала $E_{отр}$ и его фазового запаздывания $\Delta\psi$.

Количественно отраженный сигнал $E_{отр}$ связан с прямым сигналом отношением $E_{отр} = kE_{пр}$, где k — коэффициент ослабления отраженного сигнала, приближенно равный коэффициенту отражения подстилающей поверхности. На рис. 105, б и 105, в приведены векторные диаграммы, иллюстрирующие взаимодействие прямого и отраженного сигналов для случая сравнительно сильного ($k \approx 0,8 \div 0,9$) и сравнительно слабого ($k \approx 0,1 \div 0,3$) отражений.

Непосредственно из векторной диаграммы, показанной на рис. 105, б, следует:

$$\operatorname{tg} \Delta\varphi = \frac{k \sin \Delta\psi}{1 + k \cos \Delta\psi}. \quad (170)$$

С учетом того, что $\Delta\varphi = \omega \delta D / v$, где δD — погрешность в значении измеряемого расстояния D , обусловленная влиянием отражений, формула (170) может быть записана в следующем виде:

$$\delta D = \frac{v}{\omega} \Delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{k \sin \left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda} \right)}{1 + k \cos \left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda} \right)}, \quad (170a)$$

где $\lambda = 2\pi v / \omega$ — длина волны рассматриваемых колебаний.

Из анализа формул (170) и (170a) следует, что максимальная ошибка из-за отражений соответствует условию, когда $\cos \Delta\psi = -k$.

Если коэффициент отражения приближается к единице, то это условие выполняется вблизи противофазности прямого и отраженного сигналов. Изменения фазового угла результирующего сигнала могут достигать величины, близкой к 90° , что соответствует ошибкам в величине измеряемого расстояния, близким к $\lambda/4$. При таких условиях наблюдается также резкое уменьшение амплитуды результирующего принимаемого сигнала, вследствие чего выполнить измерения в экстремальных случаях не всегда представляется возможным.

При небольших значениях коэффициента отражения ($k \approx 0,1 \div 0,3$) $1 + k \cos \Delta\psi \approx 1$, а $\operatorname{tg} \Delta\varphi \approx \Delta\varphi$. При этом формулы (170) и (170a) принимают вид:

$$\Delta\varphi \approx k \sin \Delta\psi = k \sin (\omega \Delta D / v); \quad (171)$$

$$\delta D \approx \frac{k\lambda}{2\pi} \sin (2\pi \Delta D / \lambda). \quad (171a)$$

Из анализа соотношения (171 а) следует, что при наличии слабых отраженных сигналов погрешность δD в значении измеряемого расстояния в зависимости от разности хода ΔD изменяется практически по синусоидальному закону, причем амплитуда этих изменений пропорциональна как длине волны λ используемых колебаний, так и величине коэффициента отражения k .

В рассмотренных выше геодезических фазовых радиодальномерах используют модулированные колебания, которые могут быть в простейшем случае представлены как сумма трех гармонических колебаний (колебания основной несущей частоты, а также колебания верхней и нижней боковых частот). Информационный фазовый сдвиг, по которому вычисляется искомая длина линии, определяется при этом как разность фазовых сдвигов, которые приобретают соседние спектральные составляющие при прохождении измеряемого расстояния. Применительно к приведенным в настоящем учебнике радиодальномерам возникающий при отражении дополнительный фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{\text{рез}}$ может быть определен как

$$\Delta\varphi_{\text{рез}} = \frac{(\Delta\varphi_{\omega+\Omega} - \Delta\varphi_{\omega}) + (\Delta\varphi_{\omega} - \Delta\varphi_{\omega-\Omega})}{2}, \quad (172)$$

где $\Delta\varphi_{\omega+\Omega}$, $\Delta\varphi_{\omega}$ и $\Delta\varphi_{\omega-\Omega}$ — обусловленные влиянием отражений фазовые сдвиги для гармонических колебаний верхней боковой $(\omega + \Omega)$, основной несущей (ω) и нижней боковой $(\omega - \Omega)$ частот.

Через ω и Ω в данной формуле обозначены соответственно угловая несущая частота и угловая частота модулирующих колебаний (масштабная частота).

Для случая слабых отражений величины $\Delta\varphi_{\omega+\Omega}$, $\Delta\varphi_{\omega}$ и $\Delta\varphi_{\omega-\Omega}$ могут быть в соответствии с формулой (171) представлены как

$$\begin{aligned} \varphi_{\omega+\Omega} &= k \sin \left[(\omega + \Omega) \frac{\Delta D}{v} \right], \quad \Delta\varphi_{\omega} = k \sin \left(\omega \frac{\Delta D}{v} \right) \\ \text{и} \quad \Delta\varphi_{\omega-\Omega} &= k \sin \left[(\omega - \Omega) \frac{\Delta D}{v} \right]. \end{aligned}$$

С учетом этого соотношение (172) принимает вид

$$\Delta\varphi_{\text{рез}} = k \cos \left(\omega \frac{\Delta D}{v} \right) \sin \left(\Omega \frac{\Delta D}{v} \right) \quad (173)$$

или

$$\delta D = \frac{v}{\Omega} \Delta\varphi_{\text{рез}} = \frac{k\lambda_{\text{м}}}{2\pi} \cos \left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_{\text{н}}} \right) \sin \left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_{\text{м}}} \right), \quad (173a)$$

где $\lambda_{\text{н}}$ и $\lambda_{\text{м}}$ — длины волн несущих и модулирующих колебаний.

При наличии сильных отражений возникает необходимость вместо соотношения (171) использовать соотношение (170), вследствие чего вывод формулы для $\Delta\varphi_{\text{рез}}$ существенно осложняется. Не прибегая к громоздким промежуточным математи-

ческим преобразованиям, приведем эту формулу без вывода в следующем окончательном виде:

$$\Delta\varphi_{\text{рез}} = -\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2k \sin\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_M}\right) \times}{1 - k^2 + 2k \cos\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_M}\right) \times} \times \frac{\left[k \cos\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_M}\right) + \cos\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_H}\right) \right]}{\left[k \cos\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_M}\right) + \cos\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_H}\right) \right]}. \quad (174)$$

Откуда

$$\delta D = -\frac{\lambda_M}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{2k \sin\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_M}\right) \times}{1 - k^2 + 2k \cos\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_M}\right) \times} \times \frac{\left[k \cos\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_M}\right) + \cos\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_H}\right) \right]}{\left[k \cos\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_M}\right) + \cos\left(2\pi \frac{\Delta D}{\lambda_H}\right) \right]}. \quad (174a)$$

Все полученные выше формулы для оценки ошибки из-за отражений от подстилающей поверхности приведены без учета того обстоятельства, что при скользящем отражении волна приобретает дополнительный 180-градусный фазовый сдвиг. При этом знак перед тригонометрической функцией, содержащей в аргументе несущую частоту (или длину волны), меняется, как правило, на обратный. Все основные выводы, касающиеся закономерностей изменения ошибок из-за отражений и их экстремальных значений, остаются при этом справедливыми.

С учетом сделанного замечания анализ приведенных соотношений для $\Delta\varphi_{\text{рез}}$ и δD позволяет не только количественно оценить величину погрешности, которая может возникнуть в результатах радиодальномерных измерений при наличии отражений, но и обосновать методы борьбы с этим нежелательным влиянием.

В частности, исследование уравнения (169) свидетельствует о том, что при наличии сильных отражений величина $\Delta\varphi_{\text{рез}}$ может изменяться в пределах от 0 до $\pi/2$, а δD — соответственно от 0 до $\lambda_M/4$. Так, например, если в радиодальномере использована частота модуляции, равная 15 МГц ($\lambda_M \approx 20$ м), то без принятия соответствующих мер ошибки из-за отражений могут достигать нескольких метров. Поэтому в отдельных моделях современных радиодальномеров значение масштабной частоты повышают до 150 МГц, в результате чего ошибки, обусловленные отражениями, удается уменьшить примерно в 10 раз.

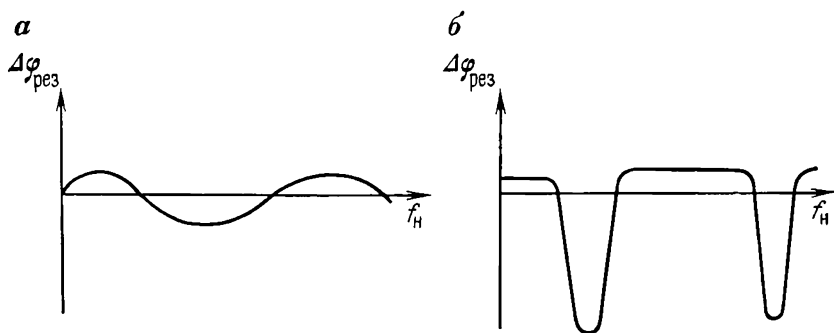


Рис. 106. Графики изменения фазового сдвига $\Delta\varphi_{\text{рез}}$ в зависимости от изменения несущей частоты для случая слабых (а) и сильных (б) отражений

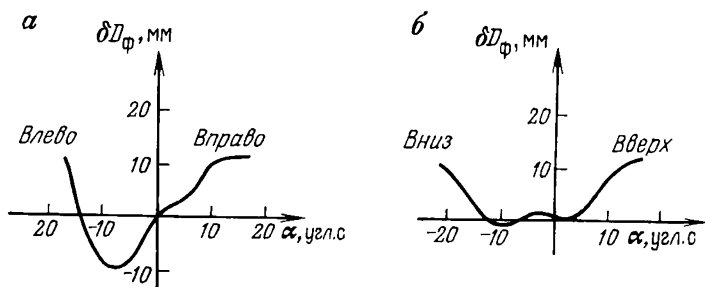


Рис. 107. Графики зависимости результатов светодальномерных измерений от фазовой неоднородности светового пучка:

а — поворот дальномера в горизонтальной плоскости; б — поворот дальномера в вертикальной плоскости

Для того чтобы ошибки из-за отражений носили знакопеременный характер, стремятся к тому, чтобы один из параметров, входящих под знак тригонометрической функции в формулах (173) и (174), сделать переменным. Для реализации этого принципа во многих типах радиодальномеров находит применение метод измерения на нескольких различных несущих частотах. Характер наблюдаемых при этом изменений величины $\Delta\varphi_{\text{рез}}$ для случая слабых и сильных отражений приведен в графической форме на рис. 106.

Диапазон изменения несущих частот выбирают из тех соображений, чтобы он позволял получить полный цикл изменения величины $\Delta\varphi_{\text{рез}}$. Практически удается реализовать такой режим работы радиодальномера, при котором несущие частоты изменяются в пределах до 200—300 МГц.

В отдельных случаях применяют методы, позволяющие изменять разность хода ΔD между прямым и отраженным сигналами, что достигается, например, за счет изменения высоты

установки станций радиодальномера. Однако практически реализовать этот метод не всегда представляется возможным.

Попытки ослабления величины отраженных сигналов за счет уменьшения коэффициента отражения подстилающей поверхности привели к разработке рекомендаций выполнения измерений в условиях повышенной «шероховатости» поверхности. Так, например, ослабить влияние отраженных сигналов удастся при наличии волн на подстилающей водной поверхности, при проведении измерений в периоды, когда земная поверхность покрыта растительностью.

Как правило, ошибки из-за отражений стремятся свести к минимуму одним из описанных выше методов. Значительно реже используют методы вычисления величины δD и введения ее в качестве поправки в результаты радиодальномерных измерений.

Ошибки, обусловленные «фазовостью» светового пучка

Одним из источников ошибок, характерных для светодальномеров с полупроводниковыми источниками излучения, является фазовая неоднородность светового пучка. Причины возникновения такой неоднородности связаны с несовершенством конструкции светодиодов, используемых в светодальномерах групп Т и П в качестве излучателя и модулятора.

Практически влияние этого источника ошибок проявляется в том, что результаты измерений зависят от того, какая часть поперечного сечения светового пучка отражается удаленным отражателем и попадает в приемную систему дальномера. Поэтому величина погрешности измерений существенно зависит как от точности наведения дальномера на отражатель, так и от длины измеряемых линий. В последнем случае зависимость погрешности результатов измерений от расстояния обусловлена тем, что в расходящемся световом пучке при одних и тех же размерах отражателя на различных дальностях перехватывается различная часть поперечного сечения светового пучка.

Экспериментально полученная зависимость результатов измерений светодальномером с полупроводниковым излучателем от поворота дальномера в небольших пределах в горизонтальной и вертикальной плоскостях показана на рис. 107.

Ошибки из-за фазовой неоднородности светового пучка могут носить как случайный, так и систематический характер. Так, например, флуктуационные явления в атмосфере способствуют появлению случайных ошибок из-за «фазовости» светового пучка. Выполнение измерений при неизменном наведении дальномера на отражатель в условиях спокойной атмосферы может привести к появлению ошибок систематического характера.

Для борьбы с этими источниками ошибок принимают соответствующие меры в процессе разработки дальномеров и их эксплуатации. В частности, в процессе изготовления дальномеров производят отбор светодиодов, характеризующихся минимальной фазовой неоднородностью, принимают меры к выравниванию распределения фазы в выходящем из дальномера световом пучке за счет различных конструктивных решений, а также комплектуют светодальномер мозаичным отражателем, собранным из призм небольших размеров.

К методическим приемам, используемым в процессе эксплуатации дальномеров, можно отнести выполнение серии измерений, включающей в себя многократные наведения дальномера на отражатель.

Циклические ошибки

Под циклическими ошибками в дальномерной технике понимают ошибки, закономерность изменения которых повторяется при изменении измеряемого расстояния на величину, соответствующую изменениям отсчетов в пределах полной шкалы применяемого фазометра (в линейной мере эта величина соответствует половине, а иногда четверти длины волны масштабных колебаний). Примером таких ошибок могут быть циклические ошибки фазометра, а также ошибки, обусловленные взаимным влиянием электрических цепей. Последние возникают вследствие того, что в реально используемых электрических схемах свето- и радиодальномеров не удается достичь идеальной развязки каналов, по которым передаются фазосравниваемые (информационный и опорный) сигналы на вход фазометра. Частичное попадание информационного сигнала в тракт опорного или наоборот приводит к изменениям измеряемой разности фаз. При плавном увеличении или уменьшении расстояния в пределах нескольких полувольт масштабных колебаний эти изменения носят периодический характер. В радиодальномерах в дополнение к вышеизложенному возникают также циклические ошибки, обусловленные взаимным влиянием каналов, используемых для передачи различных сигналов с ведомой станции на ведущую на одной несущей частоте.

Для уменьшения влияния циклических ошибок на результаты дальномерных измерений применяют методы взятия отсчетов со сдвигом фазы на 180° (а иногда дополнительно на 90° и на 270°). Наряду с этим для многих типов высокоточных светодальномеров остаточная величина циклической ошибки определяется в процессе исследований с помощью оптической скамьи, по которой в пределах фазового цикла последовательно переставляется отражатель на заданные равные отрезки длины, а дальномером при каждой установке отражателя выполняются измерения. Получаемый при этом график циклической ошибки

вносят в паспорт (или формуляр) дальномера. При проведении последующих производственных измерений вводят поправку за величину циклической ошибки в зависимости от значения отсчета, снимаемого со шкалы фазометра.

Ошибки определения приборных поправок дальномеров

Среди различных источников ошибок, учитываемых в формуле (165) слагаемым $m_{\Sigma K}$, решающая роль для многих типов дальномеров принадлежит определению приборной поправки, физическая сущность которой достаточно подробно рассмотрена в § 15.

Поскольку в большинстве случаев величина приборной поправки определяется из измерений линий известной длины, то при выполнении измерений должна быть использована такая методика, которая позволяла бы получить результаты, характеризующиеся точностью в 2—3 раза выше, чем точность повседневных измерений, свойственных тому или иному дальномеру. Исходя из этого, для каждого типа дальномера, как правило, разрабатывается своя программа измерений, при реализации которой основное внимание уделяется сведению к минимуму влияния отдельных источников ошибок. Так, для уменьшения случайных ошибок дальномера увеличивают число измерений, а погрешности, величина которых функционально связана с тем или иным параметром, стремятся уменьшить за счет подбора условий измерений.

Из анализа технических характеристик следует, что для светодальномеров групп Г и Т приборная точность измерений характеризуется погрешностью, равной в большинстве случаев 5 мм, а для высокоточных радиодальномеров — 3 см. В связи с этим рекомендуемая для них методика определения приборных поправок должна обеспечивать точность измерений не ниже соответственно 2 мм и 1 см.

Наибольшую трудность представляет собой отработка методики определения приборных поправок для светодальномеров группы П, так как приборная точность наилучших типов дальномеров этой группы характеризуется погрешностью измерения от 0,1 до 0,3 мм. При этом возникает необходимость не только выполнения дальномерных измерений по детально отработанной методике с точностью выше 0,1 мм, но и проведения с максимальной тщательностью таких вспомогательных процедур, как горизонтирование и центрирование светодальномера и отражателя над соответствующими отметками закрепленных на местности геодезических реперов, редуцирование измеренных дальномером длин линий на отсчетную поверхность и др. Задача несколько облегчается для светодальномеров группы П, предназначенных не для измерения абсолютных значений искомых расстояний, а для слежения за изменениями этих расстояний с течением времени.

§ 32. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ С ДАЛЬНОМЕРОМ НА ПУНКТЕ

Точность измерений свето- и радиодальномерами, а также их дальность действия существенно зависят от степени подготовленности дальномера к работе, от соблюдения предписанного порядка выполнения измерений и от выбора оптимальных внешних условий для проведения измерений.

Как и любые другие средства измерений, свето- и радиодальномеры периодически подвергаются поверкам, основное назначение которых состоит в том, чтобы оценить соответствие реальных технических (и прежде всего метрологических) характеристик заданным. С этой целью, как правило, перед началом и по окончании полевого сезона проводят регламентные работы, в процессе которых на линиях известной длины переопределяют значение приборной поправки, а для проверки реальной точности испытуемого дальномера выполняют контрольные измерения базисов (по возможности той же протяженности, что и длины линий, измеряемые в производственных условиях). По величине принимаемых сигналов и соответствующей им чувствительности прибора стремятся оценить потенциальную дальность действия дальномера. Наряду с этим проверке подвергаются значения масштабных частот и в первую очередь основная масштабная частота. При уходах этих частот за пределы разрешенного допуска устанавливают их в номинальное значение регулировкой соответствующих подстроечных элементов (как правило, подстроечных конденсаторов задающих кварцевых генераторов).

Результаты проведенных регламентных работ вносят в паспорт (или формуляр) дальномера. Эти данные наряду со сведениями о проведенных ремонтных работах используются в дальнейшем для оценки качества работы дальномера в течение всего времени его эксплуатации.

Периодическим поверкам подвергаются при этом и входящие в комплект дальномера метеорологические приборы (барометры-анероиды и аспирационные психрометры).

Порядок работы с дальномером на пункте определяется, как правило, инструкцией по эксплуатации, придаваемой к каждому дальномеру. Весь комплекс работ на пункте в общем случае состоит из подготовительных работ и непосредственного процесса измерений.

В процессе проведения подготовительных работ осуществляют установку светодальномера и отражателя (или соответствующих станций радиодальномера) на штативе или на столике геодезического сигнала, ориентирование в направлении на удаленный пункт измеряемой линии и центрирование над закрепленным на местности геодезическим центром. При работе со столика сигнала одним из известных геодезических методов определяют поправки за центрировку дальномера и редукцию отражателя, значения которых вносят в полевой журнал и ис-

пользуют при вычислении длин линий, приведенных к соответствующим геодезическим центрам. При этом следует заметить, что в полевой журнал вносят величину проекции линейного элемента центрировки на направление измеряемой линии. Поправка считается положительной, если проекция лежит на линии, соединяющей центры расположенных по ее концам геодезических реперов, и отрицательной, если проекция лежит на продолжении этой линии.

Вблизи от дальномера и отражателя размещают метеорологические приборы и подготавливают их к работе. Защищают приборы от прямого попадания на них солнечных лучей, а аспирационный психрометр защищают кроме того от ветра, который влияет на скорость аспирации.

Непосредственно после установки дальномера на пункте его подключают к источнику питания с тем, чтобы за время проведения вспомогательных работ аппаратура была прогрета в соответствии с требованиями инструкции к конкретному типу дальномера.

Процесс измерения длин линий обычно включает в себя несколько приемов, совокупность которых образует программу измерений. При этом под одним приемом понимают тот минимальный комплекс измерений, который позволяет вычислить только одно полное значение длины измеряемой линии. Обычно он включает в себя отсчеты, используемые для разрешения неоднозначности, а также группу точных отсчетов, которые производятся при переключениях тех или иных органов управления с целью уменьшения систематических ошибок измерений. В современных автоматизированных дальномерах как процесс разрешения неоднозначности, так и упомянутые переключения при взятии точных отсчетов выполняются автоматически. При этом со светового табло дальномера снимают отсчет, соответствующий полному значению искомого расстояния. В таких случаях очень часто прием измерений отождествляют с отсчетом.

Необходимость делать несколько приемов, составляющих программу измерений, обусловлена стремлением уменьшить влияние ошибок случайного характера и прежде всего ошибок, связанных с недостаточно строгим учетом влияния метеорологических условий. Поскольку с увеличением длины линии такое влияние проявляется более контрастно, то на линиях значительной протяженности не только увеличивают количество приемов, входящих в состав программы измерений, но и растягивают выполнение этих приемов во времени. В таких случаях очень часто программу измерений разбивают на две подпрограммы, которые рекомендуется выполнять с интервалом, достигающим одних суток и более.

Правильный выбор оптимальных для дальномерных измерений условий погоды позволяет не только сократить время, необходимое для выполнения полной программы измерений, но

и повысить точность дальномерных определений. Накопленный за многие годы опыт свето- и радиодальномерных измерений свидетельствует о том, что благоприятными условиями погоды следует считать облачную прохладную погоду с умеренным ветром, способствующим выравниванию метеорологических факторов вдоль трассы. Следует избегать измерений в безветренную жаркую погоду, во время дождя или при неустойчивой погоде, когда температура и влажность воздуха могут сильно изменяться на отдельных локальных участках траектории распространения используемых излучений.

На заключительной стадии работы с дальномером на пункте наблюдатель должен обязательно убедиться в том, что по полученной в процессе измерений информации разрешение неоднозначности производится уверенно, разброс отсчетов внутри приема, а также результатов измерений между отдельными приемами находятся в пределах допуска, а все вспомогательные измерения (определение метеофакторов и поправок за центрировку и редукцию) выполнены своевременно и качественно.

§ 33. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для обработки полученных в процессе выполнения дальномерных измерений данных с целью вычисления окончательного значения искомого длины линии и оценки точности этого значения полевой журнал должен содержать следующую исходную информацию:

- 1) результаты измерений на всем наборе масштабных частот, используемые в дальнейшем при разрешении неоднозначности (грубые отсчеты);

- 2) результаты измерений несколькими приемами на основной масштабной частоте, включающие взятие в каждом приеме нескольких отсчетов, которые производят после выполнения в дальномере предусмотренных инструкцией переключений с целью ослабления влияния тех или иных источников систематических ошибок (точные отсчеты);

- 3) предварительное приближенное значение измеряемого расстояния, получаемое по карте или из каких-либо других источников (для дальномеров, у которых дальность действия больше, чем предусмотренные в них пределы разрешения неоднозначности);

- 4) результаты измерений метеофакторов (температуры, давления и влажности воздуха), определяемых в большинстве случаев перед началом и по завершении измерений на обоих концах линии;

- 5) значения приборных поправок, выписываемые из паспорта (или формуляра) дальномера (для светодальномера — поправки, соответствующие отдельно дальномеру и отражателю, для ра-

диодальномера — как правило, суммарная поправка для двух станций, устанавливаемых по концам линии);

6) результаты определяемых поправок за центрировку светодальномера и за редукцию отражателя, а для радиодальномера — за центрировку обеих станций, размещаемых на конечных пунктах;

7) выбираемое из паспорта (или формуляра) дальномера значение поправки за величину циклической ошибки, соответствующей значению отсчета на основной масштабной частоте (эта поправка вводится только в случаях, предусмотренных инструкцией по эксплуатации);

8) данные о высоте установки светодальномера и отражателя (или станций радиодальномера) над центрами закрепленных на местности геодезических пунктов.

Обработка грубых отсчетов, предусматривающая получение полного значения приближенной длины измеряемой линии, выполняется одним из методов, описанных в § 12.

В конце данного параграфа приведен пример ведения полевого журнала для светодальномера «Гранат», где можно проследить все основные этапы обработки результатов измерений.

Разрешение неоднозначности в этом дальномере основано на использовании методики регистрации и дальнейшей обработки отсчетов, получаемых при вычислении разностей на масштабных частотах $f_4 - f_1$, $f_3 - f_1$ и $f_2 - f_1$ и в сочетании с отсчетом на основной масштабной частоте f_1 . Коэффициент неоднозначности для перечисленных выше комбинаций выбран равным 10, что позволяет применить рассмотренную в § 12 форму записи отсчетов с последовательным смещением используемых отсчетов на разряд. Обоснованное ранее сравнение соответствующих разрядов позволяет получить удвоенное значение $2D_{\text{пр}}$, а после деления пополам — приближенное значение длины линии $D_{\text{пр}}$.

Во многих типах современных свето- и радиодальномеров процедура разрешения неоднозначности автоматизирована, в результате чего на световом табло дальномера непосредственно высвечивается значение D .

При обработке точных отсчетов, регистрируемых на основной масштабной частоте, процесс вычисления сводится к нахождению среднего значения показаний индикаторного устройства как для каждого приема, так и для серии приемов, предусмотренных программой измерений. Полученное при этом значение используют для замены последних разрядов в величине приближенной длины $D_{\text{пр}}$ (обычно замене подлежат три-четыре последних разряда в величине $D_{\text{пр}}$).

В автоматизированных дальномерах очень часто при каждом отсчете со шкалы снимают полное значение величины искомого расстояния. В таких случаях вычисляют среднее значение из серии записанных отсчетов, которое и используется при дальнейшей обработке.

Если длина измеряемой линии превышает диапазон разрешения неоднозначности, то величина $D_{\text{пр}}$ дополняется старшими разрядами на основе использования дополнительной информации о приближенной длине линии. В частности, для светодальномера «Гранат» диапазон разрешения неоднозначности соответствует 5000 м. Поэтому для измеряемых расстояний, длина которых превышает 5 км, к полученному после обработки грубых и точных отсчетов значению D' прибавляют целое значение 5-километровых отрезков $n \cdot 5000$, укладывающихся в приближенной длине линии.

Следующей стадией обработки результатов дальномерных измерений является вычисление или непосредственное использование различного рода поправок, вводимых в величину искомой длины линии.

При вычислении метеорологической поправки $\delta_{\text{мет}}$ используют, как правило, результаты измерений барометром и психрометром давления, температуры и влажности воздуха. В процессе обработки в показания, снимаемые со шкалы барометра, вводят шкаловую ($\Delta p_{\text{шк}}$), температурную ($\Delta p_{\text{тем}}$) и добавочную ($\Delta p_{\text{доб}}$) поправки, а затем вычисляют средние значения атмосферного давления $p_{\text{испр}}$, а также температуры сухого ($t_{\text{сух}}$) и смоченного ($t_{\text{вл}}$) термометров.

С помощью таблиц, номограмм или графиков, придаваемых к дальномеру, вычисляют вспомогательные коэффициенты $\delta_{t,p}$, δ_e и $\delta_{\text{общ}} = \delta_{t,p} + \delta_e$. После умножения на $D_{\text{пр}}$ получают значение метеопоправки $\delta_{\text{мет}}$, выраженное в единицах длины.

Поскольку в различных типах дальномеров за стандартные метеоусловия принимают различные значения температуры, давления и влажности воздуха, то при вычислении метеопоправки $\delta_{\text{мет}}$ не следует пользоваться таблицами, номограммами или графиками, составленными для других типов дальномеров.

Физически полученная величина $\delta_{\text{мет}}$ отражает те изменения в измеряемом расстоянии D , которые возникают из-за несоответствия реальных значений метеофакторов тем значениям, для которых были предвычислены значения масштабных частот и произведена градуировка шкалы фазометра непосредственно в единицах длины.

Учет метеопоправок в значении искомого расстояния плохо поддается автоматизации из-за несовершенства конструкции используемых метеоприборов. Попытки хотя бы частично решить эту задачу ограничиваются тем, что применение соответствующих номограмм или графиков упрощает процесс нахождения вспомогательного коэффициента $\delta_{\text{общ}}$, а его величина посредством соответствующих органов ручного управления вводится в электрическую схему дальномера с целью получения на табло откорректированного значения расстояния.

Необходимости в дополнительной обработке приборных поправок, поправок за центрировку и циклическую ошибку обычно

не возникает. Их значения непосредственно используются или для вычисления в полевом журнале суммарной поправки и последующего ввода в значение измеряемого расстояния, или для ввода в схему дальномера с целью снятия с табло откорректированной величины D .

После введения перечисленных выше поправок полученная длина линии D представляет собой наклонную дальность. Для приведения ее к горизонту используют известную в геодезии формулу

$$\delta_h = -\frac{h^2}{2D} - \frac{h^4}{8D^3}, \quad (175)$$

где h — разность высот точек стояния дальномера и отражателя (или установленных по концам линии станций радиодальномера) над уровнем моря с учетом высот знаков.

Если разность высот невелика, то второй член в формуле (175) можно не учитывать.

Обычно процесс вычисления измеренной линии на этом завершается. Иногда вводится еще один этап обработки, связанный с редуцированием измеренных расстояний на поверхность референц-эллипсоида и на плоскость в проекции Гаусса — Крюгера. Такое редуцирование осуществляется хорошо известными в геодезии методами.

На заключительной стадии обработки производится оценка точности выполненных дальномерных измерений. В производственных условиях наибольшее распространение получил способ, основанный на анализе внутренней сходимости результатов измерений. При этом оценка точности производится по отклонениям результатов измерений от арифметической середины, причем среднюю квадратическую погрешность одного приема вычисляют по формуле

$$m = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}}, \quad (176)$$

а среднюю квадратическую погрешность окончательного значения измеренного расстояния — по формуле

$$M = m/\sqrt{n}, \quad (177)$$

где n — число приемов; v — отклонение от среднего арифметического значения измеренного расстояния.

Данный способ не является достаточно объективным. Это объясняется тем, что при оценке по внутренней сходимости не учитывается влияние целого ряда источников ошибок, которые при измерении какой-либо конкретной линии в конкретных условиях имеют систематический характер, но при переходе от одной линии к другой изменяют свое значение. В результате такая оценка дает преуменьшенное (примерно в 3—5 раз) значение средней квадратической погрешности.

Таблица 4

Пример ведения полевого журнала для светодальномера «Гранат»Измеряемая линия: *п. Петрово — п. Сороки*Дата: *15.07.86 г.* Время: *10 ч. 04 мин.* Погода: *пасмурная, умеренный ветер*Высота установки дальномера $h_d = 1,50$ м. Видимость *удовлетворительная*Высота установки отражателя $h_{отр} = 1,60$ м. Приближенное значение длины линии *2 км***1. Грубые отсчеты (разрешение неоднозначности)**

Условное обозначение комбинации масштабных частот	Отсчет при посылке света на отражатель (при работе по ОКЗ начальный отсчет фазометра устанавливается на нуль)
$f_4 - f_1$	439
$f_3 - f_1$	411
$f_2 - f_1$	960
f_1	537

$$2D_{пр} = 439537 \text{ см}$$

$$D_{пр} = 2197,685 \text{ м}$$

2. Точные отсчеты

Номер приема	Положение фазового переключателя	Отсчет при посылке света на отражатель, см $l_{ОКЗ}$	Отсчет при посылке света по ОКЗ, см $l_{ОКЗ}$	Разность отсчетов $l = l_D - l_{ОКЗ}$, см
1	1	540	003	537
	2	545	009	536
	3	788	251	537
	4	791	252	539
				$l_{ср} = 537,2$
2	1	538	001	537
	2	545	008	537
	3	790	251	539
	4	790	252	538
				$l_{ср} = 537,8$
		Средний из 2-х приемов		537,5 см
		$2D'$		4395,375 м
		D'		2197,688 м

3. Метеоданные

Метеофактор		Измерения		Среднее значение
		Вблизи дальномера	Вблизи отражателя	
$t_{\text{сух}}, ^\circ\text{C}$	1-й отсчет	+17,2	+16,2	—
	2-й отсчет	+16,8	+15,8	—
	Средн.	+17,0	+16,0	+16,5
$t_{\text{вл}}, ^\circ\text{C}$		+15,0	+14,0	+14,5
$p', \text{мм рт. ст.}$		745,0	746,2	—
$\Delta p_{\text{шк}}, \text{мм рт. ст.}$		+ 0,1	+ 0,2	—
$\Delta p_{\text{темп}}, \text{мм рт. ст.}$		+ 0,1	— 0,1	—
$\Delta p_{\text{доб}}, \text{мм рт. ст.}$		+ 0,3	+ 0,2	—
$p_{\text{испр}}, \text{мм рт. ст.}$		745,5	746,5	746,0

4. Вычисление метеопоправки

Обозначение поправки	Числовое значение поправки
$\delta_{t,p}$	+22,3
δ_e	+ 0,7
$\delta_{t,p} + \delta_e$	+23,0
$\delta_{\text{мет}} = (\delta_{t,p} + \delta_e) 10^{-3} D$	+0,050 м

5. Вычисление суммарной поправки

Наименование поправки	Обозначение поправки	Числовое значение поправки
Приборная	$K_{\text{пр}}$	—0,195
Постоянная отражателя	$K_{\text{отр}}$	—0,040
Центрировка дальномера	$\delta_{\text{ц}}$	0,000
Редукция отражателя	$\delta_{\text{ч}}$	+0,020
Метеопоправка	$\delta_{\text{мет}}$	+0,050
Суммарная	$\Sigma \delta$	—0,165

6. Вычисление поправки за приведение к горизонту

Наименование параметра		Обозначение параметра	Числовое значение, м
Высота относительно уровня моря	В точке стояния дальмера	$H_d + h_d$	192,50
	В точке стояния отражателя	$H_{отр} + h_{отр}$	180,00
Разность высот		ΔH	12,50
Поправка за приведение к горизонту		$\delta_h = -\frac{\Delta H^2}{2D_{пр}}$	-0,003

7. Вычисление окончательного значения длины измеряемой линии

Значение D без учета поправок, м	2 197,688
Суммарная поправка, м	-0,165
Значение наклонного расстояния, м	2 197,523
Поправка за наклон, м	-0,003
Длина, приведенная к горизонту, м	2 197,520

Примечание. В полевом журнале значения p и e приведены в мм рт. ст. в связи с тем, что шкалы используемых на производстве метеоприборов проградуированы в этих единицах.

Наиболее объективную оценку точности свето- и радиодальномеров дает метод контрольных измерений, при котором дальномером измеряют линии известной длины. Точность дальномерных измерений оценивают при этом по формуле

$$m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}, \quad (178)$$

где Δ — разность между результатом измерения линии дальномером и точным ее значением; n — число измерений.

Данный метод применяют, как правило, для оценки точности дальномеров при выпуске его заводом-изготовителем, а также при проведении регламентных работ и периодических контрольных испытаний. При этом для объективной оценки дальномерных измерений используют не одну, а несколько контрольных линий различной протяженности. Поскольку ошибки измерений для большинства свето- и радиодальномеров зависят от длины

линии, то в результате проведения измерений эти ошибки представляют в виде следующей зависимости:

$$m_D = (a + bD), \quad (179)$$

где a и b — эмпирически определяемые коэффициенты; D — длина измеряемой линии.

Для вывода такой зависимости необходимо иметь ряд достаточно надежно определенных значений ошибок измерений, полученных на контрольных линиях различной длины и использованных при определении коэффициентов a и b .

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Перечислите основные источники ошибок дальномерных измерений.

2. Чем обусловлены ошибки измерения разности фаз в дальномере?

3. Какие методы используются в дальномере для уменьшения случайных и систематических ошибок измерения разности фаз?

4. Сформулируйте требования, которые предъявляются к стабильности основной масштабной частоты. Поясните необходимость периодических проверок этой частоты.

5. Какие источники ошибок оказывают наибольшее влияние на точность определения рабочей скорости распространения электромагнитных волн?

6. Поясните механизм возникновения ошибок радиодальномерных измерений из-за отражений от подстилающей поверхности. Почему при отсутствии отражений параметры несущих колебаний не оказывают влияния на точность радиодальномерных измерений, а при наличии отражений такое влияние проявляется?

7. В чем заключается фазовая неоднородность светового пучка и как она влияет на точность светодальномерных измерений?

8. Назовите основные причины возникновения циклической ошибки. Как она определяется и как учитывается при обработке измерений?

9. Сформулируйте требования к точности определения приборной поправки дальномере. Охарактеризуйте методы ее определения.

10. Какие регламентные работы с дальномерами выполняются перед началом полевого сезона?

11. Из каких основных этапов складывается процесс дальномерных измерений на пункте?

12. Какая исходная информация вносится в полевой журнал?

13. Поясните методику получения полного значения измеряемой длины линии по результатам грубых и точных отсчетов.

14. Охарактеризуйте последовательность обработки измерен-

ных значений метеофакторов с целью получения результирующего значения метеорологической поправки, вводимой в измеренную длину линии.

15. Как производится оценка точности выполненных дальноммерных измерений? Какие методы используются для оценки точности работы дальноммера при его выпуске?

Глава V

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ДАЛЬНОМЕРНОЙ ТЕХНИКИ

§ 34. ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО УЛУЧШЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАЛЬНОМЕРОВ

В разработанных за последние годы свето- и радиодальноммерах достигнут достаточно высокий уровень автоматизации измерительного процесса в сочетании со сравнительно небольшими габаритами и массой прибора, а также потребляемым ими количеством электроэнергии. Однако запросы современного топографо-геодезического производства и других отраслей народного хозяйства предъявляют все новые, более высокие требования к дальноммерной технике. В частности, изучение деформаций земной коры в сейсмоактивных районах, строительство и последующее слежение за деформациями крупных инженерных сооружений, а также целый ряд других поставленных перед геодезией задач обуславливают необходимость дальнейшего повышения точности дальноммерных измерений.

К середине 80-х годов приборная точность лучших светодальноммеров, оцениваемая первым слагаемым в двучленных формулах для подсчета результирующей ошибки дальноммерных измерений [формула (120)], достигла величины около 0,1 мм. Для получения более высокой приборной точности на линиях небольшой протяженности (до нескольких десятков, а иногда и сотен метров) применяют геодезические интерферометры оптического диапазона, у которых световые излучения с длиной волны около 0,6 мкм одновременно выполняют роль как несущих, так и масштабных колебаний. Непосредственное измерение линий упомянутой длины такими интерферометрами сопряжено со значительными техническими трудностями, что обусловлено прежде всего отсутствием надежных методов разрешения неоднозначности для масштабных колебаний со столь малой длиной волны. Для преодоления этих трудностей линии измеряют методом «прокатки», т. е. посредством плавного перемещения отражателя в пределах всей длины измеряемой линии. В процессе выполнения таких измерений ведут счет интерференцион-

ных полос, что эквивалентно счету числа длин волн масштабных колебаний, укладываемых вдоль искомого расстояния. Этот метод вызывает необходимость монтажа специального рельсового пути, что практически не всегда удобно, а иногда и неосуществимо. Поэтому создатели дальномерной техники различных стран мира проводят исследования как в области разработки надежных и удобных для практического использования методов разрешения неоднозначности применительно к интерферометрам оптического диапазона, так и по повышению дальности действия этих приборов.

Другим не менее важным фактором, ограничивающим точность дальномерных измерений, является учет влияния внешних и прежде всего метеорологических условий. Это влияние обуславливает ошибку измерений, которая соответствует второму слагаемому в формуле (120).

Традиционный метод учета влияния атмосферы, основанный на использовании различных модификаций термометров, психрометров и барометров, которые устанавливают, как правило, по концам измеряемой линии, позволяет определить среднее вдоль этой линии значение показателя преломления воздуха с относительной погрешностью не выше $1 \cdot 10^{-6}$. Для дальнейшего повышения относительной точности дальномерных измерений в Советском Союзе и за рубежом в течение последних 15—20 лет проведены обширные исследования как по созданию и совершенствованию различного рода технических средств, так и по разработке более эффективных методических приемов.

Среди разработок, открывающих перспективу определения среднего значения показателя преломления воздуха с точностью около $1 \cdot 10^{-7}$, заслуживают внимания исследования по созданию дисперсионных оптических рефрактометров, базирующихся на использовании зависимости показателя преломления воздуха для оптического участка спектра от длины волны несущих колебаний.

Конструктивно эти рефрактометры, как правило, объединяют с дальномерами. Такие дальномеры-рефрактометры позволяют выполнять измерения на двух различных длинах волн, расположенных в различных участках оптического спектра (соответствующих, например, излучениям красного и синего цвета). Разность оптических путей, характерных для этих двух длин волн, используется в дальнейшем для подсчета интегрального значения показателя преломления воздуха вдоль траектории распространения оптических сигналов.

При разработке дальномеров-рефрактометров такого типа возникает необходимость выполнения измерений разности оптических путей с точностью в 20—50 раз выше, чем точность измерений по каждому дальномерному каналу, а при определении приборной поправки для разностного канала эта точность должна быть дополнительно повышена в 2—3 раза. Реализация

необходимой для таких измерений чувствительности дальномера-рефрактометра, исчисляемой в зависимости от длины линии единицами или десятками микрометров, сопряжена с чрезвычайно большими техническими трудностями, поэтому до настоящего времени не удается довести разработку дальномеров-рефрактометров дисперсионного типа до широкого практического применения.

Попытки замены используемых при дальномерных измерениях традиционных метеорологических приборов техническими устройствами более совершенного типа привели к тому, что в отдельных типах высокоточных светодальномеров для измерения показателя преломления воздуха в точке стояния дальномера стали применять модернизированный вариант резонаторного рефрактометра. Принцип его действия базируется на зависимости резонансной частоты объемного резонатора, входящего в состав рефрактометра, от плотности воздуха, заполняющего этот объем, которая, в свою очередь, функционально связана с величиной показателя преломления. Применение такого рефрактометра позволило повысить уровень автоматизации измерительного процесса за счет автоматической коррекции результатов измерений за величину показателя преломления воздуха. Однако существенно ослабить влияние внешних условий на точность измерений при этом не удалось.

Для решения этой проблемы в последние годы предпринимаются попытки использования зависимости результатов дальномерных измерений от уровня флуктуаций величины показателя преломления воздуха на пути прохождения светового сигнала от дальномера до отражателя. Исследования по совершенствованию этого метода с целью доведения его до широкого практического применения ведутся как в Советском Союзе, так и за рубежом.

Наряду с вышеизложенным исследователи различных стран мира продолжают уделять большое внимание совершенствованию методических приемов, не связанных с созданием специальных приборов. Большинство из этих приемов базируется на выборе благоприятных условий измерений, а также на зондировании атмосферы по всей траектории распространения используемых излучений или в нескольких промежуточных наиболее представительных точках. При этом во многих случаях для зондирования применяют те или иные летательные аппараты, снабженные соответствующими метеорологическими приборами для непрерывной регистрации вдоль трассы метеофакторов, используемых при обработке дальномерных измерений, или непосредственного значения показателя преломления воздуха.

Существенное повышение точности измерений на линиях значительной протяженности достигается при выполнении измерений в течение суток через равные интервалы времени и вычислении затем среднего значения. Исследователи отдельных стран

мира предлагают также использовать методику предвычисления наиболее благоприятного времени суток, когда вероятность появления значительных ошибок измерений из-за влияния метеорологических условий минимальна.

В тех случаях, когда дальномерные измерения выполняются с целью слежения за изменениями длины искомой линии, находит применение «верный» метод, при котором с пункта стояния дальномера по различным направлениям измеряется несколько линий. Одна из линий, длина которой, исходя из конкретных условий, подвержена наименьшим изменениям с течением времени, принимается за базисную. Как показали проведенные исследования, при использовании такого метода может быть достигнута относительная точность измерений, оцениваемая несколькими единицами седьмого десятичного знака.

Перспектива дальнейшего уменьшения габаритов и массы современных светодальномеров неразрывно связана с применением новых принципов построения оптических систем этих приборов, базирующихся, в частности, на применении интегральной и «плоской» оптики. Интегральная оптика, основанная на замене оптических трактов с лучевым прохождением сигналов на волноводные тракты, позволяющие канализировать свет внутри направляющих систем по различным изогнутым траекториям, открывает перспективу не только более компактного расположения различных оптических компонент внутри дальномера, но и иного, более рационального решения задач, связанных с модуляцией света, преобразованием оптических сигналов в электрические с помощью фотоприемника, а также коммутацией оптических каналов. Такие элементы интегральной оптики, как гибкие световоды, уже нашли широкое применение в современных светодальномерах.

«Плоская» оптика, основанная на использовании голографических принципов, открывает перспективу замены сравнительно тяжеловесных зеркал и линз, входящих в состав входной и выходной оптических систем, более легкими и компактными плоскими стеклянными пластинами. В результате нанесения на пластины соответствующих голографических интерференционных картин они приобретают свойства линз, которые используются для формирования расходящихся световых пучков в параллельные и наоборот.

При решении проблемы дальнейшего уменьшения потребляемого дальномером количества электроэнергии стремятся использовать более экономичные энергопотребляющие элементы схемы, а также такие режимы работы, при которых те или иные элементы и узлы схемы подключаются только на те моменты времени, когда они участвуют в измерительном процессе. В этой связи перспектива дальнейшего совершенствования импульсно-фазового метода заслуживает особого внимания.

Из анализа основных принципов действия фазовых дально-

меров следует, что непрерывная работа многих составных узлов прибора является неоправданной, поскольку потребление ими электроэнергии происходит и в те периоды времени, когда не требуется участие этих узлов в получении исходной информации о величине измеряемой дальности или при обработке этой информации, выполняемой непосредственно в дальномере. Накопленный к настоящему времени опыт дальномерных измерений свидетельствует о том, что для получения высокой точности измерений в сочетании с повышенной дальностью действия дальномеров целесообразно измерения выполнять фазовыми методами в течение сравнительно коротких интервалов времени. Для уменьшения величины случайных ошибок, обусловленных влиянием внешних условий, такие измерения целесообразно периодически повторять в автоматизированном режиме. Этим требованием в наибольшей степени удовлетворяет импульсно-фазовый метод.

Данный метод уже нашел широкое применение в топографических светодальномерах, благодаря которому удалось существенно повысить дальность действия при сохранении высокой точности измерений и небольшом количестве потребляемой электроэнергии. Использование импульсно-фазового метода в светодальномерах группы Г сдерживается пока из-за того, что параметры существующих источников излучения недостаточно полно отвечают предъявляемым к ним требованиям.

В радиодальномерных системах среднего и дальнего радиуса действия импульсно-фазовые методы также нашли широкое применение. В высокоточных геодезических радиодальномерах УКВ диапазона эти методы находят пока ограниченное применение из-за того, что до настоящего времени не удается найти простые способы его реализации.

Достигнутый за последние 10—20 лет прогресс в области автоматизации и вычислительной техники позволил осуществить разработку электрических схем дальномеров, в которых автоматизирован как процесс измерений, так и процесс предварительной обработки получаемой информации. Такая автоматизация существенно расширила эксплуатационные возможности дальномеров и прежде всего радиогеодезических систем, предназначенных для определения расстояний до движущихся объектов (судов, самолетов, наземных транспортных средств), так как появилась возможность оперативного получения информации о месте положения движущегося объекта независимо от скорости его перемещения.

В дальномерах, используемых при измерении длин линий между неподвижными конечными пунктами, автоматизация процесса измерений позволила существенно сократить время, затрачиваемое на выполнение отдельных приемов измерений и на последующую обработку результатов измерений. Во многих случаях на основе применения рациональных схем, реализующих

автоматизированный режим работы дальномера, удается сократить количество электроэнергии, затрачиваемой на измерение длины линии. Однако нерациональные методы автоматизации очень часто приводят к неоправданному усложнению схемы прибора, увеличению стоимости его изготовления и понижению надежности работы дальномера в полевых условиях. В связи с этим создатели дальномерной техники в своей ближайшей перспективе ставят перед собой цель дальнейшего повышения уровня автоматизации на основе использования простых и надежных в работе технических решений.

Внедрение автоматизированного режима работы в свето- и радиодальномеры стимулировало также разработку автоматизированных угломерных устройств, получивших название кодовых теодолитов. На базе совместного использования электронных дальномеров и кодовых теодолитов созданы комбинированные приборы, получившие название электронных тахеометров. Последние позволяют в автоматизированном режиме выполнять измерения как длин линий, так и углов, а также вычислять величину взаимного превышения концов искомой линии, горизонтальное проложение, погрешность выполненных измерений и другие интересующие потребителей величины. Во многих электронных тахеометрах получаемая информация передается для хранения в подключаемые к прибору внешние портативные запоминающие устройства. Последние в камеральных условиях используются в качестве входных устройств для передачи в ЭВМ хранящейся в них информации с целью дальнейшей обработки. Такая технологическая цепочка позволяет исключить из обращения полевой журнал.

К недостаткам разработанных в последние годы электронных тахеометров следует отнести сложность их устройства и высокую стоимость изготовления. В результате применение таких приборов на отдельных видах топографо-геодезических работ оказывается экономически неоправданным. Исходя из этого, многие фирмы и заводы-изготовители, выпускающие электронные тахеометры, уделяют значительное внимание поиску технических решений, которые позволили бы существенно упростить используемые схемные решения и уменьшить тем самым стоимость приборов, а также повысить надежность их работы в полевых условиях.

§ 35. РАСШИРЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДАЛЬНОМЕРОВ

При проведении разнообразных топографо-геодезических работ в современных условиях все настоятельнее выдвигаются требования существенного расширения эксплуатационных возможностей геодезической (в том числе и дальномерной) техники. Так, в районах с плохими климатическими условиями возникает не-

обходимость применения таких технических средств, которые позволяли бы проводить измерения при любых условиях видимости (при наличии тумана, дымки, повышенной запыленности воздуха и т. п.). Все более экономически необоснованным становится выполнение трудоемких подготовительных работ, связанных прежде всего со строительством геодезических наружных знаков. Решение этой проблемы обуславливает необходимость разработки технических средств и методов, позволяющих выполнять дальномерные измерения при отсутствии прямой видимости между конечными пунктами. На отдельных видах топографо-геодезических и маркшейдерских работ исключается возможность не только постройки наружных знаков, но и закрепления марок, а также установки на удаленном конце линии отражателя. На повестку дня ставится вопрос о развитии дальномерной техники, позволяющей выполнять измерения до различного рода диффузно отражающих поверхностей.

Одно из перспективных направлений дальнейшего развития дальномерной техники связано с решением проблемы полной автоматизации всего цикла выполняемых топографо-геодезических работ на базе использования специализированных автоматизированных комплексов, устанавливаемых на соответствующих движущихся объектах.

Отдельные из перечисленных выше проблем уже нашли свое практическое воплощение, а другие находятся на стадии исследований. В связи с этим рассмотрим вкратце основные подходы, которые используются в настоящее время при решении перечисленных проблем.

Как известно, особенности создания «всепогодных» дальномеров неразрывно связаны с правильным выбором в качестве носителей информации об измеряемой дальности соответствующих излучений, способных не только беспрепятственно распространяться вдоль измеряемой линии при любых метеорологических условиях, но и сохранять при этом определенную траекторию. Это необходимо для того, чтобы имелась возможность однозначного отождествления траектории, представляющей ту или иную пространственную кривую, с интересующей геодезистов длиной линии между конечными пунктами.

Накопленный к настоящему времени опыт свидетельствует о том, что этим требованиям в наибольшей степени отвечают радиоволны следующих диапазонов: для высокоточных измерений линий длиной до нескольких десятков километров с погрешностью, не превышающей 1 м, — УКВ диапазон; для измерения линий протяженностью в несколько сотен километров с погрешностью 10—20 м — средневолновый диапазон; для измерения линий протяженностью в несколько тысяч километров с погрешностью, соответствующей нескольким сотням метров, — длинноволновый и сверхдлинноволновый диапазоны. В связи с этим в ближайшей перспективе наряду с совершенствованием даль-

номеров, работающих в оптическом диапазоне и обеспечивающих наиболее высокую точность измерений, предусматривается дальнейшее развитие и совершенствование «всепогодной» радиодальномерной техники. На базе использования этой техники успешно решается также и проблема измерения длин линий, исключающая необходимость постройки геодезических наружных знаков. В частности, на отдельных видах геодезических работ уже в настоящее время находят применение радиодальномеры с выносными приемопередатчиками, устанавливаемые на перевозимые раздвижные мачты высотой до 30 м. Примером технического средства может служить радиодальномер «Луч».

На линиях значительной протяженности (до нескольких сотен километров) находят применение радиодальномерные системы, базирующиеся на использовании отражений, образующихся при тропосферном рассеянии радиоволн. Характерная для таких измерений искривленная траектория распространения информационных радиосигналов позволяет вычислить длину линии между конечными пунктами с ошибкой в несколько метров.

Проблема измерения расстояний до диффузно отражающих поверхностей (стены зданий, поверхности земных пород, встречающихся при выполнении маркшейдерских работ, отдельные объекты на земной и водной поверхности и т. п.) решается, как правило, с использованием технических средств, работающих в оптическом диапазоне (видимом или инфракрасном). Из-за неопределенности отражающих свойств и неровностей диффузных поверхностей дальность действия и точность измерений таких светодальномеров могут изменяться в широких пределах. Для получения достаточного по величине отраженного сигнала, обеспечивающего нормальную работу дальномера, как правило, используется импульсный режим работы, позволяющий излучать значительные по величине импульсные сигналы. При работе с импульсными светодальномерами были получены отраженные сигналы от такой диффузно отражающей поверхности, как поверхность Луны, т. е. на расстоянии около 350 тыс. км. На земной поверхности светодальномеры такого типа применяются для измерения длин линий до нескольких десятков километров с погрешностью, лежащей в пределах от десятков сантиметров до нескольких метров. При дальнейшем совершенствовании технических средств первоочередной задачей является проблема повышения точности измерений.

Комплексная автоматизация линейных и угловых измерений также позволяет существенно расширить эксплуатационные возможности используемых при выполнении топографо-геодезических работ дальномерных и угломерных устройств. Наибольшие успехи в этой области достигнуты в процессе разработки электронных тахеометров, при практическом использовании которых удалось не только автоматизировать полевой процесс измерений и вычислений, но и внедрить новые формы регистрации полу-

чаемой информации, ее хранения, распечатки, а в случае необходимости ввода этой информации в ЭВМ с целью дальнейшей обработки совместно с другими данными. Такие проблемы, как ручной перенос и ручная установка отражателя над каждой реперной точкой, решаются с помощью высокоавтоматизированных топографических и геодезических систем, устанавливаемых на транспортные средства. К этим системам наряду с высоким уровнем автоматизации предъявляются требования «всепогодности», высокой надежности работы в полевых условиях, минимального состава обслуживающего персонала, невысокой стоимости изготовления и обслуживания таких систем, малого энергопотребления и др. Поиск компромиссных решений, удачно сочетающих в себе противоречивые требования, — одна из основных проблем, над решением которой работают создатели современной геодезической техники как в Советском Союзе, так и за рубежом.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Перечислите направления, открывающие перспективу дальнейшего улучшения основных технических характеристик дальномеров.

2. Для каких целей рационально использовать интерферометры оптического диапазона?

3. Чем отличаются дальномеры-рефрактометры от обычных светодальномеров?

4. Какие существуют методические приемы, позволяющие повысить точность дальномерных измерений?

5. За счет каких технических решений открывается перспектива дальнейшего уменьшения размеров и массы светодальномеров?

6. Какие принципы построения дальномерной техники позволяют уменьшить энергопотребление?

7. Какие технические характеристики удалось улучшить в результате автоматизации процесса измерений в современных дальномерных?

8. Какие проблемы необходимо решить в области линейных измерений с целью существенного повышения производительности труда полевых бригад?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большаков В. Д., Деймлих Ф., Голубев А. Н., Васильев В. П. Радиогеодезические и электрооптические измерения. М., Недра, 1985.

2. Камен Х. Электронные способы измерений в геодезии. Пер. с нем. М., Недра, 1982.

3. Лобачев В. М. Радиоэлектронная геодезия. М., Недра, 1980.

4. Лаурила С. Электронные измерения и навигация. Пер. с англ. М., Недра, 1981.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ СВЕТО- И РАДИОДАЛЬНОМЕРОВ

1. Светодальномеры группы Г

Марка даль- номера	Изготови- тель	Источник излучения	Способ реги- страции изме- ряемой величины	Дальность действия, км	Средняя квадра- тическая ошибка из- мерений, см	Потребля- емая мощ- ность, Вт	Масса при- емопере- датчика, кг	Рабочий темпе- ратурный диа- пазон, °С
«Кварц»	СССР	Гелий-неоно- вый лазер	Аналоговый	30 (днем) 50 (ночью)	$1+2 \cdot 10^{-6} D$	140	25	$-15 \div +35$
«Гранат»	»	»	Аналоговый*	20	$0,5+2 \cdot 10^{-6} D$	50	15	$-10 \div +35$
СГ-3	»	То же	Цифровой	20 (днем) 30 (ночью)	$0,4+1 \cdot 10^{-6} D$	400	56**	$-20 \div +30$
Геодиметр 8	Швеция («АГА Гео- троникс»)	»	Аналоговый	60	$0,5+1 \cdot 10^{-6} D$	75	23	$-25 \div +35$
Геодиметр 600	То же	»	То же	40	$0,5+1 \cdot 10^{-6} D$	26	15	$-40 \div +40$
Рейнджмас- тер II	США («Койфель и Эссер»)	»	Цифровой	60	$0,5+1 \cdot 10^{-6} D$	60	18	$-28 \div +54$ ***
Рейнджер V	То же	»	»	25	$1+2 \cdot 10^{-6} D$	60	16,2	$-28 \div +54$

Примечания: * При проведении модернизации введен цифровой способ регистрации. ** В данную величину включены масса приемопередатчика, блока управления и счетчика. *** Приведенная в данной таблице средняя квадратическая ошибка обеспечивается в диапазоне от -6 до $+43$ °С.

2. Светодальномеры группы Т

Марка дальномера	Изготовитель	Дальность действия, км	Средняя квадратическая ошибка измерений, см	Потребляемая мощность, Вт	Время одного измерения, с	Масса приемопередатчика, кг	Рабочий температурный диапазон, °С
2СМ-2	СССР	2	2	20	120	12,5*	-30÷+40
СМ-5	»	0,5	3	5	10	4,5	-30÷+40
«Блеск» СТ 5	»	5	$1+5 \cdot 10^{-6} D$	5	—	5	-30÷+40
«Ювелир» 1	»	1,0	1	5,5	15	5,6	-30÷+40
ЕОК 2000	ГДР («Карл Цейс Йена»)	2,5	1	10	60—120	12	-30÷+45
Геодиметр 14А	Швеция («АГА Геотроникс»)	15	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D$	17	10—15	2,5	-20÷+50
Геодиметр 112	То же	4,8	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D^{**}$ $2,0+5 \cdot 10^{-6} D^{***}$	—	5—10	2,6	-20÷+50
Геодиметр 210	»	7,0	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D^{**}$ $(1-2)+5 \cdot 10^{-6} D^{***}$	—	5—7	1,1	-20÷+50
Эльди 2	ФРГ («Оптон»)	3	$(0,5-1)+2 \cdot 10^{-6} D$	5	5	4,2	-20÷+50
Дистомат DJ-20	Швейцария («Вильд»)	14	$0,5+1 \cdot 10^{-6} D$	5	6	3,7	-20÷+50
DM-503	Швейцария («Керн»)	5	$0,3+2 \cdot 10^{-6} D$	5	7,5	1,6	-20÷+50

Битл	США («Пресниж интер-нейш»)	3	$0,6+4 \cdot 10^{-6} D$	—	7	2,5	$-20 \div +50$
Сайтейш CJ-450	То же	4	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D$	9	8	2,8	$-20 \div +50$
НР 3805А	США («Хьюлетт-Паккард»)	1,6	$0,7+7 \cdot 10^{-6} D$	—	6	7,7	$-10 \div +40$
НР 3808А	То же	10	$0,5+1 \cdot 10^{-6} D$	—	9	7,8	$-20 \div +55$
Авторейнджер III	США («Койфель и Эсер»)	3,6	$0,5+2 \cdot 10^{-6} D$	14	—	2,6	$-7 \div +41$
Микрорейнджер II	То же	3,2	$1,0+2 \cdot 10^{-6} D$	18	—	1,35	$-6 \div +43$
DM-80	США («Кьюбик Пресниж»)	1,3	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D$	—	5	1,3	$0 \div +40$
CD-6	Великобритания («Теллуrometer» — филиал фирмы «Плесси»)	2,0	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D$	5	—	3	$-20 \div +44$
RED 2L	Япония («Соккиша»)	9,8	$0,5+3 \cdot 10^{-6} D$	—	6	2	$-20 \div +50$
RED mini 2	То же	1	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D$	—	5	0,7	$-10 \div +50$
ND-21	Япония («Никон»)	2,0	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D$	—	5	2,2	$-25 \div +55$
ND-31	То же	3,5	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D$	—	5	2,4	$-20 \div +50$
DM-A2	Япония («Топкон»)	1,0	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D$	—	4	2,2	$-10 \div +40$
DM-S3	То же	3,5	$0,5+5 \cdot 10^{-6} D$	—	4	2,3	$-20 \div +50$

Примечания. * Масса приемопередатчика и электронного блока. ** В автоматическом режиме измерений при фиксированном положении отражателя. *** В режиме автоматического отслеживания за перемещающимся отражателем.

1. В качестве источника излучения во всех светодальномерах группы Т используются полупроводниковые светодиоды, причем в последних типах дальнометров все чаще применяются светодиоды, работающие в лазерном режиме. В связи с чем осуществляется переход на импульсный и импульсно-фазовый метод измерений. 2. В светодальномерах данной группы, как правило, применяются цифровой способ регистрации измеряемого расстояния, а также автоматизированный процесс измерений. 3. В последние годы изготовители очень часто не указывают величину потребляемой мощности, так как она не остается постоянной в процессе измерения. Для оценки величины потребляемого дальнометром количества электроэнергии во многих случаях приводится число линий, которое может быть измерено без перезагрузки измерений в приборе аккумуляторной батареи.

3. Светодальномеры группы П

Марка дально- мера	Изготови- тель	Источник излу- чения	Способ регист- рации измере- мой величины	Дальность действия, км	Средняя квад- ратическая ошибка измере- ний, мм	Потребляе- мая мощ- ность, Вт	Масса при- емопере- датчика, кг	Рабочий температур- ный диапа- зон, °C
ДК 001	СССР	Люминесцентный арсенид-галлиевый светодиод	Цифровой	0,5	$0,8 + 1,5 \cdot 10^{-6} D$	35	14,5*	$-15 \div +40$
«Топаз СП2»	»	То же	То же	2,0	$1 + 1 \cdot 10^{-6} D$	12	6	$-30 \div +40$
МСД-1М	»	»	Аналоговый	0,5	$2 + 5 \cdot 10^{-6} D$	3	9,5	$-10 \div +40$
ДВСД-1200	»	Гелий-неоновый лазер	То же	0,25	$0,25 + 1 \cdot 10^{-6} D$	70 ÷ 90	27	—
Мекометр МЕ 3000	Швейцария («Керн»)	Ксеноновая им- пульсная лампа	»	2,5	$0,2 + 1 \cdot 10^{-6} D$	25	14,5	$-20 \div +40$
Мекометр МЕ 5000	То же	Гелий-неоновый лазер	Цифровой	8,0	$0,2 + 0,2 \cdot 10^{-6} D$	24	11	$-10 \div +40$
Геоменсор CR 204	Велико- британия («Ком-Рад»)	Импульсная лампа	То же	10,0	$0,1 + 0,1 \cdot 10^{-6} D$	30	26**	$-20 \div +50$

Примечания: * Масса приемопередатчика и электронного блока. ** Масса дальномера вместе с принадлежностями.

4. Радиодальномеры

Марка дальномера	Изготовитель	Диапазон несущих частот, ГГц	Способ регистрации измерений	Дальность действия, км	Средняя квадратическая ошибка измерений, см	Потребляемая мощность, Вт	Масса одной станции, кг	Рабочий температурный диапазон, °C
«Луч»	СССР	8,6÷8,9	Аналоговый	60	$3+3\cdot 10^{-6} D$	80	21,0*	-35÷+45
«Волна»	»	8,6÷8,9		15	$3+3\cdot 10^{-6} D$	10	10	-15÷+35
«Трап»	»	8,6÷8,9	Цифровой	15	$3+3\cdot 10^{-6} D$	18	12	-15÷+35
РДЛ	»	8,6÷8,9	Аналоговый	10	$3-5$ $10-20^{**} D$	8	5,5*	-10÷+30
МТ-А1	ВНР (МОН)	10,1÷10,5	Цифровой	2** 70	$1+2\cdot 10^{-6} D$	35	21,6*	—
SIAL MD 60	Швейцария («Сименс-Альбис»)	10,324÷10,335	То же	150	$1+3\cdot 10^{-6} D$	36	17,4*	-30÷+50
Теллуrometer MRA5	Великобритания («Теллуrometer» — филиал «Плессин»)	10,0 ÷ 10,5	»	50	$1+3\cdot 10^{-6} D$	42	18*	-32÷+44
Теллуrometer MRA7	То же	16,2÷16,3 или 17,4÷17,5	»	50	$1,5+3\cdot 10^{-6} D$	10	4,0	-20÷+55
Теллуrometer CA 1000	»	10,1 ÷ 10,45	Аналоговый	30	$1,5+5\cdot 10^{-6} D$	4,6	1,6	-20÷+50
Теллумат CMW 20	Великобритания («Теллуrometer» — филиал «Плессин»)	34,5÷34,9	Цифровой	25	$0,5+3\cdot 10^{-6} D$	12	4,0	-20÷+52

Примечания: * Масса выносного приемопередатчика и индикаторного блока. ** Лаговый режим, характерный для измерения расстояний между движущимися объектами.

5. Радиогеодезические системы УКВ диапазона

Марка системы	Изготовитель	Состав системы	Диапазон несущих ча- стот, ГГц	Дальность действия, км	Средняя квад- ратическая ошибка изме- рений, м	Потребляе- мая мощ- ность, Вт		Масса одной станции, кг	
						борто- вая	назем- ная	борто- вая	назем- ная
РДС-2	СССР	Одна бортовая, три наземных	$0,31 \div 0,35$	400	$1 + 1 \cdot 10^{-5} D$	1200	300	—	—
АРГС	»	»	$0,31 \div 0,35$	60—100	10	150	5	50	10
ГРАС	»	Одна бортовая, две и более наземных	$4,1 \div 4,2$	60	$0,7 + 1 \cdot 10^{-5} D$	800	350	—	—
«Прибой»	»	Одна бортовая, две наземных	$8,6 \div 8,9$	25—30	1	160	60	35*	35*
Теллуrometer MRB201	Великобритания («Теллу- рометр» — филиал «Плессни»)	То же	$2,8 \div 3,2$	50—250**	$1 + 3 \cdot 10^{-6} D$	48	32	14	14
Теллуrometer MRD 1	То же	Одна бортовая, две или три наземных	$2,9 \div 3,3$	100	$1 + 3 \cdot 10^{-6} D$	90	40	23,4*	10,5
Гидрофлекс	»	То же	$2,9 \div 3,3$	40	$1 + 3 \cdot 10^{-6} D$	80	35	21,5*	10,5

Автотейп DM-40	США («Кьюбик Вестерн»)	»	2,9÷3,1	150	$0,5+1\cdot 10^{-5} D$	100	75	23	9
Мини-рейнджер III	США («Моторо- ла»)	Одна бортовая, две или более наземных	5,4÷5,6	37—200**2		60—80	18	14,5	4,3
Силедис В	Франция («Серсель»)	То же	0,40÷0,45	120	1—3***	120	37	23—25	15
Ауднстор 8D-100	Япония («Электро- ник Корпорейшн»)	Одна бортовая, две наземных	2,9÷3,2	100	$0,5+1\cdot 10^{-5} D$	150	50	25	11
Артемис Мк III-S****	Нидерланды («Христиан Хай- генс-лаборато- риум»)	Одна бортовая, одна наземная	9,23÷9,26	30	1,5	60	60	15	15

П р и м е ч а н и я: * Масса выносного приемопередатчика и индикаторного блока. ** В зависимости от типа применяемой антенны. *** Точность существенно зависит от того, производятся ли измерения в зоне прямой видимости или за ее пределами. **** Дальномерно-угломерная система, позволяющая производить измерения не только дальностей, но и углов со средней квадратической ошибкой 0,03°.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ЕДИНОМ ЭТАЛОНЕ ЕДИНИЦ ВРЕМЕНИ, ЧАСТОТЫ, ДЛИНЫ

Метрологическая аттестация современных свето- и радиодальномеров выполняется с помощью образцовых средств измерений времени, частоты и длины, причем размер перечисленных единиц измерений передается по метрологической цепочке от первичных эталонов.

К настоящему времени в международной практике принят единый первичный эталон времени, частоты и длины. Основу данного эталона составляет квантовый стандарт частоты, представляющий собой генератор незатухающих электрических колебаний, стабилизация частоты которых осуществляется за счет атомных процессов, возникающих при переходах возбужденных атомов с одного энергетического уровня на другой. В СССР в качестве такого эталона принят цезиевый стандарт частоты, в котором возбуждаются колебания с частотой 9 192 631 770 Гц. Воспроизводимость значения этой частоты оценивается относительной погрешностью не более $5 \cdot 10^{-14}$.

Применительно к данному эталону, секунда как основная единица времени соответствует 9 192 631 770 периодам этого стандарта частоты.

Для распространения размера упомянутых единиц в оптический диапазон в СССР создан радиооптический мост, представляющий собой набор технических средств, позволяющих с помощью эталона частоты стабилизировать частоты высокостабильных газовых лазеров.

Основой государственного первичного эталона длины служит при этом длина волны стабилизированных лазеров, частота излучения которых воспроизводится с относительной погрешностью около $1 \cdot 10^{-11}$. Связь между размерами единиц длины и частоты устанавливается через скорость распространения электромагнитных волн в вакууме, величина которой постулируется равной 299 792 458 м/с.

В соответствии с этим метр как основная единица длины определяется как длина пути, которую проходит свет в вакууме в течение $1/299\,792\,458$ доли секунды.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ, ПРИНЯТЫЕ В ТЕКСТЕ

АД — амплитудный детектор
ADP — дигидрофосфат аммония
(электрооптический кристалл)
АМ — амплитудная модуляция
KDP — дигидрофосфат калия (электрооптический кристалл)
ОЛЗ — оптическая линия задержки
ОКЗ — оптическое короткое замыкание
СВЧ — сверхвысокие частоты
УКВ — ультракороткие волны

УНЧ — усилитель низкой частоты
УПЧ — усилитель промежуточной частоты
ФАП — фазовая автоматическая подстройка
ФК — фотокатод
ФМ — фазовая модуляция
ФЭП — фотоэлектронный приемник
ФЭУ — фотоэлектронный умножитель
ЧД — частотный детектор
ЧМ — частотная модуляция

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

МНОЖИТЕЛИ И ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

Множитель	Приставка	Русское обозначение приставки	Множитель	Приставка	Русское обозначение приставки
10^9	гига	Г	10^{-2}	санти	с
10^6	мега	М	10^{-3}	милли	м
10^3	кило	к	10^{-6}	микро	мк
10^2	гекто	г	10^{-9}	нано	н
10^1	дека	да	10^{-12}	пико	п
10^{-1}	деци	д			

- Автогенератор 134
Аксиальные типы колебаний 114
Активный ответчик 91
Амплитуда колебаний 20
Амплитудная модуляция 30
Амплитудно-фазовая погрешность 201
Анализатор 149
Анизотропия 145
 — естественная 146
 — искусственная 146
Антенна Кассегрена 174

Варактор 160
«Веерный» метод 351
Визуальные светодальномеры 37
Внешние модуляторы света 144
Внутренняя модуляция 143
Волновод 172

Гармонические колебания 21
Генератор на диоде Ганна 131
Генератор счетных импульсов 39
Гетеродин 42
Грубые отсчеты 337

Дальномер-рефрактометр 348
Датчик интервала времени счета 39
Двойное лучепреломление 145
Девнация частоты 32
Диаграмма направленности 173
Диафрагма 167
Дисперсионные оптические рефрактометры 348
Дисперсия 66
Домен 132

Зеркальная антенна 174

Импульсный светодальномер 12
Импульсные сигналы
 — — стартовые 207
 — — стоповые 207
 — — счетные 39

Инверсия населенности 112
Индекс преломления 66
Индекс фазовой модуляции 36
Индекс частотной модуляции 33
Индукцированное излучение 111
Инжекция 119
Интегральная оптика 351
Интерференционный светофильтр 167
Информационный сигнал 17
Источники излучения 104

Кварцевые генераторы 136
Кварцевые резонаторы 136
Коаксиальная оптическая система 166
Колебания 20, 21
 — масштабные 29
 — модулированные 30
 — несущие 29
Колесательное движение 20
Компенсационная ячейка Керра 239
Компенсационный метод фазовых измерений 38
Коэффициент глубины модуляции 30
 — неоднозначности 56
 — отражения подстилающей поверхности 326
 — пропускания атмосферы 58
 — усиления антенны 173
Кристаллы электрооптические 145
 — АДР 146
 — КДР 146
 — ниобата лития 146

Лазеры 110
 — газовые гелий-неоновые 116
 — инжекционные с гетеропереходами 121
 — полупроводниковые 118
Лучистый поток 105
Люминесцентные светодиоды 122

Метеорологические поправки 340
Метод прокатки 348

Методы измерений 7

- косвенные 7
- импульсно-фазовые гетеродинные 42
- импульсные 11
- прямые 7

Методы разрешения неоднозначности 47

- — — с плавным изменением частоты 48
- — — с использованием фиксированных масштабных частот 50

Механический центр дальномера 74

Многомодовый режим работы лазера 113

Модуляционная характеристика 150

Модуляция гармонических колебаний 29

Наклонная дальность 341

Настройка объемного резонатора 129

- механическая 129
- электрическая 129

Нейтральный фильтр 167

Нелинейные искажения 200

Неоднозначность определения длины 26

Низкочастотный метод фазовых измерений 41

Объемный резонатор 125

Одночастотный режим работы лазера 114

Одномодовый режим работы лазера 113

«Окна прозрачности» атмосферы 59

Опорный сигнал 16

Оптический резонатор 112

Оптический фазовращатель 151

Отражательный клистрон 126

Передающая оптическая система 163

Период колебаний 5

«Плоская» оптика 351

Плоскость поляризации 108

Поверхностная плотность потока излучения 106

Показатель преломления среды 65

— — — фазовый 69

— — — групповой 69

Полуволновое напряжение 148

Полупрозрачная пластина 12

Поляризатор 149

Поляризованный свет 108

Поляроид 149

Порог чувствительности 181

Приборная поправка дальномера 72

Прием измерений 336

Приемная оптическая система 165

Программа измерений 336

Пространственная селекция 167

Пьезоэффект

— прямой 137

— обратный 137

Раднус кривизны траектории электромагнитных волн 63

Разветвитель 172

Регламентные работы 334

Резонаторный рефрактометр 349

Рупорная антенна 173

Световой поток 105

Светофильтр 167

Система фазовой автоподстройки 202

Скорость распространения электромагнитных волн 64

— — — в вакууме 65

— — — групповая 69

— — — «огнибающая» 68

— — — фазовая 68

Спектр излучения источника 107

Спектральная селекция 167

Спонтанное излучение 111

Способ круговой развертки 37

Текущая фаза 19

Телескопическая коллимирующая система 165

Темновой ток 180

Термокомпенсация 139

Термостат 140

Термостатирование 140

Точные отсчеты 338

Траектория распространения элек-

тромагнитных волн 62
Трипельпризма 170

Угловая скорость вращения 14
Угол Брюстера 115
Уравнения гармонических колебаний 20

«Фазовость» светового пучка 124, 330

Фазовая модуляция 35

Фазовращатель 194

Фазовый детектор 38, 196

Фазовый угол 14

Фазометр 191

— компенсационный 193

— цифровой 40

— интегрирующий 204

Фидерная линия 172

Формула Коши 66

— Рэлея 70

— Фрума и Эссена 72

Фотодиод 183

Фотоэлектронный приемник света 176

Фотоэлектронный умножитель 177

Циклические ошибки 331

Цифровые методы фазовых измерений 39

Частота колебаний 15

Частотная модуляция 32

Четвертьволновая пластина 152

Чувствительность фотоумножителя

— световая (анодная) 179

— спектральная 180

— частотная 181

Ширина диаграммы направленности 173

Электрический центр дальномера 73

Электронный ключ 39, 205

Электрооптический эффект

— поперечный 152

— продольный 147

Эллиптически поляризованный свет 145

Эффект деградации электролюминесценции 123

Эффект Керра 146

— Поккельса 146

Яркость излучающей поверхности 107

Ячейка Керра 155

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава I. Теоретические основы геодезических свето- и радиодальномеров	7
§ 1. Прямые и косвенные методы измерений	7
§ 2. Выбор носителя информации	8
§ 3. Выбор принципа измерения малых временных интервалов	10
§ 4. Основная рабочая формула фазового дальномера	13
§ 5. Общие принципы построения функциональной схемы фазового дальномера	14
§ 6. Взаимосвязь между вращательным и колебательным движениями	16
§ 7. Длина волны излучаемых электромагнитных колебаний	19
§ 8. Несущие и масштабные колебания	22
§ 9. Основные принципы управления несущими колебаниями	24
§ 10. Методы фазовых измерений, используемые в дальномерах	30
§ 11. Импульсно-фазовый гетеродинный метод	35
§ 12. Методы разрешения неоднозначности, применяемые в свето- и радиодальномерах	38
§ 13. Особенности распространения электромагнитных волн, учитываемые при дальномерных измерениях	46
§ 14. Скорость распространения электромагнитных волн	52
§ 15. Приборные поправки дальномеров и методы их учета	58
Вопросы и упражнения	65
Глава II. Обобщенные функциональные схемы дальномеров и их основные компоненты	68
§ 16. Общие положения	68
§ 17. Обобщенная функциональная схема дальномера с пассивным ответом	69
§ 18. Обобщенная функциональная схема дальномера с активным ответом	72
§ 19. Источники несущих электромагнитных колебаний	83
§ 20. Источники колебаний масштабной частоты	106
§ 21. Модуляторы	112
§ 22. Системы для направленного излучения и приема несущих колебаний	129
§ 23. Приемники электромагнитных колебаний оптического и УКВ диапазонов	141
§ 24. Фазоизмерительные устройства	154
Вопросы и упражнения	170
Глава III. Основные типы дальномеров	173
§ 25. Классификация дальномеров	173
§ 26. Геодезические светодальномеры группы Г	174
§ 27. Светодальномеры группы Т	200
§ 28. Светодальномеры группы П	224
§ 29. Радиодальномеры и радиогеодезические системы	232
Вопросы и упражнения	252

Глава IV. Методы измерения и вычисления длин линий, определяемых дальномерами	255
§ 30. Общие положения	255
§ 31. Основные источники ошибок дальномерных измерений	255
§ 32. Особенности работы с дальномером на пункте	270
§ 33. Обработка результатов дальномерных измерений	272
Вопросы и упражнения	279
Глава V. Основные направления и перспективы дальнейшего развития дальномерной техники	280
§ 34. Пути дальнейшего улучшения основных технических характе- ристик дальномеров	280
§ 35. Расширение эксплуатационных возможностей дальномеров	285
Вопросы и упражнения	288
Список литературы	288
<i>Приложение 1. Технические характеристики отечественных и зарубежных свето- и радиодальномеров</i>	<i>289</i>
<i>Приложение 2. Краткие сведения о едином эталоне единиц времени, частоты, длины</i>	<i>296</i>
<i>Приложение 3. Сокращения терминов, принятые в тексте</i>	<i>296</i>
<i>Приложение 4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц</i>	<i>297</i>
Предметный указатель	298

Генике А. А., Афанасьев А. М.

Г 34 **Геодезические свето- и радиодальномеры: Учебник для техникумов. — М.: Недра, 1988.—302 с.: ил.**

ISBN 5—247—00267—9

Изложены теоретические основы современных геодезических свето- и радиодальномеров, приведены их классификации и основные типы. Рассмотрены обобщенные функциональные схемы дальномеров и их основные компоненты. Приведены краткие описания используемых в топографо-геодезическом производстве дальномеров. Изложены методы измерения длин линий, обработки получаемых результатов измерений и ведения полевой документации. Подробно рассмотрены источники ошибок дальномерных измерений. Раскрыты основные направления и перспективы развития дальномерной техники и автоматизации измерительных процессов.

Учебник предназначен для учащихся топографических техникумов.

Г 1902020000—169
043(01)—88 6—88—св. план для сред. спец. уч. завед.

ББК 26.1

УЧЕБНИК

Генике Аркадий Александрович
Афанасьев Анатолий Михайлович

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СВЕТО- И РАДИОДАЛЬНОМЕРЫ

Заведующий редакцией *Л. Г. Иванова*
Редактор издательства *Т. А. Борисова*
Технический редактор *О. А. Колотвина*
Корректор *Г. Л. Петушкова*

ИБ № 7279

Сдано в набор 16.12.87. Подписано в печать 10.03.88. Т-05841. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1. Гарнитура Литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 19,0. Усл. кр.-отт. 19,0. Уч.-изд. л. 20,28. Тираж 6300 экз. Заказ 1496/1446—8. Цена 95 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 125047, Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Московская типография № 11 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113105, Москва, Нагатинская ул., д. 1.