

В.С.МИХЕЕЧЕВ

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ
СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ

В. С. МИХЕЕЧЕВ

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ



МОСКВА. НЕДРА. 1979

Михеичев В. С. Геодезические светодальномеры. М., «Недра», 1979, с. 222.

Рассматриваются теоретические основы геодезических светодальномеров, анализируются особенности модуляции и демодуляции светового потока по поляризации и интенсивности, включая индикацию определенной разности фаз различными способами. Приведены данные исследований влияния атмосферы на проходящий через нее узконаправленный и модулированный световой поток, описаны методики расчета светодальномеров на точность, энергетического расчета оптической схемы светодальномерных комплектов, а также расчета передающей и приемной оптических систем светодальномеров. Освещаются вопросы классификации современных светодальномеров, даны технические сведения об источниках и приемниках излучения и модуляторах, применяемых в геодезических светодальномерах, схемные решения и примеры расчета геодезических светодальномеров основных типов.

Показано, что гарантирование определенного уровня принятого светового потока, несущего измерительную информацию, обеспечивает требуемую дальность действия и заданную точность светодальномера.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, создающих светодальномеры и работающих с ними, она может быть использована студентами оптических и геодезических специальностей при изучении соответствующих курсов, при курсовом и дипломном проектировании.

Табл. 13, ил. 67, список лит. — 140 названий.

Успехи, достигнутые современным приборостроением, предопределили весьма существенные усовершенствования различных косвенных средств и способов измерения расстояний. Наиболее точными перспективными из них являются светодальномеры, основанные на использовании электромагнитных волн в видимом оптическом диапазоне.

В данной работе изложены теоретические основы, результаты исследований и принципы проектирования и расчета геодезических светодальномеров, впервые появившихся в середине XX столетия и позволивших к настоящему времени полностью заменить сложные и трудоемкие непосредственные линейные измерения, выполняемые ранее в полевых условиях при помощи мерных лент и проволок.

В обширной литературе, посвященной геодезическим светодальномерам, основное внимание сосредоточено либо на рассмотрении отдельных вопросов теории и расчета, либо на описании конструктивных особенностей конкретных светодальномеров и результатов их испытаний [10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 21, 22, 31, 32, 36, 40, 55, 58, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 69, 74, 76, 77, 78, 81, 84, 85, 88, 92, 95, 101, 102, 104, 108, 112, 115, 116, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 132, 134, 136, 137, 138, 140], и имеется сравнительно небольшое число работ, в которых вопросы теории светодальномеров рассматриваются в обобщенном виде. Однако подавляющее большинство этих работ [29, 54, 93, 110], являющихся учебниками и учебными пособиями для студентов геодезических специальностей, посвящено в основном описанию принципа действия и конструктивных особенностей серийно выпускаемых светодальномеров, а вопросы, связанные с расчетом и проектированием, оставлены без внимания. Очень кратко изложены вопросы теории и расчета светодальномеров в работах [1, 21, 37, 50, 57, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 95, 129]. В монографии [111] рассмотрены лишь вопросы, связанные с выбором и расчетом оптических элементов геодезических светодальномеров, а в работе [92] — некоторые конструктивные особенности фазовых светодальномеров, в которых использована сверхвысокочастотная модуляция.

Создание новых и совершенствование существующих геодезических светодальномеров является одной из основных проблем современного геодезического приборостроения. Из большого круга вопросов, связанных с решением этой довольно широкой и сложной проблемы, в настоящей книге рассмотрены вопросы обеспечения требуемой точности измерения расстоя-

ний заданного диапазона, с выбором функциональной схемы светодальномера, при этом предусматривается возможность использования светодальномера в локационном режиме, а также с пассивным или активным отражателями. Проанализированы теоретические основы фазовых геодезических светодальномеров, особенность модуляции и демодуляции светового потока по поляризации и интенсивности, включая индикацию определенной разности фаз различными способами, влияние атмосферы на проходящий через нее узконаправленный и модулированный световой поток.

Приведены краткие технические сведения об источниках и приемниках излучения, а также модуляторах света, применяемых в геодезических светодальномерах. Дана классификация современных светодальномеров. Доказано теоретически и убедительно показано на приведенных примерах расчета и проектировании геодезических светодальномеров основных типов, что гарантирование определенного значения принимаемого светового потока, несущего измерительную информацию, обеспечивает, по существу, требуемую дальность действия и точность светодальномера, следовательно, определяет выбор, помимо функциональной схемы, оптической схемы светодальномерного комплекта, основных оптических конструктивных элементов и узлов. Отмечены некоторые направления дальнейшего совершенствования геодезических светодальномеров.

Современные геодезические светодальномеры являются активными оптико-электронными приборами, работа, конструктивные и технические параметры которых зависят не только от оптических, но и от различных радиотехнических, электронных, счетно-решающих и автоматических устройств, блоков и элементов. Например, точность светодальномерных измерений зависит от влияния погрешностей генератора модулирующего электрического сигнала, частотомеров, фазоизмерительных устройств, счетчиков калиброванных временных импульсов, автоматических устройств, обеспечивающих определенные условия и режимы работы ответственных узлов, счетно-решающих устройств, гарантирующих определенную методику и программу измерений. Величина потребляемой светодальномером электрической энергии складывается, в частности, из энергетических затрат, необходимых для обеспечения нормального функционирования радиотехнических, автоматических и счетно-решающих устройств. Существенное значение при компоновке блоков светодальномера, определение его массы и продолжительности работы имеет выбор источников электрической энергии.

В книге более детально рассмотрены основные проблемы светодальномерной техники, определяющие дальность действия и точность светодальномеров и связанные с излучением, модуляцией, формированием, распространением в атмосфере, се-

чективным приемом и демодуляцией светового потока. Ограниченный объем книги позволил лишь высказать рекомендации по определенно точностных требований к некоторым радиотехническим устройствам светодальномера. Следует отметить, что вопросы, связанные с расчетом и проектированием усилителей, генераторов, фазоизмерительных, счетно-решающих и автоматических устройств и других радиотехнических систем, подробно излагаются в многочисленных специальных монографиях.

Геодезические светодальномеры являются, как правило, наиболее точными, экономичными и портативными, поэтому большинство из рассматриваемых вопросов будет общим и для светодальномеров, применяемых при выполнении линейных измерений в других областях науки и техники.

В основу монографии положены результаты многолетней научно-исследовательской и учебно-методической работы автора в Московском институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. Большую практическую помощь и плодотворное влияние на работу над рукописью оказали коллективы и отдельные товарищи, совместно с которыми автор участвовал в проведении теоретических и лабораторно-полевых исследований, занимался разработкой, созданием и внедрением геодезических светодальномеров, а также в постановке курсов и создании учебных пособий, связанных с геодезическими светодальномерами, всем им он выражает искреннюю признательность и сердечную благодарность.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, доктора технических наук, профессора С. В. Елисеева за ценные замечания, которые способствовали улучшению содержания работы.

Автор и издательство будут благодарны читателям, которые пришлют свои критические замечания, особенно в той части, где рассматриваются вопросы, освещаемые в печати впервые, по адресу: 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, д. 1/19, издательство «Недра».

Основными исходными данными для разработки геодезического светодальномера являются диапазон измеряемых расстояний и требуемая точность измерений. Выходные линейные измерения в геодезической практике выполняются при создании государственной геодезической сети методом триангуляции [43] (табл. 1).

При замене метода триангуляции методом полигонометрии соответствующего класса требования к точности линейных измерений несколько снижаются, сокращается в два — три раза число определяемых направлений, что позволяет в ряде случаев существенно уменьшить высоты геодезических знаков, уменьшаются продольные погрешности и допускается большая изломанность хода [106]. Наряду с методом триангуляции государственная геодезическая сеть 1 и 2 классов может строиться методом полигонометрии, а сети 3 и 4 классов — методами полигонометрии, трилатерации и их сочетанием.

Как правило, метод полигонометрии целесообразно применять на тех объектах, где триангуляция требует сплошной постройки высоких знаков. Рекомендуемые инструкцией [43] длины сторон и допустимые средние квадратические погрешности измерения приведены в табл. 2.

При выполнении топографических съемок в масштабах 1 : 5000, 1 : 2000, 1 : 1000 и 1 : 500, помимо государственной геодезической сети, может быть использована полигонометрическая сеть местного значения 1 и 2 разрядов, а также теодолитный ход 1 и 2 разрядов. Требования к линейным измерениям, соответствующие инструкции по топографической съемке [45], представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 1

Класс триангуляции	Диапазон измеряемых базисных сторон, км	Допустимая погрешность не более**
1	Не менее 20*	1 : 400 000
2	7—20	1 : 300 000
3	5—8	1 : 200 000
4	2—5	4 : 200 000

* Значение максимального измеряемого расстояния определяется уровнем видимости между геодезическими знаками и примерно равно 50 км.

** Здесь и далее по тексту применяемый в геодезической литературе термин «средняя квадратическая ошибка» заменен термином «погрешность», рекомендованным ГОСТ 16263—73.

ТАБЛИЦА 2

Класс полигонометрии	Длина стороны, км	Допустимая погрешность не более
1	20—25	1 : 300 000
2	Не менее 5	1 : 250 000
3	Не менее 3	1 : 200 000
4	Не менее 2	1 : 150 000

ТАБЛИЦА 3

Тип геодезической сети	Класс, разряд	Длина сторон, км	Относительная погрешность хода не более	Длина хода не более, км
Полигонометрия	4 класс	0,25—2,0	1 : 25 000	10
	1 разряд	0,12—0,8	1 : 10 000	5
	2 разряд	0,08—0,35	1 : 5 000	3
Геометрический ход	1 разряд		1 : 2 000	
	2 разряд		1 : 1 000	

Требования к линейным измерениям в съемочных сетях, создаваемых методами триангуляции, трилатерации и полигонометрии при выполнении топографо-геодезических работ во время инженерных изысканий промышленного, сельскохозяйственного, городского и поселкового строительства, представлены в таблицах 4 и 5. Они регламентируются соответствующими инструкциями [44, 46].

ТАБЛИЦА 4

Тип геодезической сети	Класс, разряд	Длина сторон, км	Относительная погрешность не более
Триангуляция* и трилатерация	4 класс	1—5	1 : 100 000
	1 разряд	0,5—5	1 : 50 000
	2 разряд	0,25—3	1 : 20 000

* При создании сети методом триангуляции измеряют базисные стороны.

ТАБЛИЦА 5

Тип геодезической сети	Класс, разряд	Длина сторон, км	Относительная погрешность хода не более	Длина хода не более, км
Полигонометрия	4 класс	0,25—0,8	1 : 25 000	10
	1 разряд	0,12—0,6	1 : 10 000	5
	2 разряд	0,08—0,3	1 : 5 000	3

В зависимости от диапазона измеряемых расстояний и допустимой погрешности целесообразно поделить геодезические светодальномеры на несколько основных типов, так как это определяет выбор основных конструктивных элементов прибора и его функциональной схемы, определяет габариты, массу, потребляемую прибором электрическую энергию и методику измерений.

Согласно ГОСТ 19223—73, геодезические светодальномеры должны изготавливаться следующих типов.

Высокоточный светодальномер типа СБ-6, применяемый преимущественно при создании государственной геодезической сети, предназначен для измерения минимальных расстояний не более 500 м, максимальных расстояний не менее 50 км ночью и не менее 30 км днем.

Высокоточный светодальномер типа СМ-02, используемый преимущественно при решении задач прикладной геодезии, предназначен для измерения минимальных расстояний не более 2 м и максимальных расстояний не менее 300 м. Учитывая требования современной геодезической практики, для светодальномеров этого типа максимальное измеряемое расстояние, по видимому, должно быть не менее 1000 м.

Точный светодальномер типа СМ-2 нашел широкое распространение при проложении ходов городской полигонометрии и создании геодезических съёмочных сетей, он предназначен для измерения минимальных расстояний не более 2 м и максимальных расстояний не менее 2 км.

Технический светодальномер типа СМ-5, широко применяемый при проложении теодолитных ходов повышенной точности, предназначен для измерения минимальных расстояний не более 5 м и максимальных расстояний не менее 500 м.

Кроме того, согласно требованиям ГОСТ 19223—73, светодальномеры типа СМ-02, СМ-2 и СМ-5 должны иметь наработку на отказ при доверительной вероятности 0,95 не менее 500, а светодальномер СБ-6 — не менее 250 ч. Светодальномеры всех типов должны работать без капитального ремонта в течение трех полевых сезонов.

Поскольку допустимую ГОСТ среднюю квадратическую инструментальную погрешность трудно выделить из фактического значения погрешности измерения расстояния, целесообразно точностные требования к светодальномерам каждого типа сформулировать следующим образом.

Высокоточный светодальномер типа СБ-6 должен обеспечивать при измерении расстояний от 2 до 7 км относительную погрешность не более 1 : 200 000, от 7 до 20 км не более 1 : 300 000, а при измерении расстояний свыше 20 км не более 1 : 400 000 (это соответствует требованиям действующей Инструкции о построении государственной геодезической сети СССР).

Высокоточный светодальномер типа СМ-02 должен измерять

минимальные расстояния с погрешностью не более 0,1 мм и максимальные расстояния с относительной погрешностью не более 1 : 500 000 (это соответствует требованиям современной прикладной геодезии).

Точный светодальномер типа СМ-2 должен иметь погрешность не более 1 см при измерении минимальных расстояний, а при измерении максимальных расстояний — относительную погрешность не более 1 : 30 000 (это соответствует требованиям действующих инструкций).

Технический светодальномер типа СМ-5 должен иметь погрешность не более 5 см во всем диапазоне измеряемых расстояний.

Помимо уже приведенных рекомендаций, при изменении ГОСТ 19223—73 целесообразно внести в него следующие дополнения.

В настоящее время разработаны и серийно выпускаются электронные тахеометры [101, 128, ГОСТ 10812—74], которые автоматически измеряют расстояния до нескольких километров с погрешностью, не превышающей 1—2 см, горизонтальные и вертикальные углы как в автоматическом режиме, так и обычным визуальным способом отсчитывания. Эти тахеометры могут быть снабжены портативными калькуляторами для вычисления горизонтальных проложений измеренных расстояний, превышений и приращений координат, а также иметь специальный накопитель измерительной информации (своеобразный полевой журнал) для фиксирования результатов измерений в кодированном виде, удобном для последующей обработки их в электронно-вычислительных центрах. Учитывая возможность создания светодальномерных блоков как для электронных тахеометров, так и для светодальномерных насадок-приспособлений к серийно выпускаемым теодолитам, целесообразно стандартизировать технические требования к этим блокам.

Дальнейшее совершенствование геодезических светодальномеров несомненно связано с повышением точности определения среднеинтегрального значения показателя преломления атмосферы в момент измерения расстояния. Применение светодальномер-рефрактометров является одним из перспективных направлений решения этой проблемы [87, 89, 90]. Например, светодальномер-рефрактометр «Георан» обеспечивает измерение расстояний порядка 30 км с погрешностью $0,2 \cdot 10^{-6}$ [124]. Следует, по-видимому, стандартизировать технические требования к светодальномеру-рефрактометру.

В связи с интенсивным развитием спутниковой (космической) геодезии целесообразно также стандартизировать технические требования на светодальномеры, используемые при решении задач спутниковой геодезии. С помощью созданных в настоящее время спутниковых лазерных светодальномерных систем можно вести изучение движения земных полюсов с погрешностью 2 см/0,5 сут, движения земной коры с погреш-

ностью 1 см/год, определять параметры стандартной Земли с погрешностью 10 см, координаты точек земной поверхности и топографию морской поверхности с погрешностью 10 см, резонансные гармоники земного потенциала и земных приливов, измерять расстояния на поверхности Земли, осуществлять калибровку радарных космических высотомеров и т. д. [131, 137]. При этом светодальномерные системы обеспечивают измерение ночью и днем расстояний с поверхности Земли до летящего на высоте примерно 4500 км и со скоростью порядка 7400 м/с искусственного спутника с погрешностью не более 1—2 м [79].

В геодезической практике возможны линейные измерения, которые не предусмотрены инструкциями, для них используют нестандартные светодальномеры и светодальномерные системы. Например, применение светодальномеров, устанавливаемых на летящем объекте, в качестве высотомеров-нивелиров [130, 133] и использование для специальных высокоточных измерений интерференционных светодальномеров [38, 52, 91].

Итак, при создании геодезических сетей разными методами, разных классов и разрядов необходимо измерять длины линий от нескольких метров до 50 км, при этом допустимая погрешность измерения минимальных расстояний не более 1 см, а допустимая относительная погрешность измерения максимальных расстояний не более 1 : 400 000. При решении специальных задач прикладной геодезии значения максимальных измеряемых расстояний достигают 1 км, допустимая погрешность измерения минимальных расстояний может быть не более 0,1 мм, а допустимая относительная погрешность измерения максимальных расстояний не более 1 : 500 000. При выполнении линейных измерений в современной спутниковой геодезии допустимая погрешность измерения расстояний, достигающих 10 000 км, не более 1 м.

В последующих главах монографии рассмотрены вопросы, непосредственно связанные с обеспечением дальности действия и требуемой точности геодезических светодальномеров различных типов.

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ

Расстояние S измеряют при помощи светодальномера следующим образом (рис. 1): над точкой, соответствующей одному из концов измеряемого расстояния, устанавливают светодальномер (приемопередатчик) 1, а над другой, соответствующей противоположному концу измеряемого расстояния, отражатель 2 и определяют время t , затраченное световым потоком (электромагнитными колебаниями оптического диапазона) на прохождение двойного измеряемого расстояния. Следует отметить, что определять время, затраченное световым потоком только на однократное прохождение измеряемого расстояния, практически нецелесообразно, следовательно,

$$2S = vt, \quad (1)$$

где v — скорость распространения светового потока.

Проходящий с постоянной и известной скоростью вдоль измеряемого расстояния световой поток позволяет свести измерение расстояния к определению времени. Именно это превращает светодальномер в хронометрическое дальномерное устройство, являющееся одним из перспективных измерительных приборов.

Принципиальная схема современного светодальномера не отличается от схем некоторых устройств и приборов, много лет тому назад созданных физиками для определения скорости света (например, опыт Физо в 1849 г., установки Майкельсона — 1926 г., Каролуса и Миттельштедта — 1928 г.). Тогда же авторами высказывалось мнение о возможности использования этих устройств для измерения расстояний, но из-за недостаточной точности и громоздкости они практического применения в то время не получили.

Первый в мире светодальномер был создан группой сотрудников Государственного оптического института им. С. И. Вавилова под руководством академика А. А. Лебедева в 1936 г., им можно было измерять расстояния до 3—4 км с погрешностью 2—3 м [58]. Первым высокоточным светодальномером, обеспечивающим измерение расстояний до 40 км с относительной погрешностью порядка 1 : 500 000, был созданный в конце сороковых годов шведским ученым Э. Бергстрандом светодальномер, названный автором геодиметром [123].

В начале пятидесятих годов в Советском Союзе было разработано несколько геодезических светодальномеров: СВВ-1, ГД-300, ЭОД-1, а к настоящему времени в нашей стране и за рубежом серийно выпускают светодальномеры различных конструкций и типов [13, 16, 29, 37, 54, 55, 62, 74, 77, 85; 93, 101, 104, 110, 112, 128].

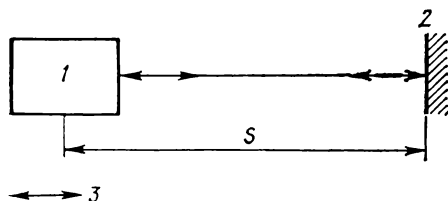


Рис. 1. Схема измерения расстояния светодальномером:

1 — светодальномер; 2 — отражатель; S — измеряемое расстояние; 3 — направление распространения света

Успехи, достигнутые современной радиотехникой и квантовой электроникой, позволили создать более экономичные, портативные, надежные и простые в эксплуатации приборы. Из них следует отметить светодальномеры, в которых в качестве источника излучения используют лазеры (что позволило весьма существенно увеличить дальность действия); светодальномеры, в которых в качестве источника излучения и модулятора используют светодиоды, при этом потребляемая прибором электрическая мощность не превышает 10 Вт; светодальномеры со

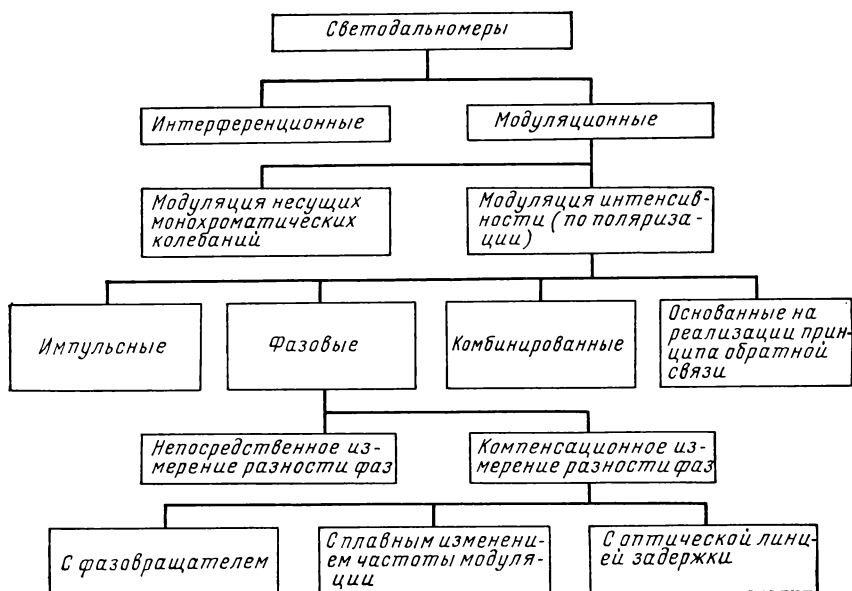


Рис. 2. Классификация светодальномеров

сверхвысокочастотной модуляцией, гарантирующей погрешность измерений не более нескольких десятых долей миллиметра; автоматические светодальномеры с цифровым отсчетным устройством, при этом на измерение расстояния затрачивается не более нескольких секунд; портативные и экономичные светодальномеры и светодальномерные насадки. Современные лазерные светодальномеры позволяют измерять расстояния от Земли до Луны, инструментальная чувствительность наиболее точных современных светодальномеров — интерференционных определяется долями микрометра, а точность современных геодезических светодальномеров, предназначенных для измерения расстояний более нескольких километров, достигает 10^7 и ограничивается точностью определения среднеинтегрального значения показателя преломления атмосферы вдоль трассы, по которой проходит световой поток.

Для выбора оптимальной функциональной схемы геодезического светодальномера рассмотрим схемы существующих светодальномеров в последовательности, соответствующей приведенной ниже классификации (рис. 2).

§ 2. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ

В этих светодальномерах используют абсолютные интерференционные способы измерения расстояния [38, 40, 52], в которых рабочим эталоном времени служит непосредственно период несущих электромагнитных колебаний оптического диапазона. Измерение обычно выполняется по схеме асимметричного двухлучевого интерферометра Майкельсона (рис. 3). Когерентный световой поток, выходящий из передающей оптической системы ПерОС, полупрозрачным зеркалом 2 делится на два: один из них проходит дважды вдоль измеряемого расстояния S (до отражателя 3 и обратно), а другой — до опорного зеркала 1 и обратно. Затем оба потока поступают в приемную оптическую систему ПрОС, где по результатам интерференции этих потоков определяют величину измеряемого расстояния.

В качестве подвижного отражателя 3 целесообразно использовать трипльпризму, так как при этом исключается влияние угловых разворотов отражателя. Результат интерференции зависит от разности фаз несущих колебаний опорного и измерительного световых потоков. Если потоки синфазны, происходит усиление интенсивности принимаемого суммарного светового потока (светлая полоса), а если они находятся в противофазе, происходит резкое ослабление принимаемого светового потока (темная полоса). По изменению интенсивности принимаемого светового потока можно вести измерение аналоговым способом в пределах фазового цикла, а используя специальные счетчики целых фазовых циклов (полос), можно вести дискретно интерференционные измерения в значительных пределах. При этом счетчик целых фазовых циклов действует в накопитель-

ном режиме. Он показывает ноль, когда расстояние от полупрозрачного зеркала до опорного зеркала и до отражателя равны, а затем, при перемещении отражателя на величину измеряемого расстояния, счетчик считает целые фазовые циклы.

Для измерений при реверсивном перемещении отражателя необходимо иметь второе опорное зеркало, сдвинутое по фазе относительно первого на $1/8$ фазового цикла, вторую приемную

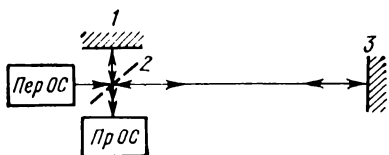


Рис. 3. Схема интерференционного светодальномера:

1 — опорное зеркало; 2 — полупрозрачное зеркало; 3 — отражатель; ПерОС — передающая оптическая система; ПрОС — приемная оптическая система

оптическую систему, в которую поступают световые потоки от второго опорного зеркала и от отражателя, и, наконец, логическую автоматическую систему, определяющую направление перемещения отражателя по изменениям результатов интерференции в первой и во второй приемных оптических системах. Величина максимального расстояния, измеряемого при помощи интерферометра, определяется временной когерентностью источника света.

Использование при выполнении интерференционных измерений в качестве источника излучения лазеров, работающих в одночастотном и одномодовом режимах и являющихся одновременно высокоточными атомными или молекулярными эталонами частоты, позволяет измерять расстояния в вакууме с точностью до 10^9 [91, 139], что свидетельствует о весьма значительных точностных возможностях интерференционных светодальномеров.

Если интерференционные измерения выполняют в вакууме, когда нет необходимости предварительно определять показатель преломления атмосферы, то рабочим эталоном может служить непосредственно длина волны λ монохроматических колебаний

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

где N — число целых фазовых циклов; Δ — дробная часть фазового цикла, определяемая аналоговым способом. Современные средства позволяют оценивать уверенно $\Delta \geq 1/20$.

Современные интерферометры позволяют непосредственно в длинах волн несущих колебаний измерять расстояния до нескольких десятков метров, при этом погрешность измерений может составлять сотые доли микрометра. Конечно, для полевых геодезических измерений из-за слишком малого значения длины волны несущих колебаний они неприемлемы, но, по-видимому, интерференционные светодальномеры целесообразно использовать при изготовлении и компарировании высокоточных

линейных рабочих мер и шкал геодезических приборов, а также при высокоточном измерении линейных деформаций специальных инженерных сооружений и установок.

Помимо обеспечения высокой когерентности и интенсивности излучения, применение лазеров позволяет увеличить длину волны, используемую для измерения расстояния. Максимальная длина волны применяемого на практике газового лазера на CO_2 $\lambda = 10,6$ мкм. Более существенное увеличение длины волны можно получить, если использовать специальные двухчастотные лазеры и вести интерферометрические измерения на разностной частоте — биениях двух аксиальных мод излучения лазера. (Возникающие при наложении двух гармонических колебаний с близкими частотами периодические изменения амплитуды результирующего колебания называют биениями). Разработаны и созданы двухчастотные газовые He-Ne лазеры с разностью частот излучаемых колебаний 500 МГц (это соответствует длине волны 0,6 м), которые использованы в интерференционном светодальномере, предназначенном для прецизионного измерения расстояний до нескольких сотен метров [89]. Частота биений в этом светодальномере выделяется при приеме потоков в результате использования двойного гетеродинамирования. Дальнейшее уменьшение частоты биений приводит к соответствующему увеличению оптического резонатора лазера до размеров, недопустимых для геодезического прибора.

Из-за технических трудностей, связанных с заданием стабильного двухчастотного излучения лазеров (дальность действия интерференционных светодальномеров определяется прежде всего временной когерентностью используемого излучения) и с выполнением процесса двойного гетеродинамирования, а также из-за сильного влияния турбулентции атмосферы и погрешностей взаимного ориентирования блоков, интерференционные измерения значительных расстояний носят характер сложного, громоздкого и дорогого физического эксперимента и не могут пока применяться в полевых условиях.

§ 3. СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ С МОДУЛЯЦИЕЙ НЕСУЩИХ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

В светодальномерах, предназначенных для измерения расстояний, превышающих несколько метров, используют обычно модулированный световой поток.

Модуляционный светодальномер состоит из передающей и приемной оптических систем и измерителя времени. Передающая оптическая система включает в себя источник излучения, модулятор и оптические детали и узлы, обеспечивающие наиболее эффективное использование излучаемого светового потока. Приемная оптическая система состоит из приемника излучения и оптических деталей и узлов, обеспечивающих наиболее эффективное использование принимаемого светового потока.

Использование в качестве источников излучения лазеров позволяет осуществить амплитудную, частотную и фазовую модуляции несущих монохроматических колебаний. Поскольку при амплитудной модуляции интенсивность излучения становится переменной, то целесообразно использовать частотную и фазовую модуляции, при которых интенсивность излучения остается постоянной.

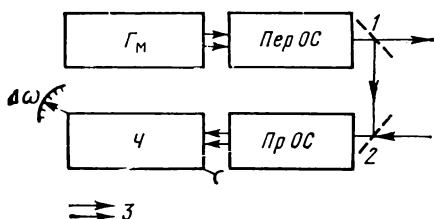


Рис. 4. Схема светодальномера с частотной модуляцией несущих колебаний: Γ_m — генератор модулирующего электрического сигнала; $\mathcal{C}$ — частотометр; $\Delta\omega$ — измеряемое изменение частоты; 1, 2 — поворотные зеркала; 3 — направление прохождения электрического сигнала

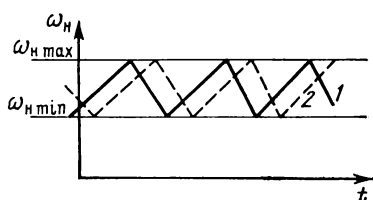


Рис. 5. Графики изменения частоты излучаемого и принимаемого световых потоков:

1 — излучаемый световой поток; 2 — принимаемый световой поток; ω_n — несущая частота световых колебаний; t — текущее время

Частотная модуляция, или модуляция по цвету, осуществляется, как правило, путем внутренней частотной модуляции, основанной на изменении параметров оптического резонатора лазера [88]. Функциональная схема светодальномера с частотной модуляцией оптической несущей представлена на рис. 4. Подаваемый от генератора Γ_m (см. рис. 4) в передающую оптическую систему электрический сигнал осуществляет частотную модуляцию излучаемого светового потока по линейному закону (рис. 5). Незначительная часть излучаемого светового потока поступает в приемную оптическую систему при помощи поворотных зеркал 1 и 2 (см. рис. 4), большая часть, пройдя дважды измеряемое расстояние, поступает с временной задержкой t .

Если диапазон $\omega_{n \max} - \omega_{n \min}$ (см. рис. 5) изменения частоты несущих колебаний не превышает 100 МГц, то выделение разностной частоты $\Delta\omega$ излучаемого и принимаемого световых потоков способом оптического гетеродинирования можно осуществить непосредственно в приемнике излучения, например в фотоэлектронном умножителе [8, 23, 24, 86, 121]. Значение разностной частоты определяется при помощи частотометра $\mathcal{C}$ (см. рис. 4). Измеряемое расстояние вычисляют по формуле

$$S = \frac{vT\Delta\omega}{2(\omega_{n \max} - \omega_{n \min})}, \quad (3)$$

где T — время, в течение которого происходит однократное изменение частоты несущих колебаний от минимального до максимального значения ($T > t$).

Можно использовать синусоидальную частотную модуляцию несущих колебаний в некотором диапазоне, в этом случае среднее значение разностной частоты в течение периода модуляции будет зависеть от величины измеряемого расстояния. Если изменять частоту модуляции, то при некотором значении f разностная частота будет равна нулю, т. е. величина измеряемого расстояния будет определяться по формуле

$$S = \frac{vN}{2f}, \quad (4)$$

где $N=1, 2, 3 \dots$ — целое число, для определения которого необходимо знать заранее приближенное значение величины измеряемого расстояния.

В целях конструктивного упрощения светодальномера и повышения точности целесообразно вместо частотной модуляции использовать фазовую модуляцию несущих колебаний при помощи внешнего электрооптического модулятора, поставленного после лазера и ориентированного определенным образом по отношению к плоскости поляризации входящего в него лазерного излучения [31]. Известно, что фазовая модуляция колебаний приведет и к частотной модуляции, поэтому в остальном функциональная схема светодальномера строится по одному из рассмотренных выше вариантов.

Поскольку стремление к повышению частоты модуляции является одним из основных направлений повышения инструментальной точности светодальномеров, использование фазовой модуляции вместо частотной будет в этом случае предпочтительней.

Из-за существенных технических трудностей, возникающих при реализации описанных схем модуляционных светодальномеров с частотной и фазовой модуляцией несущих монохроматических колебаний, эти светодальномеры пока практического применения не получили.

§ 4. ИМПУЛЬСНЫЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ

В настоящее время в модуляционных светодальномерах, нашедших практическую реализацию при линейных измерениях, как правило, применяют модуляцию немонохроматического потока излучения по интенсивности (значительно реже используют модуляцию по поляризации). Учитывая, что излучаемый светодальномером световой поток немонохроматичен, следует рассматривать его как группу близких монохроматических световых потоков и соответственно определять во время измерений групповой показатель преломления атмосферы и групповую скорость распространения излучения. Современные модуляционные светодальномеры, в которых модулируется немонохроматический световой поток, могут быть импульсными, фазовыми, комбинированными и основанными на реализации принципа обратной связи.

В импульсных светодальномерах излучение света производится прерывисто в виде кратковременных импульсов с большой скважностью, и время, затраченное световым импульсом на прохождение двойного измеряемого расстояния, определяется непосредственно. Внутренняя импульсная модуляция непосредственно в источнике излучения, например в лазерах, поз-

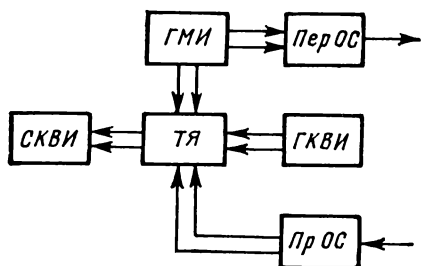


Рис. 6. Схема импульсного светодальномера:

ГМИ — генератор модулирующего импульсного электрического сигнала; *СКВИ* — счетчик калиброванных временных импульсов; *ТЯ* — триггерная ячейка; *ГКВИ* — генератор калиброванных временных импульсов

воляет получить весьма значительное повышение интенсивности светового импульса и, следовательно, обеспечить увеличенную дальность действия светодальномера или возможность работы светодальномера в так называемом локационном режиме. В настоящее время при создании импульсных светодальномеров в качестве источников излучения, как правило, используются твердотельные рубиновые или неодимовые лазеры с внутренней модуляцией. При этом можно создать импульсы излучения, длительность которых может быть порядка нескольких пикосекунд [34, 91, 132].

В импульсных светодальномерах в качестве устройства для измерения времени могут быть использованы различные радиотехнические средства: электроннолучевые трубки с линейным генератором развертки, калиброванные электрические цепи временной задержки, быстродействующие счетчики и другие средства. Наиболее перспективные из них — быстродействующие дискретные счетчики, которые позволяют непосредственно на счетчике получать величину измеряемого расстояния. Схема импульсного светодальномера со счетчиком *СКВИ* калиброванных временных импульсов представлена на рис. 6. Передающая оптическая система светодальномера обычно состоит из импульсного источника излучения и оптической системы, формирующей узкую диаграмму направленности при излучении. Электрический импульс (старт-импульс) от генератора *ГМИ* модулирующих импульсов одновременно поступает в источник излучения и триггерную ячейку *ТЯ*, открывая последнюю. Вместо триггерной ячейки иногда используют пороговый дискриминатор. От постоянно действующего генератора *ГКВИ* калиброванных временных импульсов через триггерную ячейку на счетчик непрерывно поступают калиброванные временные импульсы. Счетчик считает их до тех пор, пока открыта триггерная ячейка, т. е. пока из приемной оптической системы не по-

ступит электрический сигнал (стоп-импульс), соответствующий отраженному световому импульсу, который закрывает триггерную ячейку и прекратит счет. Для гарантирования идентичности путей прохождения внутри светодаляномера для старт-импульса и стоп-импульса целесообразно использовать систему поворотных зеркал 1 и 2 (см. рис. 4) вместо непосредственной электрической связи между генератором модулирующих импульсов и триггерной ячейкой. Величина измеряемого расстояния определяется по формуле

$$S = \frac{vt}{2} \approx \frac{vN}{2f_c}, \quad (5)$$

где N — число калиброванных временных импульсов, зафиксированное счетчиком; f_c — частота следования калиброванных временных импульсов.

Современные счетчики могут обеспечить счет импульсов, если их частота следования не превышает тысячи мегагерц, т. е. погрешность измерения времени составляет несколько наносекунд. Например, если частота $f_c = 150$ МГц, то непосредственно со счетчика можно отсчитывать величину измеряемого расстояния, выраженную в метрах.

В изобретенном в США импульсном светодаляномере [140] для повышения точности дискретного счета временных калиброванных импульсов последние пропускают через специальный «случайный» генератор, который равномерно распределяет импульсы в пределах периода следования калиброванных временных импульсов. Эти распределенные импульсы используют при формировании старт-импульса. Таким образом, излучение светодаляномером импульса света происходит случайно по отношению к началу периода временных калиброванных импульсов. Счетчик калиброванных временных импульсов производит многократное повторение счета для каждого измеряемого расстояния, результаты счета накапливаются в специальном запоминающем устройстве. Очевидно, что после деления конечного результата счета на число единичных измерений будет получено более точное значение измеряемого расстояния. По мнению автора, точность может быть повышена за счет этого технического усовершенствования в 100 раз.

Можно повысить точность импульсного светодаляномера другим способом. Например, если применить дискретно-аналоговый способ определения времени с использованием специальной электрической линии задержки для микрометричного измерения аналоговой части (дробной доли периода следования временных калиброванных импульсов), то можно измерять расстояния с погрешностью порядка 1 см [132]. Однако это технически сложный способ, являющийся, по существу, фазовым способом.

Следует отметить, что точность импульсных светодаляноме-

ров существенно зависит от вариаций интенсивности и формы принимаемых световых импульсов.

Современные импульсные светодальномеры обеспечивают измерение расстояний с минимальной погрешностью порядка 10 см [79, 91, 138], поэтому они могут найти применение в спутниковой геодезии и при крупномасштабной топографической съемке. Существенные преимущества импульсных светодальномеров: простота функциональной схемы, быстродействие и возможность наиболее эффективного использования источника излучения — убедительно свидетельствуют о том, что импульсные светодальномеры будут всегда в центре внимания создателей светодальномеров различного назначения.

§ 5. ФАЗОВЫЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ

В этих светодальномерах излучается гармонически модулированный световой поток и время определяют косвенным способом — сравнением фаз излучаемого и принимаемого световых потоков.

Если в какой-то момент времени t_1 фаза излучаемого и модулированного с угловой частотой ω потока равна ωt , то в момент времени $t_2 = t_1 + t$ она будет уже равна ωt_2 . Измеренная в момент времени t_2 разность (сдвиг) фаз φ будет пропорциональна времени t , затраченному потоком на прохождение двойного измеряемого расстояния: $\varphi = \omega t_2 - \omega t_1 = \omega t$, или, учитывая формулу (1), получим

$$S = \frac{v\varphi}{2\omega}. \quad (6)$$

Разность фаз в пределах фазового цикла может быть измерена непосредственно и компенсационным способом.

Частота модуляции выбирается в зависимости от величины допустимой погрешности измерения минимального расстояния и от погрешности определения разности фаз (при максимальном практически реализованном значении частоты модуляции около 10 ГГц абсолютная погрешность измерения расстояния в несколько десятков метров не превышала 0,1 мм [125]).

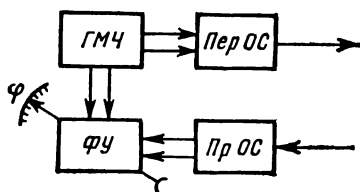
Функциональная схема фазового светодальномера с фазоизмерительным устройством $\Phi У$, позволяющим непосредственно определять разность фаз излучаемых и принимаемых модулированных световых потоков, представлена на рис. 7. Электрический сигнал от генератора $ГМЧ$ модулирующей частоты используется для модулирования излучаемого светового потока и поступает одновременно в фазоизмерительное устройство, фаза излучаемого светового потока соответствует фазе этого сигнала. От приемной оптической системы на другой вход фазоизмерительного устройства поступает электрический сигнал, фаза которого соответствует фазе принимаемого светового потока.

В качестве фазоизмерительного устройства может быть ис-

пользована, например электронно-лучевая трубка [51]. При измерении разности фаз способом круговой развертки с модуляцией по яркости, напряжение, соответствующее принимаемому потоку, после фазорасщепителя в виде двух сдвинутых по фазе на 90° напряжений подается на отклоняющие пластины и образует круговую развертку на экране трубки. Напряжение, соответствующее излучаемому потоку, в виде отрицательных импульсов, сформированных из синусоидального напряжения, подается на модулятор трубки, прерывая поток электронов и образуя разрыв на круговой развертке. Разность фаз излучаемого и принимаемого потоков определяется по положению этого

Рис. 7. Схема фазового светодальномера, в котором разность фаз измеряется непосредственно:

ГМЧ — генератор модулирующей частоты; ФУ — фазоизмерительное устройство; φ — измеряемая разность фаз



разрыва относительно круговой шкалы, концентрически расположенной относительно развертки и прикрепленной к электронно-лучевой трубке.

В настоящее время в целях автоматизации процесса измерения разности фаз и упрощения отсчитывания по шкале фазоизмерительного устройства стремятся заменить аналоговые способы измерения дискретными — цифровыми способами. Для этого, например, при помощи специальных формирующих устройств из синусоидальных электрических сигналов, подаваемых в фазоизмерительное устройство, создают кратковременные импульсы, каждый из которых соответствует определенной фазе излучаемого и принимаемого световых потоков. Фазоизмерительное устройство в этом случае состоит из генератора калиброванных импульсов, счетчика этих импульсов и триггерной ячейки (подобно устройству измерения времени в импульсном светодальномере, см. рис. 6). Старт-импульс, соответствующий определенной фазе принимаемого светового потока, открывает триггерную ячейку, счетчик начинает считать калиброванные импульсы и считает их до тех пор, пока стоп-импульс, соответствующий определенной фазе излучаемого светового потока, не закроет триггерную ячейку и не прекратит счет. Частота следования калиброванных импульсов выбирается в зависимости от частоты модуляции и требуемой точности измерения разности фаз. Современные цифровые фазометры могут обеспечивать точность измерения разности фаз до 10^4 (т. е. погрешность порядка нескольких угловых минут).

Фазовые светодальномеры с непосредственным измерением разности фаз выгодно отличаются от светодальномеров, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом, простотой конструкции и процесса измерения. Кроме того, от-

существование демодулятора позволяет более эффективно использовать поток излучения, но приемником излучения в этом случае может быть только малоинерционный фотоэлектрический приемник.

Схема фазового светодальномера с компенсационным измерением разности фаз представлена на рис. 8. Она отличается от предшествующей тем, что фазоизмерительное устройство

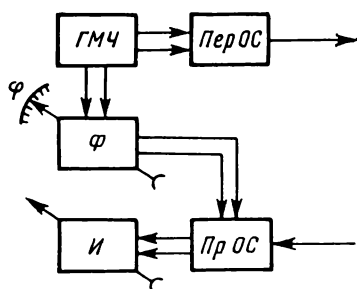


Рис. 8. Схема фазового светодальномера, в котором разность фаз измеряется компенсационным способом:

Φ — фазовращатель; I — индикатор определенной разности фаз

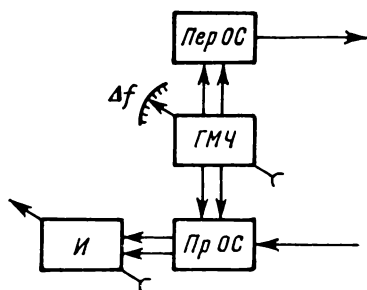


Рис. 9. Схема фазового светодальномера с плавным изменением частоты модуляции:

Δf — измеряемое изменение частоты модуляции

заменено фазовращателем Φ , добавлены демодулятор, находящийся в приемной оптической системе, и индикатор I , позволяющий по величине светового потока, прошедшего через демодулятор, фиксировать определенное значение разности фаз излучаемого и принимаемого световых потоков. При помощи фазовращателя (наиболее стабильными и точными из которых являются электрические линии задержки) создают фазовый сдвиг, равный или соответствующий измеряемой разности фаз.

Измерение разности фаз компенсационным способом осуществляют следующим образом. На демодулятор подается электрический сигнал, прошедший фазовращатель. Об изменении разности фаз φ принимаемого светового потока и электрического сигнала, поступающего на демодулятор, судят по изменению интенсивности среднеинтегрального светового потока, прошедшего через демодулятор. Электрический сигнал, соответствующий прошедшему через демодулятор световому потоку, поступает в индикатор. При фиксации момента, когда разность фаз φ равна какому-либо определенному значению φ_0 , можно, взяв отсчет по шкале фазовращателя, определить значение измеряемой разности фаз φ излучаемого и принимаемого световых потоков. Допустим, что фиксируют моменты, когда разность фаз $\varphi_0 = 0$ (на индикатор поступает максимальный сигнал), тогда фазовый сдвиг, вносимый фазовращателем, будет равен измеряемой разности фаз φ . Следует отметить, что

измерение разности фаз компенсационным способом подобно отсчитыванию по какой-либо шкале с использованием микрометра. Поэтому при правильной практической реализации этого способа все фазовые погрешности должны быть пренебрегаемо малы по сравнению с погрешностью индикации определяемой разности фаз, являющейся, следовательно, погрешностью измерения разности фаз.

Можно создать фазовый светодалномер, в котором разность фаз измеряется компенсационным способом, без электрической линии задержки, если плавно изменять в некотором диапазоне частоту модулирующего электрического сигнала (рис. 9). В этом случае индикатор фиксирует непосредственно определенные значения разности фаз излучаемого и принимаемого световых потоков.

Расстояния светодалномером этого типа измеряют следующим образом.

Допустим, что, увеличив исходную частоту модуляции f на величину Δf (значение Δf определяется при помощи специального частотноизмерительного устройства), зафиксировали определенное значение разности фаз $\varphi_0 = 2\pi$, тогда измеряемое расстояние будет

$$S = \frac{v}{2(f + \Delta f)}, \quad (7)$$

где $f = -\omega : 2\pi$ — циклическая частота модуляции.

Эффективным способом, позволяющим упростить конструкцию фазоизмерительного устройства (или фазовращателя) и повысить точность его, является измерение разности фаз на более низкой, чем частота модуляции ω , промежуточной частоте Ω :

$$\Omega = \omega_{\text{в}} - \omega, \quad (8)$$

где $\omega_{\text{в}}$ — частота вспомогательного (гетеродинного) генератора.

Это возможно благодаря сохранению фазовых соотношений колебаний при трансформировании их способом некогерентного гетеродинирования, что было доказано и практически реализовано в 1930 г. советскими академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Л. Папалекси [60].

Схема фазового светодалномера с фазовращателем, действующим на промежуточной частоте, представлена на рис. 10. В этом случае электрические сигналы, соответствующие излучаемому и принимаемому модулированным световым потокам, поступают соответственно в смесители C_1 и C_2 , в которые подается также электрический сигнал с частотой $\omega_{\text{в}}$ от гетеродинного генератора ГГ. Выделенный после смесителя C_1 электрический сигнал с промежуточной частотой Ω поступает в фазовый детектор ФД, предварительно пройдя через фазовращатель, а электрический сигнал, выделенный после смесителя C_2 ,

поступает в фазовый детектор непосредственно. Для исключения влияния фазовых погрешностей, вызванных разностью временных задержек в цепях преобразователей, определяют разность фаз еще раз, используя при этом другую частоту гетеродинного генератора $\omega'_в = \omega - \Omega$. Окончательный результат, вычисленный как полуразность двух измерений разности фаз (при частотах гетеродинного генератора $\omega_в$ и $\omega'_в$), не будет содержать отмеченных фазовых погрешностей.

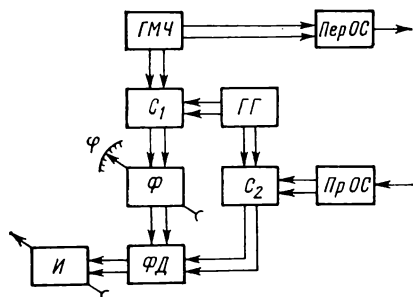


Рис. 10. Схема фазового светодальномера, в котором разность фаз измеряется на разностной частоте, получаемой в результате гетеродинирования модулирующей частоты: C_1 и C_2 — смесители; ГГ — гетеродинный генератор; ФД — фазовый детектор

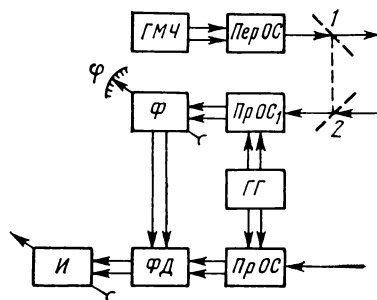


Рис. 11. Схема фазового светодальномера, в котором разность фаз измеряется на разностной частоте, получаемой в результате гетеродинирования модулирующей частоты непосредственно в приемниках излучения: ПерОС₁ — дополнительная приемная оптическая система; 1 и 2 — полупрозрачные зеркала

Промежуточная частота значительно меньше модулирующей и обычно не превышает 100 КГц, поэтому уменьшение частоты электрического сигнала методом гетеродинирования позволяет существенно ослабить влияние временных задержек в электрических цепях на точность измерения разности фаз и упростить конструкцию фазовращателя.

В качестве смесителей модулированного светового потока и электрического сигнала от гетеродинного генератора могут быть использованы фотоэлектрические приемники излучения (рис. 11). В этом случае, помимо основной приемной оптической системы, имеются еще вспомогательная ПерОС₁ и два полупрозрачных зеркала 1 и 2, которые служат для подачи незначительной части излучаемого светового потока во вспомогательную приемную оптическую систему.

Поскольку фотоэлектрические приемники, например фотоэлектронные умножители с двумя специальными управляющими электродами, могут выполнять одновременно, помимо роли смесителя, и роль демодулятора, можно построить светодальномер по схеме, представленной на рис. 12.

Для исключения погрешностей, вызванных нестабильностью фазовращателя (или фазоизмерительного устройства), его калибруют при помощи специальной оптической линии. Конструктивно просто осуществить калибровку только двух крайних точек шкалы фазовращателя, так как для этого требуется только оптическое «замыкание». Эту же оптическую калибровочную линию обычно используют и для проверки стабильности постоянной поправки светодальномера, поэтому ее длина определяется величиной «дрейфа» постоянной поправки.

Иногда для повышения точности при измерении разности фаз компенсационным способом калибруют все отсчеты по шкале фазовращателя. Для этого, не меняя фазовой компенсации (отсчета по шкале фазовращателя), полученной при индикации определенной разности фаз, излучаемый световой поток при помощи специального оптического переключателя направляют через оптическую калибровочную линию переменной длины. Затем изменяют длину пути, проходящего световым потоком в этой линии, до тех пор, пока не получат опять той же определенной разности фаз. Длина пути l , определяемая непосредственным отсчетом по шкале оптической калибровочной линии, является измеряемой разностью фаз, выраженной в линейной мере:

$$\varphi = l \frac{\omega}{v}. \quad (9)$$

Максимальная длина $l_{\max}$ оптической калибровочной линии должна соответствовать частоте модуляции и максимальной разности фаз $\varphi_{\max}$, определяемой по ее шкале. Поскольку размеры оптической калибровочной линии обратно пропорциональны частоте модуляции, то при частотах модуляции более 100 МГц она может быть весьма портативной.

Схема фазового светодальномера с фазовращателем и оптической калибровочной линией ОКЛ представлена на рис. 13. Если индикация определенной разности фаз осуществляется парафазно-балансным способом, что соответствует нулевому показанию индикатора, то фазовый переключатель ФП используется для осуществления индикации определенной разности фаз выбранным способом. Зеркала 1 и 2 служат для «включения» оптической калибровочной линии.

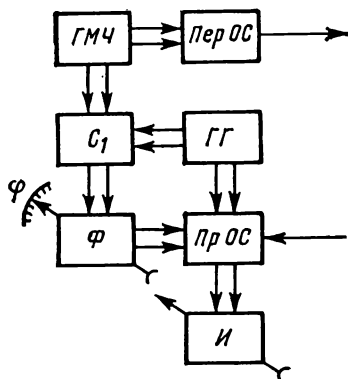


Рис. 12. Схема фазового светодальномера, в котором разность фаз измеряется на разностной частоте, получаемой в результате гетеродинирования модулирующей частоты в смесителе и приемнике излучения

Если принимаемый световой поток достаточно интенсивен, то его можно пропускать непосредственно через оптическую калибровочную линию (рис. 14). В этом случае, помимо упрощения конструкции светодальномера (фазовращатель исключен и заменен оптической калибровочной линией), повысится точность измерения разности фаз, так как погрешность измерения разности фаз будет определяться только погрешностью индикации определенной разности фаз.

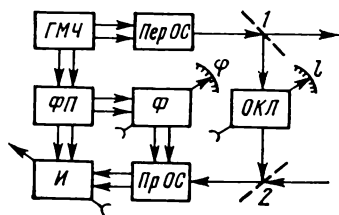


Рис. 13. Схема фазового светодальномера, в котором отсчеты по шкале фазовращателя калибруются по шкале оптической калибровочной линии:

ОКЛ — оптическая калибровочная линия; L — измеряемая длина пути, проходимого световым потоком в оптической калибровочной линии; 1 и 2 — полупрозрачные зеркала

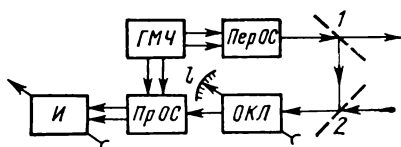


Рис. 14. Схема фазового светодальномера, в котором фазовращатель заменен оптической калибровочной линией:

1 и 2 — полупрозрачные зеркала

Поскольку точность при измерении разности фаз компенсационным способом несколько выше, чем при непосредственном измерении, в целях обеспечения большей точности при одной и той же частоте модуляции предпочтение отдают фазовым светодальномерам, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом.

§ 6. КОМБИНИРОВАННЫЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ

Для повышения точности импульсных светодальномеров или увеличения дальности действия фазовых светодальномеров создают светодальномеры по комбинированной, импульсно-фазовой функциональной схеме. Это позволяет, кроме того, вести низкоточные измерения импульсным способом, а точные — фазовым. К светодальномерам, выполненным по комбинированной схеме, можно, например, отнести высокоточный светодальномер «Мекометр», светодальномер-высотометр «Геодолит-3А», светодальномер-рефрактометр «Георен», гамму светодальномеров типа ГДФИ, разработанных в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова [36, 124, 125].

В комбинированных светодальномерах источник излучения работает в импульсном режиме, а для повышения точности определения времени, затрачиваемого светом на прохождение измеряемого расстояния, применяют дополнительную гармоническую модуляцию излучаемого сравнительно длинного светового импульса и время определяют фазовыми способами. При этом длительность импульса излучения для гарантирования стабильности и точности должна быть не менее пяти периодов гармонической модуляции.

Например, в импульсно-фазовом светодальномере ГДФИ-3 в качестве источника излучения использован полупроводниковый лазер типа ЛД-13 [36]. При длительности импульса излучения 100 нс мощность лазерного излучения достигала 3—6 Вт, что позволило вести измерения расстояний до 13 км. Частота гармонической модуляции 6 МГц обеспечивает измерения расстояний фазовым способом с погрешностью порядка ± 5 см. Поскольку при переходе от непрерывного излучения полупроводникового лазера к импульсному мощность излучения возрастает примерно пропорционально скважности импульсов, то при скважности импульсов, примененной в светодальномере, $Q = 10^4$ дальность действия возрастала примерно в 5—10 раз.

В светодальномере-рефрактометре «Георен» источник излучения — ионный аргонный лазер, обеспечивающий излучение света на двух волнах 458 и 514 Нм [124]. Для снижения потребляемой энергии и устранения перегрева модулятора импульсы света имеют длительность 0,5 мкс, а длительность синхронизированной работы модулятора и фотоэлектронных умножителей 20 мкс. При максимальной дальности действия прибора 30 км он потребляет 45 Вт электрической энергии и обеспечивает точность измерений $5 \cdot 10^6$.

§ 7. СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

К модуляционным светодальномерам относятся также светодальномеры, основанные на реализации принципа обратной связи, который заключается в следующем [14].

Допустим, что в какой-то начальный момент времени t_1 светодальномер начинает излучать световой поток, излучение продолжается в течение времени t до момента времени t_2 , пока не начнется прием отраженного светового потока, и соответствующий началу приема электрический сигнал не прервет излучение. Последнее будет отсутствовать до момента времени $t_3 = t_2 + t$, пока поступает отраженный световой поток, а затем начнется вновь. Поскольку этот процесс периодически повторяется, то, определив частоту модуляции f при помощи частото-

мерного устройства, можно вычислить величину измеряемого расстояния по формуле

$$S = \frac{v}{4f} . \quad (10)$$

По мнению авторов этого способа, в нем предполагается использование в качестве источника излучения лазера, подающего непосредственной внутренней модуляции. Для учета временных задержек предусмотрена оптическая линия.

Из-за технических трудностей, связанных с обеспечением строгой синхронизации и исключением влияния изменений временных инструментальных задержек, а также с точным определением частоты модуляции, эти светодальномеры обеспечивают точность пока не выше 10^5 и широкого распространения не получили [99]. Однако применяемые в геодезической практике фазовые светодальномеры с плавным измерением частоты модуляции являются, по существу, светодальномерами, основанными на реализации принципа обратной связи.

§ 8. СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ С АКТИВНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

Отражатель светодальномера, устанавливаемый на противоположном от светодальномера конце измеряемого расстояния, может быть пассивным и активным. В качестве пассивного отражателя используют плоское зеркало, зеркально-линзовые и призмные отражатели, а также, при достаточно мощном источнике света, диффузионно рассеивающую поверхность объекта, расстояние до которого измеряют (в последнем случае принято называть режим работы светодальномера локационным). Активный отражатель (ретранслятор) преобразует и усиливает отраженный световой поток либо обеспечивает дополнительное излучение света.

Поскольку конструктивные особенности пассивных отражателей и вопросы расчета и проектирования их изложены в соответствующем разделе настоящей книги, то остановимся на рассмотрении наиболее характерных особенностей светодальномера с активным отражателем.

Величина максимального измеряемого при помощи светодальномера расстояния определяется условием прямой видимости между светодальномером и отражателем, мощностью источника излучения, чувствительностью приемника излучения, энергетическими потерями и эффективностью использования потока излучения, влиянием фоновых засветок и т. д. Поэтому можно существенно увеличить дальность действия светодальномера, если вместо пассивного отражателя использовать активный отражатель [69, 126]. Измерение ведется либо по когерентному, либо по некогерентному принципу, для осуществления которых необходим дополнительный канал связи. В настоящее время известно несколько схемных вариантов реализации

светодальногомера с активным отражателем. По-видимому, наиболее перспективными из них являются варианты, в которых в качестве дополнительного канала используется оптический канал, а выделение сигналов, передаваемых по каждому из трех каналов, при совмещенных оптических системах светодальногомера и активного отражателя осуществляется либо использованием источников с различными длинами волн излучения, ли-

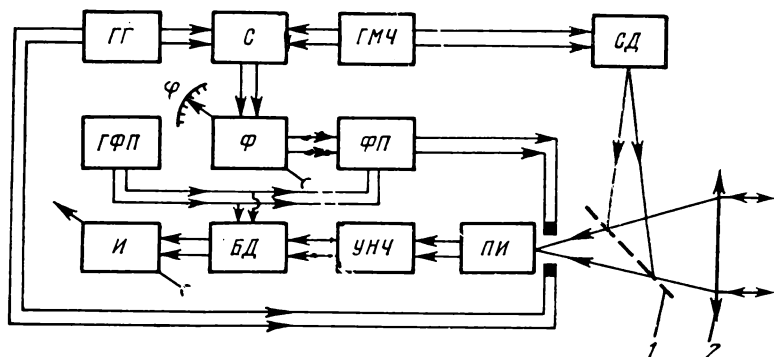


Рис. 15. Схема фазового геодезического светодальногомера КДГ-3:

ГГ — гетеродинный генератор; С — смеситель; ГМЧ — генератор модулирующей частоты; СД — светодиод; ГФП — генератор фазовых переключений; Ф — фазовращатель; ФП — фазовый переключатель; И — индикатор; БД — балансный детектор; УНЧ — усилитель низкой частоты; ПИ — приемник излучения; 1 — полупрозрачное зеркало; 2 — объектив

бо использованием различной частоты или вида модуляции.

Рассмотрим в качестве примера один из возможных вариантов реализации светодальногомера с активным отражателем. Для этого внесем изменения в схему фазового светодальногомера, в котором используется для трансформирования частот способ гетеродинирования. Светодальныймерный комплект будет состоять из «ведущей» станции — светодальногомера и «ведомой» станции — активного отражателя, измерение расстояния осуществляется по некогерентной схеме.

Для создания «ведущей» и «ведомой» станций можно использовать, подвергнув их незначительной переделке, серийно изготавливаемые фазовые светодальныемеры, частоты гетеродинных генераторов которых равны. Целесообразно при этом обеспечить взаимозаменяемость станций и возможность по-прежнему работать в виде самостоятельного светодальногомера с пассивным отражателем.

Возьмем в качестве прототипа светодальныймер КДГ-3 [77], схема которого представлена на рис. 15.

Электрический сигнал от генератора ГМЧ модулирующей частоты поступает одновременно в смеситель С и в светодиод СД. Излучаемый светодиодом модулированный световой поток,

отразившись от полупрозрачного зеркала *1*, объективом *2* в виде узконаправленного пучка лучей направляется на отражатель. Отраженный световой поток вновь проходит через объектив и полупрозрачное зеркало и попадает на фотокатод фотоэлектронного умножителя *ПИ*. Измерение разности фаз излучаемого и принимаемого световых потоков осуществляется компенсационным способом на промежуточной частоте, получаемой в результате гетеродинирования. Для осуществления преобразования частот способом гетеродинирования электрический сигнал, соответствующий излучаемому световому потоку, направляется в смеситель, в который поступает также электрический сигнал от гетеродинного генератора *ГГ*.

В качестве второго смесителя используется фотоэлектронный умножитель, в котором происходит смещение принимаемого светового потока с электрическим сигналом от гетеродинного генератора, подаваемым на нижний управляющий электрод фотоэлектронного умножителя. Индикация определенной разности фаз осуществляется нулевым способом. Для этого от специального низкочастотного генератора *ГФП* подается периодический электрический сигнал в фазовый переключатель *ФП* и балансный детектор *БД*. От смесителя электрический сигнал с промежуточной частотой проходит фазовращатель и фазовый переключатель и поступает на верхний управляющий электрод фотоэлектронного умножителя. Усилитель *УНЧ* низкой частоты усиливает импульсы, идущие с частотой, равной частоте генератора *ГФП*. Индикатор показывает «0», когда амплитуды четных и нечетных импульсов равны.

При измерении расстояния двумя светодальномерами по схеме с активным отражателем первый из них — «ведущая» станция, схема которой представлена на рис. 16, выполняет роль светодальномера, а второй — «ведомая» станция, схема которой представлена на рис. 17, выполняет роль активного отражателя.

Схема «ведущей» станции отличается от схемы светодальномера-прототипа тем, что из нее выключен гетеродинный генератор и добавлен резонансный усилитель *УВЧ* вспомогательной частоты, который включен между фотоэлектронным умножителем и смесителем.

Схема «ведомой» станции отличается от схемы светодальномера-прототипа тем, что из нее выключены почти все блоки, за исключением гетеродинного генератора, светодиода, полупрозрачного зеркала, объектива и фотоэлектронного умножителя, и добавлен резонансный усилитель *УПЧ* промежуточной частоты, который включен между фотоэлектронным умножителем и светодиодом.

Переход от светодальномерной схемы к схеме «ведущей» или «ведомой» станцией может быть осуществлен быстро при помощи специальных переключателей. Добавление двух новых блоков *УВЧ* и *УПЧ* и переключателей весьма незначительно

усложнит конструкцию светодальномера и практически не изменит ни массы, ни габаритов, ни потребляемой электрической мощности.

При измерении расстояния двумя светодальномерами излучаемый «ведущей» станцией световой поток промодулирован только на измерительной частоте, а световой поток, излучаемый «ведомой» станцией, — на двух частотах: вспомогательной и промежуточной, которые на несколько порядков отличаются друг от друга.

Из принимаемого фотоэлектронным умножителем «ведущей» станции светового потока выделяются два электрических сигнала: первый — гармонический при помощи резонансного усилителя вспомогательной частоты, который затем подается

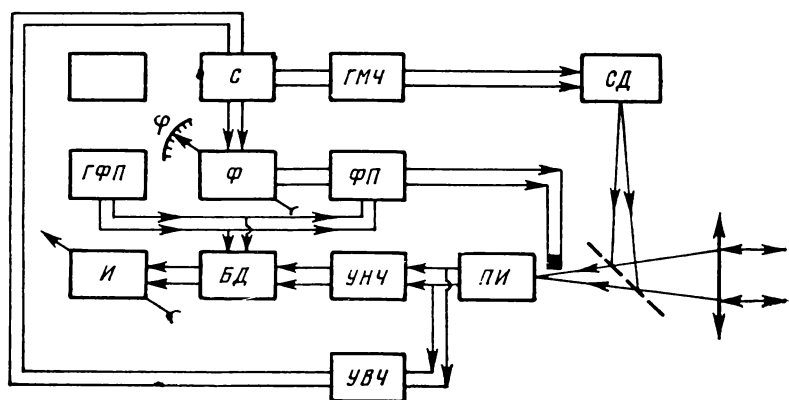


Рис. 16. Схема светодальномера — «ведущей» станции:
УВЧ — усилитель высокой частоты

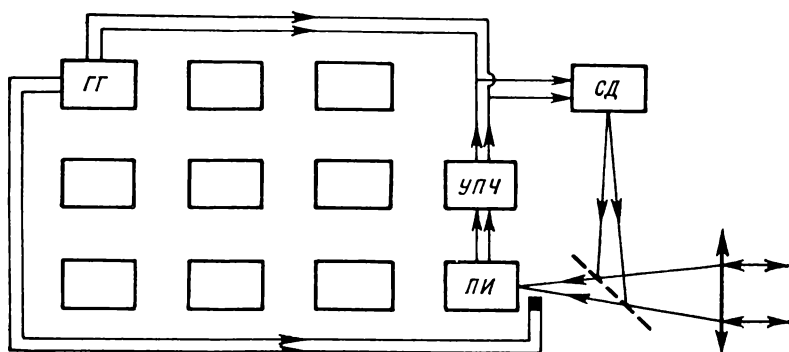


Рис. 17. Схема активного отражателя — «ведомой» станции:
УПЧ — усилитель промежуточной (разностной) частоты

в смеситель, второй—в виде электрических импульсов, чередующихся с частотой генератора ГФП, при помощи усилителя УНЧ. Поскольку частоты этих электрических сигналов отличаются друг от друга на несколько порядков, то выделение их осуществляется сравнительно просто.

Процесс измерения расстояния и обработка результата производятся так же, как и в случае использования пассивного отражателя. Для повышения точности измерений целесообразно менять функции «ведущей» и «ведомой» станций, а также предусмотреть специальные переключатели для уменьшения влияния систематических фазовых погрешностей и временных задержек.

Наличие передающей и приемной оптических систем в обеих станциях позволяет легко осуществить двустороннюю связь между ними при помощи «оптического» телефона, введение которого незначительно усложнит схему и потребует снабдить каждую станцию телефонной трубкой. Наличие связи между станциями позволит лучше организовать процесс измерения.

Увеличение дальности действия светодальномера при замене пассивного отражателя активным, или максимальное расстояние $S_{A \max}$, измеряемое при помощи светодальномера с активным отражателем, может быть определено по следующей формуле:

$$S_{A \max} \approx \tau_a^{(0,5 S_{A \max} - S_{\max})} \frac{\theta_{\text{отр}} S_{\max}^2}{\sqrt{N} D_{\text{эл}}}, \quad (11)$$

где τ_a — коэффициент пропускания атмосферы; $S_{\max}$ — максимальное расстояние, измеряемое при помощи того же светодальномера с пассивным отражателем; $\theta_{\text{отр}}$ — расходимость лучей при отражении от пассивного отражателя; N — число элементов мозаичного пассивного отражателя; $D_{\text{эл}}$ — действующий диаметр входного и выходного окон мозаичного элемента пассивного отражателя.

Поскольку пассивные мозаичные трипельпризменные отражатели, получившие в настоящее время широкое применение в практике светодальномерных измерений, могут обеспечить расходимость отраженного светового потока порядка $10''$, существенного увеличения дальности действия при замене пассивного отражателя активным может и не быть (когда максимальное расстояние, измеряемое светодальномером с пассивным отражателем, не превышает нескольких километров). Кроме того, использование в геодезических светодальномерах в качестве источников излучения лазеров легко решает проблему увеличения дальности действия светодальномеров. Однако в отдельных конкретных случаях, когда значительны потери при прохождении светового потока в атмосфере, например при измерении расстояний более 50 км или при использовании в светодальномерах-рефрактометрах световых потоков с длинами волн излу-

чения менее 0,5 мкм, активный отражатель может найти эффективное применение.

Таким образом, выполненный выше анализ различных функциональных схем современных светодальномеров позволяет сделать следующие выводы.

Оптимальным решением при создании светодальномера, предназначенного для измерения расстояний более нескольких метров, является использование модуляционных светодальномеров, в которых излучаемый немонохроматический световой поток модулируется по поляризации и интенсивности. В настоящее время из светодальномеров этого типа широкое практическое применение получили фазовые, импульсные и комбинированные светодальномеры.

Оптимальным решением при разработке геодезических светодальномеров различных типов, предусмотренных ГОСТ 19223—73, является использование схемы фазового светодальномера, поскольку фазовые светодальномеры обеспечивают при измерении расстояний от нескольких метров до 50 км погрешность измерения минимальных расстояний не более 0,1 мм и точность измерения максимальных расстояний до 10^7 . Следует отметить, что при одинаковой частоте модуляции более точными являются фазовые светодальномеры, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом.

При использовании в геодезических светодальномерах импульсных источников излучения, а также полупроводниковых лазеров и светодиодов в импульсном режиме излучения, применяемом для увеличения дальности действия светодальномера, оптимальной схемой является схема комбинированного (фазоимпульсного) светодальномера.

Оптимальным решением при разработке современного светодальномера для спутниковой геодезии является использование схемы импульсного светодальномера с твердотельным импульсным лазером в качестве источника излучения, что позволяет существенно повысить эффективность использования излучаемого светового потока. Учитывая дальнейшее развитие радиотехники и квантовой электроники, следует отметить, что импульсный способ является одним из перспективных направлений для создания новых геодезических светодальномеров, так как наряду с упрощением и ускорением процесса измерения позволяет вести измерение в локационном режиме.

При разработке высокоточных геодезических светодальномеров-рефрактометров, предназначенных для измерения расстояний до нескольких десятков километров и более, одним из перспективных направлений модернизации, по-видимому, является использование вместо пассивного отражателя активного, что помимо увеличения дальности действия позволяет вести также измерения по схеме с пассивным отражателем и осуществлять взаимную телефонную связь между светодальномером и активным отражателем.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТ НА ТОЧНОСТЬ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ

§ 9. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ФАЗОВЫЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ С ПЛАВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ МОДУЛЯЦИИ

Как уже отмечалось, современные геодезические светодальномеры являются модуляционными фазовыми светодальномерами. Однозначное определение разности фаз φ излучаемого и принимаемого световых потоков возможно только тогда, когда она не превышает фазового цикла, например, равного 2π . Поскольку относительная погрешность измерения времени, затраченного световым потоком на прохождение двойного измеряемого расстояния, равна в этом случае фазовой относительной погрешности, то

$$\frac{m_t}{t} = \frac{m_\varphi}{\varphi} > \frac{m_\varphi}{2\pi}, \quad (12)$$

где m_φ — погрешность измерения разности фаз.

Минимальное значение погрешности измерения разности фаз, определяемое только погрешностью индикации определенной разности фаз, в настоящее время может быть порядка нескольких угловых минут, относительная погрешность даже в этом случае будет слишком большой для геодезических измерений. Поэтому при измерении расстояний геодезическими светодальномерами действительное значение разности фаз φ_d излучаемого и принимаемого световых потоков во много раз больше фазового цикла

$$\varphi_d = 2\pi N + \varphi, \quad (13)$$

где N — число целых фазовых циклов ($N=1, 2, 3\dots$).

Время, затраченное световым потоком на прохождение двойного измеряемого расстояния, будет

$$t = \frac{\varphi_d}{\omega} = \frac{2\pi N + \varphi}{\omega} = \frac{1}{f} \left(N + \frac{\varphi}{2\pi} \right), \quad (14)$$

где ω и f — круговая и циклическая частоты модуляции соответственно.

Число целых фазовых циклов при известной погрешности определения разности фаз должно быть необходимым и достаточным, чтобы гарантировать измерение времени с заданной точностью, и может быть определено из следующей зависимости:

$$N \geq \frac{m_{\varphi} t}{2\pi m_t} . \quad (15)$$

Учитывая, что $t \approx N(1:f)$, соответствующее значение модулирующей частоты можно определить по формуле

$$f \geq \frac{m_{\varphi}}{2\pi m_t} . \quad (16)$$

Итак, чем больше частота модуляции, тем точнее измеряется время, затраченное светом на прохождение измеряемого расстояния, и соответственно возрастает число целых фазовых циклов, которое необходимо определить.

Число целых фазовых циклов определяют путем изменения модулирующей частоты, следя при этом за изменением разности фаз. Возможны два варианта изменения частоты модуляции: плавное и дискретное.

При плавном изменении частоты модуляции в некотором диапазоне можно исключить из прибора фазовращатель и свести погрешность измерения разности фаз к погрешности индикации определенной разности фаз. В этом случае частоту модуляции плавно изменяют от минимального до максимального значения, фиксируя частоты $f, f_1, f_2, \dots, f_n$, соответствующие определенной разности фаз φ_0 . Все условия, соответствующие определенной разности фаз в выбранном диапазоне изменения частоты, можно представить уравнениями

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{v}{2f} \left(N + \frac{\varphi_0}{2\pi} \right), \\ S &= \frac{v}{2f_1} \left[(N + 1) + \frac{\varphi_0}{2\pi} \right], \\ S &= \frac{v}{2f_2} \left[(N + 2) + \frac{\varphi_0}{2\pi} \right], \\ &\dots \dots \dots \\ S &= \frac{v}{2f_n} \left[(N + n) + \frac{\varphi_0}{2\pi} \right], \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где S — измеряемое расстояние; v — групповая скорость распространения света.

Допустим, что выбран способ, обеспечивающий индикацию определенной разности фаз $\varphi_0 = 0$. Это позволит несколько упростить уравнения (17):

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{v}{2f} N, \\ S &= \frac{v}{2f_1} (N + 1), \\ S &= \frac{v}{2f_2} (N + 2), \\ &\dots \dots \dots \\ S &= \frac{v}{2f_n} (N + n). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Приравнивая правые части первого и последнего уравнений в системе (18), определим значение числа целых фазовых циклов

$$N = n \frac{f}{f_n - f}, \quad (19)$$

где n определяют либо простым счетом в момент измерения, либо из уравнения ($n=1, 2, 3, \dots$)

$$n = \frac{f_n - f}{f_{i+1} - f_i}, \quad (20)$$

$f_{i+1} - f_i$ — разность частот, соответствующих двум соседним условиям индикации определенной разности фаз.

Если учесть выражения (19) и (20), то первое уравнение в системе (18) можно записать так:

$$S = \frac{v}{2(f_{i+1} - f_i)}. \quad (21)$$

Пользуясь этой формулой, можно получить только приближенное значение измеряемого расстояния, так как скажутся погрешности определения чисел n и N . Поэтому для исключения погрешностей измерений вычисленные по формулам (20) и (19) значения n и N округляют до ближайшего целого. Для безошибочного округления необходимо, чтобы погрешности определения целых чисел n и N не превышали $\pm 0,16$. Выполнение этого условия должно обязательно гарантироваться инструментальной точностью прибора и соответствующей программой измерений. Следует отметить, что поскольку $N \gg n$ то, по существу, необходимо гарантировать безошибочность округления при определении числа N .

Допустим, что однозначность определения числа N целых фазовых циклов зависит только от погрешностей m_f фиксации значений модулирующих частот f и f_n . Учитывая, что число n определяется безошибочно, $\Delta f = f_n - f$, и продифференцировав выражение (19), можно представить погрешность m_N вычисления числа целых фазовых циклов следующим образом:

$$m_N = \frac{\sqrt{2} n}{\Delta f} \sqrt{m_f^2 + \left(\frac{f}{\Delta f} m_{\Delta f}\right)^2},$$

где $\sqrt{2}$ — коэффициент, учитывающий остаточное влияние всех остальных неучтенных погрешностей. Или, учитывая, что

$$m_{\Delta f} \approx \sqrt{2} m_f \quad \text{и} \quad \frac{f}{\Delta f} \geq 3,$$

а также формулы (19) и (21), получаем

$$m_N \approx \frac{4m_f S_f}{\Delta f v} \leq 0,16.$$

Наконец, приняв во внимание, что при измерении максимальных расстояний $S_{\max}$ будут наиболее жесткие точностные требования к определению числа целых фазовых циклов, можно найти допустимую погрешность фиксации частоты модуляции

$$m_f \leq 0,04 \frac{v \Delta f}{f S_{\max}} \quad \text{или} \quad \frac{m_f}{f} \leq 0,04 \frac{v \Delta f}{f^2 S_{\max}}. \quad (22)$$

Когда допустимая относительная погрешность фиксации частоты модуляции не менее 1:100 000, значение частоты можно определить непосредственным отсчитыванием по шкале генератора, которая калибруется резонансным способом по частоте кварцевого рабочего эталона частоты. Когда же допустимая погрешность порядка 1:250 000 и менее, определяют, как правило, отклонение фиксируемой частоты от частоты кварцевого рабочего эталона. Возможны и другие способы и технические средства определения значения модулирующей частоты [29, 54]. Следует отметить, что современные радиотехнические средства гарантируют измерение частоты практически с любой точностью (до 10^{10} при использовании квантовых эталонов частоты).

Поскольку формула (22) справедлива только при условии пренебрегаемо малого влияния погрешности m_{ϕ_0} индикации определенной разности фаз, определим значение этой погрешности из условия

$$m_{\phi_0} \leq \frac{2\pi N m_f}{3f}, \quad (23)$$

где 3 — коэффициент, учитывающий пренебрегаемо малое влияние погрешности индикации определенной разности фаз.

Преобразуя условие (23) с учетом формул (22) и (18), получаем выражение, определяющее допустимое пренебрегаемо малое значение погрешности индикации определенной разности фаз

$$m_{\phi_0} \leq 0,053\pi \frac{\Delta f}{f}. \quad (24)$$

Необходимая ширина диапазона Δf изменения модулирующей частоты определяется из условия однозначного измерения

минимального расстояния $S_{\min}$, для удовлетворения которого нужно при изменении частоты получить минимум две фиксации определенной разности фаз

$$\Delta f \geq 3(f_{i+1} - f_i). \quad (25)$$

Зная величину минимального измеряемого расстояния $S_{\min}$ и учитывая формулы (21) и (25), определяют необходимую ширину диапазона изменения модулирующей частоты

$$\Delta f \geq \frac{1,5v}{S_{\min}}. \quad (26)$$

Если же индикация определенной разности фаз осуществляется каким-либо из парафазно-балансных способов, когда фазовый цикл равен π , необходимая ширина диапазона изменения модулирующей частоты будет в два раза меньше (допустимые погрешности индикации будут также в два раза меньше).

§ 10. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ФАЗОВЫЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ, РАБОТАЮЩИЕ НА ФИКСИРОВАННЫХ ЧАСТОТАХ МОДУЛЯЦИИ

При определении числа целых фазовых циклов вторым способом используют несколько специально подобранных фиксированных частот модуляции. Минимальное число частот модуляции две: f основная и f_1 — вспомогательная, которая необходима для определения числа N целых фазовых циклов, получаемых при измерении расстояния на основной частоте. Вспомогательная частота значительно меньше основной, и ее значение определяется из условия однозначного измерения максимального расстояния $S_{\max}$:

$$f_1 \leq \frac{v}{2S_{\max}}, \quad (27)$$

т. е. разность фаз φ_1 , измеренная на вспомогательной частоте модуляции, не должна быть больше фазового цикла. Следовательно, величина измеряемого расстояния определяется дважды:

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{v\varphi_1}{4f_1\pi}, \\ S &= \frac{v}{2f} \left(N + \frac{\varphi}{2\pi} \right), \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

где $\varphi < 2\pi$ — разность фаз в пределах последнего фазового цикла, полученная при измерении на основной частоте модуляции.

Число N целых фазовых циклов определяют по формуле

$$N = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{f}{f_1} \varphi_1 - \varphi \right), \quad (29)$$

или, учтя коэффициент многозначности $K_\lambda = f : f_1$,

$$N = \frac{K_\lambda \varphi_1 - \varphi}{2\pi}. \quad (30)$$

Вычисленное по формуле (29) или (30) значение числа целых фазовых циклов округляют до ближайшего целого и используют для точного определения величины измеряемого расстояния по второму уравнению системы (28).

Допустим, что однозначность определения числа целых фазовых циклов зависит только от погрешности m_φ измерения разности фаз φ и φ_1 . Использование фиксированных частот модуляции позволяет свести все частотные погрешности к погрешностям стабилизации частоты, которые современными радиотехническими средствами легко могут быть доведены до пренебрегаемого малого значения. Продифференцировав выражение (29) и приняв $f : f_1 \gg 1$, можно представить погрешность m_N определения числа целых фазовых циклов следующим образом:

$$m_N = \frac{\sqrt{2} m_\varphi f}{2\pi f_1}, \quad (31)$$

где $\sqrt{2}$ — коэффициент, учитывающий остаточное влияние всех остальных неучитываемых погрешностей.

Поскольку погрешность измерения разности фаз, как правило, известна заранее, так как она определяется выбором фазоизмерительного устройства или способа индикации определенной разности фаз, то, учитывая зависимость (31) и что $m_N \leq 0,16$, находим максимальное значение коэффициента многозначности, при котором еще гарантируется однозначное определение числа целых фазовых циклов,

$$K_\lambda = \frac{f}{f_1} \leq 0,2 \frac{\pi}{m_\varphi}. \quad (32)$$

В настоящее время минимальное значение погрешности измерения разности фаз составляет несколько угловых минут, следовательно, коэффициент многозначности не может быть более 1000. В геодезических светодальномерах фазовые погрешности существенно больше минимальных значений, полученных в лабораторных условиях, поэтому для большей надежности и простоты последующих вычислений коэффициент многозначности при разработке геодезических светодальномеров принимают равным 100 или 10.

Для упрощения конструкций генератора электрического сигнала модулирующей частоты и фазоизмерительного устройства обычно выбирают иное значение f_1^* вспомогательной частоты, которое одного порядка с основной и отличается от нее на величину f_1 , определяемую по формуле (27), т. е.

$$f_1^* = f - f_1. \quad (33)$$

В этом случае разность разностей фаз, определяемых при измерении расстояния на основной частоте f и на новой вспомогательной частоте f_1^* равна разности фаз φ_1 , которая получалась при измерении расстояния на частоте f_1

$$\varphi_1 = \varphi - \varphi_1^*, \quad (34)$$

где φ и φ_1^* — разности фаз, полученные при измерении расстояния на основной частоте f и на новой вспомогательной частоте f_1^* (все разности фаз имеют действительное полное значение).

Поэтому погрешность определения разности фаз φ_1 будет равна в этом случае

$$m_{\varphi_1} = \sqrt{2} m_{\varphi}, \quad (35)$$

где $\sqrt{2}$ — коэффициент, учитывающий необходимость двойного измерения разности фаз: на основной частоте f и новой вспомогательной частоте f_1^* ; а соответствующая погрешность измерения расстояния m_s может быть представлена так:

$$m_s \approx \frac{\sqrt{2} m_{\varphi_1} v}{4\pi (f - f_1^*)}, \quad (36)$$

где $\sqrt{2}$ — коэффициент, учитывающий остаточное влияние всех остальных неучитываемых погрешностей.

Эта погрешность для гарантирования однозначного определения числа N целых фазовых циклов при измерении расстояния на основной частоте f не должна превышать

$$m_s \leq 0,08 \frac{v}{f}. \quad (37)$$

На основании формул (35), (36) и (37) можно определить допустимую погрешность измерения разности фаз, обеспечивающую однозначное измерение максимального расстояния $S_{\max}$,

$$m_{\varphi} = 0,08 \frac{v}{f S_{\max}}. \quad (38)$$

При измерении минимальных расстояний вследствие уменьшения числа целых фазовых циклов определение этого числа упрощается, поэтому фазовыми светодальномерами с несколькими фиксированными частотами модуляции можно измерять любые малые расстояния. При индикации определенной разности фаз каким-либо из парафазно-балансных способов допустимая погрешность измерения разности фаз будет в два раза меньше, если фазовый цикл равен π .

Когда допустимая погрешность измерения разности фаз не может быть гарантирована, измерение расстояний ведут на трех или более фиксированных частотах, одна из которых основная, а остальные f_1^* и f_2^* — вспомогательные.

Определение разностей фаз, соответствующих измерениям расстояния на двух разностных частотах, используют для вычисления числа целых фазовых циклов при измерении на основной частоте. Вначале по разности фаз, соответствующей наименьшей разностной частоте, однозначно определяют расстояние с точностью до $0,08$ длины волны второй разностной частоты; затем, используя большую (вторую) разностную частоту, вычисляют расстояние с точностью до $0,08$ ($v : f$). Таким образом, максимальное расстояние, однозначно измеряемое с помощью светодальномера, работающего на трех фиксированных частотах, определяется выражением

$$S_{\max} \leq \frac{v}{2f} K_{\lambda}^{21}. \quad (39)$$

В качестве примера светодальномера с тремя фиксированными частотами модуляции рассмотрим высокоточный геодезический светодальномер с модуляцией светового потока на сверхвысоких частотах, выполненный по схеме, когда вместо фазовращателя используется оптическая линия задержки (см. рис. 14). В светодальномере осуществляется модуляция на трех фиксированных частотах, которые незначительно отличаются друг от друга, $f > f_2^* > f_1^*$. Следовательно, при измерении расстояния S выполняются три условия

$$\left. \begin{aligned} 2S &= \frac{v}{f} N + l, \\ 2S &= \frac{v}{f_1^*} N_1^* + l_1^*, \\ 2S &= \frac{v}{f_2^*} N_2^* + l_2^*, \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

где N, N_1^*, N_2^* — числа целых модулированных волн (или фазовых циклов); l, l_1^*, l_2^* — отсчеты по шкале оптической линии задержки.

Из системы (40) можно выделить уравнения, определяющие действительное значение разностей фаз φ, φ_1^* и φ_2^* при измерении расстояния на соответствующих частотах модуляции:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= 2\pi \left(N + \frac{lf}{v} \right), \\ \varphi_1^* &= 2\pi \left(N_1^* + \frac{l_1^* f_1^*}{v} \right), \\ \varphi_2^* &= 2\pi \left(N_2^* + \frac{l_2^* f_2^*}{v} \right). \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Поскольку разность фаз $\varphi_2 = \varphi - \varphi_2^*$ для гарантирования однозначности определения числа N целых фазовых циклов не

может быть больше 2π , то при $l > l_2^* N = N_2^*$ (или $N = N_2^* + 1$ при $l_1 < l_2^*$), следовательно (для упрощения последующих преобразований) принимаем $l > l_2^*$,

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{v} (lf - l_2^* f_2^*), \quad (42)$$

таким образом,

$$2S = \frac{v\varphi_2}{2\pi(f - f_2^*)} = \frac{lf - l_2^* f_2^*}{f - f_2^*}. \quad (43)$$

Значение разности фаз φ_1 можно определить так:

$$\varphi_1 = \varphi - \varphi_1^* = 2\pi \left[N - N_1^* \frac{(lf - l_1^* f_1^*)}{v} \right], \quad (44)$$

следовательно,

$$2S = \frac{v}{2\pi(f - f_1^*)} \varphi_1 = \frac{v}{(f - f_1^*)} \left[N - N_1^* + \frac{(lf - l_1^* f_1^*)}{v} \right]. \quad (45)$$

Приравняв правые части уравнений (43) и (45), можно определить разность чисел целых фазовых циклов

$$N - N_1^* = \frac{1}{v} \left[\frac{(f - f_1^*)}{(f - f_2^*)} (lf - l_2^* f_2^*) - (lf - l_1^* f_2^*) \right]. \quad (46)$$

Подставив вычисленное по формуле (46) и округленное до ближайшего целого значение разности $N - N_1^*$ в выражение (45), определим вновь, уже более точно, величину измеряемого расстояния, которую используем для нахождения числа N целых фазовых циклов, по формуле

$$N = f \frac{(2S - l)}{v}. \quad (47)$$

И, наконец, подставив вычисленное по формуле (47) и округленное до ближайшего целого значение числа N в первое уравнение системы (40), определим окончательное значение величины измеряемого расстояния.

Число n вспомогательных частот, необходимое для гарантирования однозначного определения числа N целых фазовых циклов, когда выбран коэффициент K_λ многозначности и задана максимальная дальность $S_{\max}$ действия светодальномера, можно определить, используя зависимость (39), по формуле

$$n \geq \log_{K_\lambda} \left(S_{\max} \frac{2f}{v} \right). \quad (48)$$

Отметим, что когда величина максимальных измеряемых светодальномером расстояний может быть предварительно грубо измерена, например по карте, вместо значения дальности действия светодальномера в формуле (48) следует использовать погрешность предварительного измерения.

Для упрощения процесса измерения и обработки результатов измерения целесообразно, помимо рекомендованного ранее значения коэффициента многозначности 100 или 10, выбрать определенное значение основной модулирующей частоты. Например, если частота будет равна 10, 100 или 1000 МГц, измеренные значения разностей фаз могут быть выражены в соответствующих десятичных долях секунды. Это позволит без дополнительных вычислений непосредственно по разностям фаз определять время, затраченное световым потоком на прохождение двойного измеряемого расстояния. Если же частота будет равна, например, 15, 30 и 75 МГц, то измеренные значения разностей фаз целесообразно выразить в соответствующем десятичном количестве метров. Последнее позволит без дополнительных вычислений определить величину измеряемого расстояния. Рекомендованный выбор значений коэффициента многозначности K_d и основной модулирующей частоты f позволяет сравнительно легко автоматизировать процесс измерения и получать результат измерения в цифровом виде на специальном табло светодальномера.

Помимо двух основных рассмотренных способов, можно использовать для определения числа целых фазовых циклов и другие способы, которые из-за технических трудностей пока широко в светодальномерной практике не применяют. Например, если грубое измерение расстояния осуществлять импульсным способом с точностью до 0,08 длины волны основной модулирующей частоты, этот результат можно использовать для определения числа целых фазовых циклов, получаемых при измерении расстояния фазовым способом на основной модулирующей частоте (в этом случае светодальномер является комбинированным, импульсно-фазовым, светодальномером).

Итак, для обеспечения необходимой в геодезической практике точности измерения расстояний фазовыми светодальномерами действительное значение измеряемой разности фаз должно быть значительно больше одного фазового цикла, но при этом для вычисления окончательного значения измеряемого расстояния прежде надо определить число целых фазовых циклов. Анализ применяемых в настоящее время способов определения числа целых фазовых циклов позволяет сделать вывод, что при создании геодезических фазовых светодальномеров целесообразно использовать способ измерения расстояния на нескольких фиксированных частотах модуляции, который обеспечивает минимальные частотные погрешности и возможность измерения любых малых расстояний.

§ 11. РАСЧЕТ НА ТОЧНОСТЬ ФАЗОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ

Обеспечение необходимой точности измерений является одним из основных требований, предъявляемых к любому светодальномеру. Расчет на точность обосновывает выбор функциональной схемы светодальномера и ее структурных звеньев, определяет основные конструктивные параметры и технологические требования на изготовление наиболее ответственных узлов, обеспечивает рациональное выполнение конструктивных, метрологических и технолого-экономических требований, гарантирует необходимую эксплуатационную эффективность, способствует разработке нового прибора.

Измерение расстояния при помощи светодальномера — это получение количественной информации о времени, затраченном световым потоком на прохождение измеряемого расстояния. Но, прежде чем зафиксировать отсчет, соответствующий значению измеряемого времени (или расстояния), необходимо ориентировать световой поток относительно объекта измерения. Таким образом, в процессе измерения участвуют три основных структурных звена светодальномера: рабочая мера, ориентирующие устройства и отсчетное устройство. Кроме того, необходимо учитывать влияние окружающей среды — атмосферы на процесс измерения.

Для повышения точности конечного результата за счет исключения некоторых систематических составляющих погрешностей и уменьшения влияния случайных составляющих погрешностей расстояния измеряют по заранее составленной программе и методике измерений.

При проектировании светодальномера, как правило, не известны корреляционно-попарные связи между отдельными измерениями и отдельными составляющими погрешностями, поэтому в первом приближении можно считать их независимыми.

Расчет на точность ведут в следующей последовательности. Зная допустимую погрешность M_s конечного результата измерения и число n единичных измерений расстояния, предусмотренных программой и методикой измерений (обычно $n < 10$), определяют допустимую погрешность m_s однократного измерения расстояния светодальномером

$$m_s = M_s \sqrt{n}. \quad (49)$$

Погрешность однократного измерения является следствием влияния составляющих погрешностей основных структурных звеньев процесса измерения расстояния светодальномером. За счет улучшения конструкции и технологии изготовления отдельных узлов и всего светодальномера усложнением программы и методики измерений, а также введением соответствующих поправок влияние систематических составляющих погрешностей

стремятся ослабить до пренебрегаемо малого значения (влияние систематической составляющей погрешности считается пренебрегаемо малым, если оно не превышает 5% от m_s). Поэтому составляющие погрешности, учитываемые при точностном расчете, являются случайными погрешностями. Следует отметить, что в этом случае влияние какой-либо отдельной составляющей погрешности считается пренебрегаемо малым, если оно не превышает 10% от m_s .

Величина расстояния, измеренного при помощи фазового геодезического светодальномера, с учетом формул (1), (4), (6) и (14) определяется обобщенным выражением

$$2S = \frac{c}{n_{\text{гpf}}} \left(N + \frac{\varphi}{2\pi} \right) + \delta, \quad (50)$$

где φ — разность фаз в пределах последнего фазового цикла (при измерении разности фаз компенсационным способом может быть и определенной разностью фаз φ_0); δ — постоянная поправка светодальномера.

Постоянная поправка фазового геодезического светодальномера, помимо систематических фазовых искажений, вносимых модулятором и демодулятором, учитывает: а) несовпадение условных плоскостей, соответствующих началу излучения модулированного светового потока и началу фазового сравнения принимаемого светового потока; б) несовмещение этих условных плоскостей и плоскости отражателя с конечными точками измеряемого расстояния; в) временные и фазовые задержки в электрических цепях; г) прохождение светового потока в оптических средах, показатель преломления которых отличается от показателей преломления атмосферы. Она может быть представлена в виде двух слагаемых [66]:

$$\delta = \delta_r + \delta_e, \quad (51)$$

где δ_r — «геометрическая» составляющая, определяемая с необходимой точностью непосредственно по конструктивным данным светодальномера и отражателя; δ_e — «электрическая» составляющая, вызванная в основном фазовыми искажениями и временными задержками.

Для использования при измерении расстояний отражателей любой конструкции (из других светодальномерных комплектов) целесообразно выделить из суммарной постоянной поправки светодальномера составляющую δ_0 , определяемую только конструктивными особенностями отражателя, и ее значение указывать в паспорте отражателя.

Электрическую составляющую постоянной поправки светодальномера нельзя с необходимой точностью определить по конструктивным данным. Поэтому значение постоянной поправки светодальномера определяют по результатам измерения нескольких эталонных расстояний, так как постоянная поправка

может зависеть от величины измеряемого расстояния. Одновременно с определением постоянной поправки светодальномера проводят калибровку шкалы фазовращателя, проверяют точностные и другие параметры и характеристики светодальномера, ведя измерения по программам, указанным в инструкции по эксплуатации и эталонированию светодальномера. Следует отметить, что эталонированию светодальномера в полевых условиях обязательно предшествует калибровка частоты генератора модулирующего электрического сигнала и проверка ее стабильности в лабораторных условиях, поскольку период этой частоты является хронометрической рабочей мерой светодальномера.

Рекомендованные ГОСТ 19223—73 длины базисов и их допустимые погрешности приведены в табл. 6.

ТАБЛИЦА 6

Требования к контрольным базисам	Типы геодезических светодальномеров			
	СБ-6	СМ-02	СМ-2	СМ-5
Количество базисов не менее	4	3	6	3
Длина базисов, км	1,5; 5; 10; 20	0,1; 0,2; 0,3	0,1; 0,3; 0,5; 1,; 1,5; 2	0,05; 0,2; 0,5
Погрешность базиса не более	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	При длине базиса до 0,5 км— $1 \cdot 10^{-5}$. При длине базиса более 0,5 км— $2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$

Кроме того, следует помнить, что электрическая составляющая поправки светодальномера δ_e непостоянна во времени и может изменяться при замене модулятора и демодулятора, при изменении режимов электрического питания модулятора, демодулятора и фотоэлектрического приемника, при юстировке положения модулятора и демодулятора в оптической схеме светодальномера, при изменении частоты модуляции и т. д. Для учета изменений этой составляющей вводят в светодальномер оптическую калибровочную линию («оптическое замыкание»), длина которой соответствует диапазону изменения составляющей, который не должен превышать величину удвоенной погрешности определения поправки. Выполнение этого требования обеспечивается соответствующими конструктивными и технологическими средствами и методами.

Можно практически полностью исключить влияние электрической составляющей поправки светодальномера δ_e , если один и тот же элемент использовать в качестве модулятора и демодулятора (автоколлимационный вариант). В случае идентично-

сти модулятора и демодулятора поочередной функциональной заменой их при помощи специального оптического переключателя можно также исключить влияние этой составляющей [66].

Продифференцировав формулу (50) и приняв, что погрешность определения значения скорости света в вакууме практически равна нулю (не превышает $4 \cdot 10^{-9}$), что во время измерений гарантируется безошибочное определение числа целых фазовых циклов и что

$$2S \approx \frac{c \left(N + \frac{\Phi}{2\pi} \right)}{f n_{\text{гп}}},$$

можно вычислить погрешность однократного измерения расстояния фазовым светодальномером [70]

$$m_S = \sqrt{S^2 \left(\frac{m_{n_{\text{гп}}}}{n_{\text{гп}}} \right)^2 + S^2 \left(\frac{m_f}{f} \right)^2 + \left(\frac{c}{4\pi n_{\text{гп}} f} \right)^2 m_\Phi^2 + m_\delta^2}, \quad (52)$$

где $m_{n_{\text{гп}}}$, m_f , m_Φ и m_δ — погрешности определения группового показателя преломления атмосферы, модулирующей частоты, разности фаз и постоянной поправки светодальномера соответственно, которые являются составляющими погрешностями.

Светодальномеры относятся к хронометрическим измерительным системам, в качестве временной рабочей меры в них используется период частоты модуляции. Поэтому влияние погрешностей рабочей меры m_p на результат измерения, пропорциональное величине измеряемого расстояния, будет определяться относительной частотной погрешностью

$$m_p = S \frac{m_f}{f}. \quad (53)$$

Величина погрешности ориентирования $m_{\text{ор}}$, включающая погрешность m_δ за нестабильность и неточность определения постоянной поправки светодальномера, погрешности m_c и n_r центрирования и редуцирования светодальномера и отражателя относительно конечных точек измеряемого расстояния, не зависит от величины измеряемого расстояния

$$m_{\text{ор}} = \sqrt{m_\delta^2 + 2(m_c^2 + m_r^2)}, \quad (54)$$

где 2 — коэффициент, учитывающий, что погрешности центрирования и редуцирования светодальномера и отражателя примерно одинаковы.

Следует отметить, что рефракция и турбулентция, искривляющие траекторию распространения светового потока, приводят к весьма незначительным погрешностям. Например, при измерении расстояний порядка 30 км эти погрешности составляют не более 0,6 мм.

Поскольку влияние погрешностей центрирования и редуцирования обычно пренебрегаемо мало, т. е.

$$m_c \approx m_r < 0,1 m_s, \quad (55)$$

то

$$m_{op} = m_\delta. \quad (56)$$

При определении разности фаз излучаемого и принимаемого модулированных световых потоков в геодезических светодальномерах используют принцип совмещенного отсчета, когда роль отсчетного указателя выполняет фаза принимаемого светового потока, а отметок-штрихов рабочей меры — фаза излучаемого светового потока. Поэтому влияние погрешности отсчитывания m_o на результат измерения характеризуется погрешностью измерения разности фаз m_ϕ

$$m_o = \frac{c}{4\pi n_{гр} f} m_\phi = \frac{v}{4\pi f} m_\phi, \quad (57)$$

где $v = c : n_{гр}$ — групповая скорость распространения света.

В фазовых светодальномерах с оптической линией задержки, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом, как правило, погрешность индикации определенной разности фаз $m_{\phi.0}$ является погрешностью измерения разности фаз m_ϕ .

Если при изменении уровня принимаемого светового потока, вызванного условиями измерений и величиной измеряемого расстояния, контрастная чувствительность приемника излучения остается неизменной, то погрешность индикации определенной разности фаз $m_{\phi.0}$ также не изменяется, следовательно погрешность измерения разности фаз m_ϕ не будет зависеть от величины измеряемого расстояния.

В светодальномерах, в которых разность фаз измеряется непосредственно при помощи фазоизмерительного устройства, погрешность измерения разности фаз не зависит от величины измеряемого расстояния, если отношение сигнал/шум на входе приемника излучения будет не менее 10.

Влияние внешней среды m_b полностью характеризуется относительной погрешностью определения группового показателя преломления атмосферы и зависит от величины измеряемого расстояния

$$m_b = S \frac{m_{n_{гр}}}{n_{гр}}. \quad (58)$$

На основании сказанного погрешность однократного измерения расстояния светодальномером можно представить в следующем виде:

$$m_s = \sqrt{m_p^2 + m_{op}^2 + m_o^2 + m_b^2}, \quad (59)$$

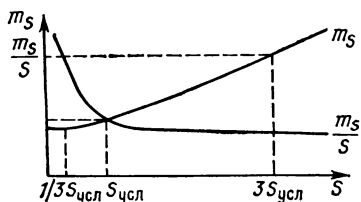
позволяющем учитывать влияние погрешностей основных струк-

турных звеньев процесса измерения (рабочей меры, ориентирования, отсчитывания и внешней среды).

Допустим, что при измерении какого-то условного расстояния $S_{\text{усл}}$ обеспечивалось равномерное влияние погрешностей всех структурных звеньев (с метрологической точки зрения такое

Рис. 18. Графические зависимости погрешности и относительной погрешности от величины измеряемого фазовым геодезическим светодальномером расстояния:

m_S и m_S/S — погрешность и относительная погрешность; $S_{\text{усл}}$ — условное измеряемое светодальномером расстояние



распределение составляющих погрешностей является оптимальным), тогда, преобразуя выражение (59), получаем

$$m_p \approx m_{op} \approx m_o \approx m_b \approx 0,5 m_{S. \text{ усл}} \quad \text{или} \quad \frac{m_f}{f} \approx \frac{m_{n_{\text{гр}}}}{n_{\text{гр}}} \approx \frac{0,5 m_{S. \text{ усл}}}{S_{\text{усл}}} . \quad (60)$$

Поскольку влияние погрешности рабочей меры и внешних условий зависит от величины измеряемого расстояния, а влияние погрешностей ориентирования и отсчитывания от расстояния не зависит, погрешность результата измерения можно представить в виде двух составляющих m_1 и m_2

$$m_{S. \text{ усл}} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} . \quad (61)$$

где

$$m_1 = \sqrt{m_p^2 + m_b^2} = S \sqrt{\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_{n_{\text{гр}}}}{n_{\text{гр}}}\right)^2} , \quad (62)$$

$$m_2 = \sqrt{m_{op}^2 + m_o^2} = \sqrt{m_b^2 + \left(\frac{v}{4\pi f}\right)^2 m_{\phi}^2} . \quad (63)$$

При выполнении условия $m_1 \approx m_2$:

$$m_1 \approx m_2 \approx 0,7 m_{S. \text{ усл}} . \quad (64)$$

При измерении расстояний больше $S_{\text{усл}}$ относительная погрешность результата не превышает $m_{S. \text{ усл}} : S_{\text{усл}}$, а при измерении расстояний меньше $S_{\text{усл}}$ погрешность не превышает $m_{S. \text{ усл}}$ (рис. 18).

При увеличении измеряемого расстояния до $3S_{\text{усл}}$ и более доминирующее значение приобретает влияние составляющей m_1 : при этом относительная погрешность результата уменьшается от $m_{S. \text{ усл}} : S_{\text{усл}}$ до $0,7 m_{S. \text{ усл}} : S_{\text{усл}}$, а при измерении расстояний более $3S_{\text{усл}}$ она постоянна и равна $0,7 m_{S. \text{ усл}} : S_{\text{усл}}$. Следо-

вательно, при проектировании фазовых светодальномеров, обеспечивающих постоянную относительную погрешность во всем диапазоне измеряемых расстояний, значение минимального расстояния $S_{\min}$ должно быть не менее $3S_{\text{усл}}$, а погрешность результата будет определяться только погрешностями рабочей меры и внешних условий. При этом, если измерение ведется на нескольких фиксированных частотах модуляции, то благодаря пренебрегаемо малому влиянию погрешности рабочей меры (частоты модуляции) суммарная погрешность будет определяться только погрешностью определения группового показателя преломления атмосферы.

При уменьшении измеряемого расстояния до $1/3 S_{\text{усл}}$ и далее доминирующее значение приобретает влияние составляющей m_2 . При измерении расстояний в диапазоне от $S_{\text{усл}}$ до $1/3 S_{\text{усл}}$ погрешность результата уменьшается от $m_{S_{\text{усл}}}$ до $0,7 m_{S_{\text{усл}}}$, а при измерении расстояний менее $1/3 S_{\text{усл}}$ она постоянна и равна $0,7 m_{S_{\text{усл}}}$. Следовательно, при проектировании фазовых светодальномеров, обеспечивающих постоянную погрешность во всем диапазоне измеряемых расстояний, значение максимального измеряемого расстояния $S_{\max}$ должно быть не более $1/3 S_{\text{усл}}$, а погрешность результата будет определяться только погрешностью ориентирования и отсчитывания. При этом желательно, чтобы влияние погрешности ориентирования было пренебрегаемо мало, тогда будет сказываться лишь влияние погрешности измерения разности фаз. Минимально возможная погрешность измерения разности фаз, как уже отмечалось, равна погрешности индикации определенной разности фаз.

Возможен вариант, когда будут сказываться, хотя и неравномерно, влияния обеих составляющих m_1 и m_2 . В этом случае минимальное измеряемое расстояние должно быть не менее $1/3 S_{\text{усл}}$, а максимальное — не более $3 S_{\text{усл}}$ (по мере увеличения измеряемого расстояния погрешность возрастает в три раза, но при этом в три раза уменьшается относительная погрешность).

Итак, погрешность результата измерения, выполненного при помощи геодезического фазового светодальномера, суммируется из погрешностей рабочей меры, ориентирования, отсчитывания и из-за влияния внешних условий (рабочей мерой является период частоты модуляции, ориентирование сводится к определению величины и учету изменений постоянной поправки прибора, отсчитывание — это определение разности фаз излучаемого и принимаемого световых потоков, влияние внешних условий сказывается при определении группового показателя преломления атмосферы).

Для уменьшения и исключения фазовых искажений, вносимых модулятором и демодулятором, а также временных и фазовых задержек в электрических цепях светодальномера необходимо тщательно определить значение постоянной поправки светодальномера, использовать центральную часть принимаемо-

го светового потока, вести измерение разности фаз на промежуточной частоте, использовать оптические калибровочные линии.

Поскольку влияние одних составляющих погрешностей на точность результата измерения зависит от величины измеряемого расстояния, а других — не зависит, целесообразно использовать методику расчета на точность при проектировании геодезического фазового светодальномера, основанную на введении понятия условного измеряемого расстояния $S_{ус.л.}$, при измерении которого влияние всех основных погрешностей примерно одинаково.

§ 12. РАСЧЕТ НА ТОЧНОСТЬ ИМПУЛЬСНЫХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ

Как уже отмечалось, оптимальным решением при разработке приборов, предназначенных для быстрого, сравнительно грубого (с допустимой погрешностью около 10 см и более) измерения значительных расстояний, является использование импульсных светодальномеров. Например, в современной геодезической практике применяют импульсные светодальномеры для выполнения линейных измерений с поверхности Земли до искусственных спутников Земли (ИСЗ). Величина расстояния, измеренного импульсным светодальномером, определяется следующим обобщенным выражением, аналогичным выражению (50):

$$S = \frac{c}{2n_{гpf}} (N + \Delta_N) + \delta, \quad (65)$$

где f — частота генератора калиброванных временных импульсов, период которой является рабочей мерой; $N=1, 2, 3 \dots$ — целое число периодов частоты генератора калиброванных временных импульсов, определяемое безошибочно и автоматически; $\Delta_N < 1$ — дробная часть периода частоты генератора калиброванных временных импульсов; c — скорость света в вакууме; $n_{гp}$ — групповой показатель преломления атмосферы; δ — постоянная поправка светодальномера.

Продифференцировав формулу (65) и учитывая, что целое число периодов частоты генератора калиброванных временных импульсов определяется безошибочно, что погрешность определения скорости света в вакууме, не превышающая $4 \cdot 10^{-9}$, практически равна нулю и что

$$S \approx \frac{c (N + \Delta_N)}{2n_{гpf}},$$

можно определить погрешность однократного измерения расстояния импульсным светодальномером

$$m_S = \sqrt{S^2 \left(\frac{m_f}{f} \right)^2 + S^2 \left(\frac{m_{n_{гp}}}{n_{гp}} \right)^2 + \left(\frac{c}{2n_{гpf}} \right)^2 m_{\Delta_N}^2 + m_{\delta}^2}, \quad (66)$$

где $\frac{m_f}{f}$ — погрешность частоты генератора временных калиброванных импульсов (применение современных радиотехнических средств, включая квантовые эталоны частоты, позволяет обеспечить практически любую точность задания и стабилизации частоты); $\frac{m_{n_{гр}}}{n_{гр}}$ — погрешность определения группового показателя преломления атмосферы (при измерении импульсным светодальномером расстояний до ИСЗ, когда большую часть пути световой импульс проходит в космическом пространстве, следует учитывать, что влияние этой погрешности пропорционально лишь пути S_a , проходимого световым импульсом в атмосфере); $m_{\Delta N}$ — погрешность определения дробной части периода частоты генератора калиброванных временных импульсов [например, в импульсном светодальномере со счетчиком временных калиброванных импульсов (см. рис. 6) $m_{\Delta N} \approx 0,5$]; m_b — погрешность постоянной поправки светодальномера (помимо этой погрешности, погрешностями пространственного ориентирования являются погрешности центрирования светодальномера и отражателя).

Следует отметить, что в импульсных светодальномерах, помимо пространственного ориентирования, необходимо выполнить условия временного ориентирования. Последнее заключается в обеспечении идентичности измеряемого в приборе временного интервала времени t , затрачиваемому световым импульсом на прохождение двойного измеряемого расстояния.

Поскольку, как правило, погрешности пространственного ориентирования светодальномера и отражателя, а также погрешность определения постоянной поправки светодальномера не превышают $0,1 m_s$, суммарное влияние погрешностей ориентирования определяется в основном влиянием погрешностей, связанных с заданием временного интервала при помощи старт- и стоп-импульсов. Эти погрешности, возникающие вследствие искажений формы и изменений амплитуды принимаемого отраженного импульса, обусловлены турбулентцией атмосферы и асинхронностью траекторий фото- и вторичных электронов в приемнике излучения — ФЭУ. При автоматическом введении соответствующих поправок за форму этих импульсов и при гарантировании определенного значения их амплитуд можно путем фиксации «энергетических» центров импульсов или какими-либо другими способами задать границы временного интервала с погрешностями порядка $0,1$ от длительности τ_n старт- и стоп-импульсов. При измерении импульсным светодальномером максимальных расстояний, когда энергия принимаемого отраженного импульса весьма незначительна, погрешности временного ориентирования из-за расширения отраженного импульса и флуктуации его интенсивности несколько возрастут.

Учитывая влияние погрешностей центрирования и временно-го ориентирования, а также формулу (66), погрешность одно-кратного измерения расстояния импульсным светодальномером можно определить зависимостью

$$m_S = \sqrt{S^2 \left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + S_a^2 \left(\frac{m_{n_{rp}}}{n_{rp}}\right)^2 + \left(\frac{c}{2f}\right)^2 m_{\Delta N}^2 +} \rightarrow \\ \rightarrow \sqrt{\left(\frac{c}{2f}\right)^2 m_{\tau_n}^2 + m_\delta^2 + m_c^2}, \quad (67)$$

где S_a — расстояние, проходимое световым импульсом в атмосфере; m_{τ_n} — погрешность задания временного интервала, изме-ряемого в светодальномере (при гарантировании соответствую-щих условий $m_{\tau_n} \approx 0,1\tau_n$); τ_n — длительность излучаемого светового импульса; m_c — погрешность центрирования.

Поскольку, как отмечалось выше, при использовании совре-менных методов и технологических средств можно обеспечить пренебрегаемо малое влияние погрешностей частоты генерато-ра временных калиброванных импульсов и пространственного ориентирования, т. е. выполнить условия

$$\left. \begin{aligned} S \frac{m_f}{f} &\leq 0,1m_S, \\ m_\delta &\leq 0,1m_S, \\ m_c &\leq 0,1m_S, \end{aligned} \right\} \quad (68)$$

а при измерении расстояний до ИСЗ, когда $S \gg S_a$, влияние погрешности определения группового показателя преломления атмосферы также пренебрегаемо мало:

$$S_a \frac{m_{n_{rp}}}{n_{rp}} \leq 0,1m_S, \quad (69)$$

то зависимость (67) существенно упрощается:

$$m_S = \frac{c}{2} \sqrt{m_{\tau_n}^2 + \left(\frac{m_{\Delta N}}{f}\right)^2}. \quad (70)$$

При этом, если обеспечивается достаточная энергия прини-маемого отраженного светового импульса, погрешность измере-ния не зависит от величины измеряемого расстояния.

Зная допустимую погрешность m_S однократного измере-ния расстояния импульсным светодальномером, а также пред-полагая, что влияние составляющих погрешностей примерно одинаково, можно определить допустимую погрешность задания временного интервала, измеряемого светодальномером, и допу-стимую погрешность определения дробной части периода гене-ратора временных калиброванных импульсов

$$m_{\tau_n} = \frac{\sqrt{2} m_S}{c}, \quad m_{\Delta_N} = \frac{\sqrt{2} m_S f}{c}. \quad (71); (72)$$

Когда выбраны методика и технические средства временного ориентирования, тогда известна погрешность задания временного интервала, выраженная в долях длительности τ_n светового импульса, излучаемого светодальномером. Следовательно, зависимость (71) может быть использована для определения допустимой длительности светового импульса.

Когда в качестве источника излучения импульсного светодальномера используют импульсный твердотельный лазер (на рубине или неодиме) с модулятором добротности, то выполнение условия (71) технических трудностей не представляет (длительность импульса может быть уменьшена до нескольких пикосекунд [34]). Следует отметить, что модуляция добротности исключает временную неоднородность составляющих импульсов излучения по сечению излучаемого пучка, так как формирует «усредненный» импульс малой длительности, но энергия кратковременного импульса лазерного излучения соответственно меньше энергии импульса лазерного излучения без модулятора добротности.

Выбрав заранее способ фиксирования измеренного импульсным светодальномером результата и, следовательно, зная погрешность m_{Δ_N} определения дробной части периода частоты f генератора калиброванных временных импульсов, можно по формуле (72) определить значение частоты генератора. При этом окончательное значение частоты генератора выбирают таким образом, чтобы период ее соответствовал стандартным интервалам времени $\left(\frac{1}{f} = 10^{-n} \text{с}, \text{ где } n — \text{целое положительное число}\right)$ или десятичному количеству метров.

§ 13. РАСЧЕТ НА ТОЧНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ

Современные фазовые геодезические светодальномеры, в которых источник излучения работает в импульсном режиме, называют импульсно-фазовыми или комбинированными. Например, такими источниками излучения являются импульсные газоразрядные лампы и импульсные лазеры, а также светодиоды и полупроводниковые лазеры, в которых для существенного повышения мощности излучаемого светового потока применяют внутреннюю импульсную модуляцию интенсивности. Для измерения времени, затрачиваемого светом на прохождение двойного измеряемого расстояния, косвенным фазовым способом, излучаемые световые импульсы модулируют непрерывным гармоническим сигналом с частотой f по поляризации или интенсивности.

Если разность фаз измеряется путем непосредственного сравнения фаз излучаемого и принимаемого модулированных световых потоков, длительность $\tau_{\text{и}}$ импульса излучения определяется выражением

$$\tau_{\text{и}} \geq 2t, \quad (73)$$

где $t = \frac{2S_{\text{max}}}{v}$ — время, затрачиваемое световым потоком на прохождение двойного максимального измеряемого расстояния.

Если же разность фаз измеряют путем сравнения фазы электрического модулирующего сигнала с фазой принимаемого модулированного светового потока, например при измерении разности фаз компенсационным способом, то достаточно, чтобы длительность импульса излучения была равна половине периода частоты модуляции [108], но для большей надежности и четкости целесообразно выполнять условие [36]

$$\tau_{\text{и}} \geq 5 \frac{1}{f}, \quad (74)$$

где $1/f$ — период частоты модуляции.

Период $T_{\text{и}}$ повторения импульсов излучения должен быть несколько меньше инерционности фазоизмерительного устройства при измерении разности фаз непосредственным способом или инерционности индикатора определенной разности фаз — при измерении разности фаз компенсационным способом.

Обычно период $T_{\text{и}}$ повторения импульсов излучения значительно больше длительности $\tau_{\text{и}}$ импульса излучения, поэтому для уменьшения общей потребляемой светодальномером электрической мощности часть радиотехнических блоков и узлов автоматически и синхронно отключают на время t_1 :

$$t_1 \leq T_{\text{и}} - 2\tau_{\text{и}} - t, \quad (75)$$

где t — время, затрачиваемое световым потоком на прохождение двойного максимального измеряемого расстояния.

Выбрав длительность импульсов излучения и период их повторения, продолжают расчет на точность комбинированного светодальномера так же, как выполняли расчет на точность фазового светодальномера (см. § 11).

Если же комбинированный светодальномер одновременно с точным измерением фазовым способом должен обеспечить предварительное грубое измерение расстояния импульсным способом, необходимое для определения числа целых фазовых циклов, погрешность измерения импульсным способом должна удовлетворять условию (37)

$$ms \leq 0,08 \frac{v}{f}, \quad (76)$$

где v — групповая скорость распространения света в атмосфере.

Особенности расчета на точность импульсных светодальномеров изложены в предыдущем параграфе.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА И СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА, ИЗЛУЧАЕМОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОМ

§ 14. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРАХ

Электромагнитные колебания оптического диапазона (световой поток) должны удовлетворять следующим требованиям: распространяться прямолинейно, с минимальными потерями и искажениями, скорость распространения должна быть известной с необходимой точностью.

Колебания оптического диапазона отличаются от радиоволн более высокой частотой (длина волны от 0,1 Å до 1 мм), что обеспечивает узкую диаграмму направленности излучения и значительно большую информационную емкость. Двойственность природы электромагнитного излучения оптического диапазона привела к тому, что при его рассмотрении используют две концепции: волновую, связанную с волновым представлением электромагнитного поля, и фотонную, связанную с фотонной природой излучения и квантовым характером взаимодействия потока излучения с приемником [15]. Кроме того, при расчете оптических систем часто используют еще более простую, чем волновая и квантовая, теорию, которая получила название геометрической оптики.

Линейно поляризованная монохроматическая электромагнитная волна оптического диапазона (рис. 19) может быть представлена системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} e_y &= E_{\max} \sin \omega_n \left(t - \frac{x}{u} \right), \\ h_z &= H_{\max} \sin \omega_n \left(t - \frac{x}{u} \right), \end{aligned} \right\} \quad (77)$$

где e_y , $E_{\max}$, h_z и $H_{\max}$ — мгновенные и амплитудные значения соответственно электрической и магнитной составляющих; t — текущее время; ω_n — частота несущих колебаний.

Причем всегда и везде магнитный вектор $\vec{H}$ перпендикулярен и пропорционален электрическому $\vec{E}$, а оба они перпендику-

лярны к вектору скорости $\vec{u}$ распространения колебаний, численное значение которой может быть определено из уравнения Максвелла

$$u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{n}, \quad (78)$$

где ϵ , μ — удельные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; c — скорость света в вакууме; $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ — оптический показатель преломления среды.

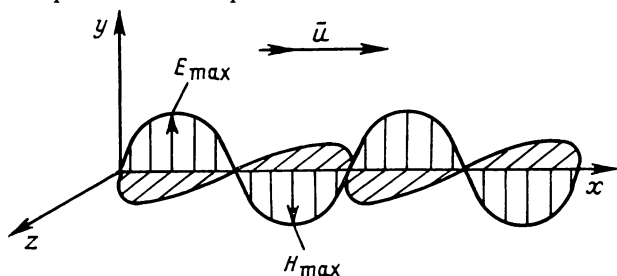


Рис. 9. Электромагнитная волна линейно поляризованного монохроматического света:

x , y , z — оси координат; u — вектор скорости распространения; $E_{\max}$, $H_{\max}$ — амплитудные значения электрической и магнитной составляющих

Монохроматические колебания — это колебания, амплитуда, частота и начальная фаза которых остаются неизменными бесконечно долго. Источников излучения строго монохроматических колебаний нет. Излучение лазеров по существу квазимонохроматическое, так как оно может быть монохроматическим в течение определенного интервала времени. В этом случае колебания являются монохроматическими в пределах цуга волн, длительность которого $t_{\text{ц}}$, или временная когерентность, может быть определена по формуле

$$t_{\text{ц}} \approx \frac{1}{\delta_f}, \quad (79)$$

где δ_f — ширина спектра колебаний.

Помимо временной когерентности, имеется термин пространственная когерентность, под которой понимается корреляция фаз монохроматического излучения от произвольно взятых точек протяженного источника. Например, излучаемый лазером, работающим в одномодовом режиме, световой поток имеет плоский фронт, т. е. фазы различных точек в сечении пучка одинаковы. Расстояние когерентности $S_{\text{ц}}$, в пределах которого будут сохраняться свойства монохроматичности, определится так:

$$S_{\text{ц}} = \frac{\lambda_{\text{ср}}^2}{\delta_\lambda} = \frac{c}{\delta_f}, \quad (80)$$

где $\lambda_{\text{ср}}$ — средняя длина волны излучаемого спектра; δ_λ — ширина спектрального диапазона; c — скорость света в вакууме.

Электромагнитное поле есть поле фотонное корпускулярное. Дискретность излучения света атомами была теоретически установлена М. Планком, затем А. Эйнштейн доказал, что свет не только излучается, но также распространяется дискретными порциями энергии. Согласно квантовой природе света, световой поток в некоторых опытах проявляет волновые свойства, в других — свойства частиц, или корпускулярные свойства. Такая частица названа фотоном, энергия которого (энергия кванта света)

$$\omega_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (81)$$

где $h = 6,6252 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; $\nu = 2\pi : \omega$ — циклическая частота излучения; $\lambda = c : \nu$ — длина волны излучения.

Фотонная структура электромагнитного поля обуславливает целый ряд новых свойств, например дискретность излучения, которые не описываются целиком максвелловской электромагнитной теорией света. Тем не менее, единство волновой и корпускулярной природы света является не внешним свойством электромагнитного поля, а органическим, отражающим внутреннее присущее ему свойство. Таким образом, при рассмотрении света в качестве несущих электромагнитных колебаний целесообразно представлять его как электромагнитное фотонное (корпускулярное) поле.

Как уже отмечалось, в современных светодальномерах, нашедших практическое применение при измерении расстояний более нескольких метров, применяют немонохроматические источники, излучающие в определенном спектральном диапазоне. Немонохроматический поток излучения следует рассматривать как совокупность большого числа несущих монохроматических колебаний с близкими частотами, в этом случае полный поток излучения $\Phi_{\phi, \text{н}}$, излучаемый источником, определяется по формуле

$$\Phi_{\phi, \text{н}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\phi}(\lambda) d\lambda, \quad (82)$$

где λ_1, λ_2 — длина волн несущих колебаний на границах спектрального диапазона излучения; $\Phi_{\phi}(\lambda)$ — поток излучения, излучаемый в единичном спектральном диапазоне и измеряемый в ваттах на единицу длины волны.

Для представления потока излучения в световых единицах формулу (82) следует преобразовать:

$$\Phi_{\text{н}} = 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\phi}(\lambda) S_{\text{r}}(\lambda) d\lambda, \quad (83)$$

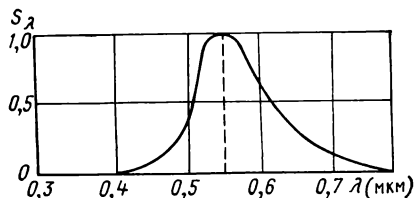
где 683 лм/Вт — коэффициент, соответствующий $S_{\text{r}}(\lambda) = 1$;

$S_{\lambda}(\lambda)$ — коэффициент относительной дневной видимости глаза (рис. 20).

Если число составляющих несущих колебаний (оптических лучей) настолько велико, что распределение без существенной погрешности можно считать непрерывным, полный световой

Рис. 20. График относительной спектральной видимости глаза наблюдателя днем:

S_{λ} — коэффициент относительной видимости, λ — длина световой волны



поток Φ , проходящий через элемент поверхности S в единицу времени, будет

$$\Phi = L\Omega S, \quad (84)$$

где L — яркость; Ω — телесный угол, образованный центральными оптическими лучами.

Спектральный диапазон используемого в геодезическом светодальнометре светового потока должен соответствовать «окнам» пропускания атмосферы и быть достаточно узким, чтобы гарантировать необходимую точность определения группового показателя преломления атмосферы и спектральную селекцию при приеме отраженного светового потока. Он зависит от спектральной характеристики источника излучения, в качестве которого применяют: лампы накаливания, люминесцентные газоразрядные источники излучения, лазеры и светодиоды. При рассмотрении источников излучения, помимо определения спектрального диапазона, обращается внимание на портативность, экономичность, эффективность, надежность работы в различных физико-географических условиях и при влиянии транспортных перегрузок, простоту конструкции и эксплуатации, срок службы, возможность осуществления внутренней модуляции.

Лампы накаливания, в которых под воздействием тепла происходит спонтанное, некогерентное излучение металлическим телом накала, и интегральная энергетическая светность которых, согласно закону Стефана — Больцмана, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры T тела накала, дают неравномерное распределение энергии в зависимости от длины волны (рис. 21). Можно, пользуясь законом Голицына—Вина, определять длину волны $\lambda_{\text{эф}}$, соответствующую максимальному значению спектральной плотности излучения $r_{(\lambda)\text{max}}$ и выраженную в микрометрах,

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{2898}{T}. \quad (85)$$

В последнее время для повышения яркости свечения ламп накаливания до $15 \cdot 10^6$ кд·м⁻², за счет увеличения цветовой температуры тела накала, колбу лампы, изготавливают из кварца и заполняют газообразным соединением галогена (йода, брома) [27]. Как видно из приведенных на рис. 21 зависимостей, почти вся энергия, излучаемая лампами накаливания, сосредоточена в видимой и ближней инфракрасной областях оптического диапазона.

Рис. 21. Графические зависимости спектральной плотности излучения от длины волны и температуры тела накала:

1 — лампа накаливания, цветовая температура вольфрама $T_{\text{цв}} = 2854\text{K}$; 2 — галогенная лампа накаливания, цветовая температура вольфрама $T_{\text{цв}} = 3400\text{K}$

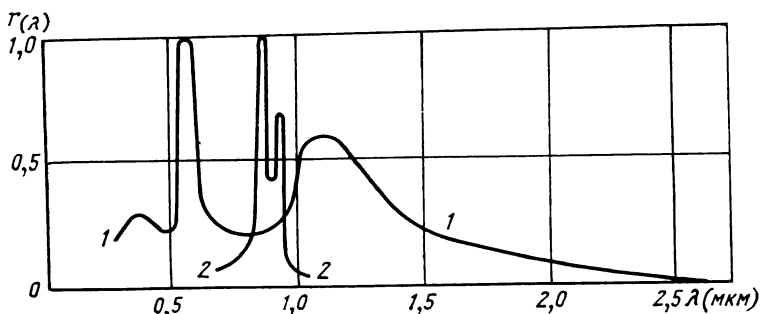
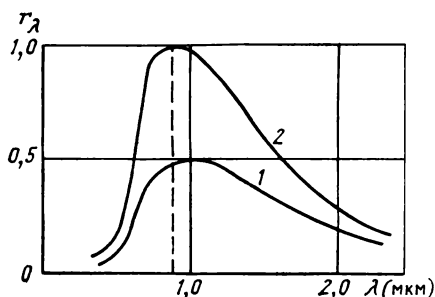


Рис. 22. Спектральные характеристики газоразрядных источников излучения:

1 — цезиевая лампа; 2 — ртутная лампа

Наряду с простотой конструкции и дешевой лампы накаливания обладают и недостатками: они имеют невысокую световую отдачу — отношение излучаемого светового потока к потребляемой мощности, малую яркость свечения, значительную инерционность и небольшой срок службы (порядка нескольких сотен часов).

Люминесцентные газоразрядные источники излучения, к которым можно отнести криптоновые, ксеноновые, ртутные и другие лампы, могут обеспечить непрерывное и кратковременное (до 1 мкс) импульсное излучение, но в более узком спектральном диапазоне, чем лампы накаливания (рис. 22) [61, 100]. Криптоновые и ксеноновые лампы имеют сплошной спектр из-

лучения с максимумом излучения от 0,76 до 1,00 мкм. Яркость излучения этих ламп достигает 10^9 кд·м⁻². Можно использовать цепи питания некоторых из них для осуществления непрерывной гармонической модуляции интенсивности излучения с частотой до 100 000 Гц. Основными недостатками газоразрядных источников излучения являются большие размеры и значительная потребляемая электрическая мощность, сложность включения и сравнительно небольшой срок службы.

Промежуточное положение между лампами накаливания и газоразрядными источниками излучения занимают электродосветовые лампы. Типичными электродосветовыми лампами являются дуговые аргоно-циркониевые лампы типа ДАЦ, в которых излучает капля циркония, расплавленного при помощи дугового электрического разряда. Размеры капли не превышают 1 мм, а яркость свечения не менее $3 \cdot 10^7$ кд·м⁻², спектральный состав излучения подобен спектру ламп накаливания с $\lambda_{эф} \approx 1$ мкм.

Лазеры, являющиеся источниками индуцированного излучения, обеспечивают высокую степень монохроматичности и когерентности излучения с малой расходимостью (до нескольких угловых минут), огромной спектральной плотностью и мощностью излучения (спектральная плотность достигает 10^{20} Вт·см⁻² мкм⁻¹, энергетическая яркость до 10^{12} кд·м⁻²) [3, 7, 9, 34, 48, 89, 99]. Первые лазеры появились сравнительно недавно. Благодаря бурному развитию квантовой электроники в настоящее время разработаны и серийно выпускаются различные по своим техническим характеристикам газовые, твердотельные, полупроводниковые и жидкостные лазеры, спектр излучения которых простирается от вакуумной ультрафиолетовой области до дальнего инфракрасного диапазона (от 1100 Å до 0,8 мм).

Неотъемлемой частью любого лазера является, помимо активного вещества, оптический резонатор, состоящий из двух обращенных друг к другу отражающих поверхностей. Оптический резонатор создает условия, при которых возникающее внутри лазера индуцированное излучение многократно проходит через активное вещество. Резонатор в значительной степени определяет основные свойства излучаемого потока: монохроматичность, направленность и мощность. Возбуждение активного вещества обычно называют накачкой, для осуществления этого процесса предусмотрены специальные системы.

Кроме перечисленных выше блоков и систем, иногда требуются дополнительные устройства, обеспечивающие работоспособность лазера или служащие для осуществления внутренней модуляции излучения. К ним можно отнести систему охлаждения активного вещества и элементов системы накачки, систему модуляции излучения, устройства для контроля и селекции типов колебаний.

Из-за специфических требований, предъявляемых к полевым приборам, при создании современных фазовых лазерных геодезических светодалномеров в качестве источников непрерывного излучения чаще всего используют атомарные гелий-неоновые ($\text{He}=\text{Ne}$) газовые лазеры, которые выгодно отличаются от других лазеров малым уровнем шумов, стабильностью частоты излучения и оси диаграммы направленности, простотой изготовления и эксплуатации (накачка осуществляется постоянным напряжением), большим ресурсом работы (до 5000 ч).

Возможно излучение гелий-неонового лазера на одной (или нескольких) из трех основных длин волн: 0,6328; 1,1530 и 3,3912 мкм (кроме этих волн лазер может излучать, но значительно слабее, и на волнах 0,5940; 0,6046; 0,6118 мкм и др.), наибольшая мощность излучения обеспечивается на длине волны 0,6328 мкм. Пульсации мощности излучения не превышают 10%, потребляемая электрическая мощность не более 100 Вт, диаметр излучаемого пучка не более 10 мм, а расходимость не более 15'. Гелий-неоновые лазеры удовлетворительно работают при изменении температуры окружающей среды от -40 до $+40^\circ\text{C}$ и при ударных нагрузках до 10 g.

Использование газового молекулярного лазера на углекислом газе (CO_2) с длиной волны излучения 10,6 мкм при создании фазового геодезического светодалномера, несмотря на ряд преимуществ (высокий КПД лазера, незначительные потери излучения в атмосфере), пока нецелесообразно [22] из-за технических трудностей, связанных с охлаждением фотоспротивления до температуры жидкого азота.

Другие газовые лазеры, например на ионизированном аргоне, криптоне и ксеноне, или слишком громоздки, или требуют жидкого охлаждения из-за значительной потребляемой электрической мощности, или излучают на волнах более 2 мкм, когда необходимы специальные приемники излучения, поэтому их также пока нецелесообразно применять в геодезических фазовых светодалномерах. Исключением является недавно созданный газовый лазер, в котором в качестве активной среды используется смесь гелия и паров кадмия ($\text{He}-\text{Cd}$), с длиной волны излучения 0,4416 мкм, однако этот лазер целесообразно использовать лишь в геодезических светодалномерах-рефрактометрах.

При разработке импульсных светодалномеров для спутниковой геодезии применяют твердотельные лазеры, в активную среду которых (рубин или стекло), являющуюся матрицей, вводят небольшое количество активных ионов или атомов (неодима, хрома и т. д.). Рубиновый лазер, легированный хромом, излучает на волне 0,6943 мкм, а стеклянный лазер, легированный неодимом, — на волне 1,06 мкм. Эти лазеры могут работать в режиме свободной импульсной генерации, при этом длительность импульса излучения не менее 0,2 мс и в режиме модули-

рованной добротности (или в режиме моноимпульса). Управлять добротностью лазера, т. е. модулировать интенсивность излучения, можно при помощи модулятора, помещенного между зеркалами оптического резонатора.

В качестве модуляторов добротности используют электрооптический модулятор Поккельса, ячейку Керра, просветляющие растворы, механические и другие модуляторы. Модулятор добротности, введенный непосредственно в оптический резонатор лазера, открывают незадолго до окончания импульса накачки (при этом энергия в кратковременном импульсе несколько уменьшается из-за потерь, вносимых модулятором, и насыщения). Следует помнить, что ширина диапазона частот модуляции ограничена величиной добротности резонатора. Твердотельные лазеры на рубине в режиме модулированной добротности создают импульсы с энергией излучения 0,20—1,0 Дж и длительностью от 4 до 40 нс, но еще большую энергию импульсного излучения обеспечивают лазеры на неодимовом стекле, благодаря возможности существенного увеличения размеров стеклянного стержня — активной среды [91].

Если использовать многокаскадные системы типа задающий генератор — усилитель, энергию излучения твердотельных лазеров в моноимпульсном режиме можно довести до 10 Дж.

Следует отметить, что в режиме синхронизации мод излучения твердотельных лазеров формируются импульсы с длительностью порядка 100 пс, частота f следования которых определяется длиной l оптического резонатора лазера,

$$f = \frac{c}{2l}, \quad (86)$$

где c — скорость света в вакууме.

Благодаря высокой теплопроводности твердотельные лазеры на алюмоиттриевом гранате, легированном неодимом ($\lambda = 1,06$ мкм), могут обеспечить, помимо импульсного, и непрерывное излучение. Одним из недостатков твердотельных лазеров является сравнительно сложная оптическая накачка при помощи газоразрядных ламп.

Полупроводниковые лазеры, в которых кристалл полупроводника (обычно арсенид галлия GaAs) является активной средой и возбуждается инжекцией тока через p — n переход либо пучком электронов, выгодно отличаются от других лазеров небольшими размерами и массой, возможностью осуществления внутренней модуляции интенсивности излучаемого потока и высоким КПД, достигающим 70 %. Однако из-за необходимости охлаждения лазера до температуры 77 и 4,2 К при работе в режиме непрерывного излучения полупроводниковые лазеры целесообразно использовать в импульсном режиме излучения, когда лазер может работать при комнатной температуре. Длина волны излучения в зависимости от микропримесей и режимов работы

изменяется от 0,82 до 0,92 мкм. При недостаточных для лазерного излучения плотностях тока накачки, которые должны быть не менее 1000 А/см^2 , излучение полупроводниковых лазеров является спонтанным. Для увеличения мощности излучаемого потока делают наборную решетку из нескольких синхронно действующих полупроводниковых лазеров.

Итак, подавляющее большинство лазеров, применяемых в настоящее время при создании светодиодномеров (исключение составляет газовый лазер на углекислом газе), обеспечивают излучение в видимой и ближней инфракрасных областях оптического диапазона.

Наиболее узкой шириной спектра излучаемых колебаний, достигающей сотых долей ангстрема и менее, обладают газовые лазеры, а наиболее широкой (до $0,5 \text{ \AA}$) — полупроводниковые лазеры. При этом наличие межмодовых биений (разностей частот соседних аксиальных мод) может привести к затруднениям при точном измерении разности фаз, если их значения близки к частоте модуляции.

Если расходимость излучения твердотельных и газовых лазеров незначительно превышает дифракционный предел и составляет примерно $10 \div 30'$, расходимость излучения полупроводниковых лазеров может достигать 30° и более (увеличение расходимости вызвано многомодовостью излучения, влиянием aberrаций и неоднородности активной среды).

Как уже отмечалось, при недостаточной плотности тока накачки излучение полупроводниковых лазеров становится спонтанным, т. е. лазер превращается в полупроводниковый излучатель рекомбинационного тока — инжекционный светодиод. Инжекционные светодиоды изготавливают из материалов, представляющих собой соединения III и V групп периодической системы элементов $A_{III}B_V$ [6, 35, 39, 77, 119]. Источником некогерентного спонтанного излучения, вызванного рекомбинацией носителей тока (электронов и дырок), является $p-n$ переход. При этом мерой инжекции является ток I_d , протекающий через диод, плотность которого должна быть не менее $10-100 \text{ А/см}^2$, коэффициент преобразования электрической энергии в излучение достигает 30%. Наиболее мощное излучение с энергетической яркостью L_s , достигающей $50 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{ср}$, с длиной волны $\lambda_{\text{эф}} \approx 0,875 \div 1,000 \text{ мкм}$ и шириной спектрального диапазона около $0,03 \text{ мкм}$ обеспечивают светодиоды из арсенида галлия (GaAs).

Незначительная инерционность инжекционных источников излучения (светодиодов и полупроводниковых лазеров), определяемая малым значением времени жизни неосновных носителей (электронов), которое не более 10 нс, а для лазеров, работающих в режиме стимулированного излучения, не превышает 0,4 нс, позволяет осуществить внутреннюю модуля-

цию излучения практически по линейному закону на частотах до 1 ГГц [92]. При этом глубина модуляции не менее 70% (рис. 23), а линейная зона яркостной характеристики от $L_{э \min}$ до $L_{э \max}$ определяется отношением

$$10 < \frac{L_{э \max}}{L_{э \min}} < 100. \quad (87)$$

Для уменьшения нелинейных искажений путем выбора начальной рабочей точки на середине линейной зоны яркостной характеристики, помимо переменного модулирующего тока, через светодиод протекает еще ток смещения. При разработке генератора модулирующего электрического сигнала следует учитывать, что активное сопротивление (активная составляющая импеданса) светодиодов может быть порядка 0,2÷3 Ом, диффузионная емкость 200 пФ, мощность, необходимая для осуществления модуляции, в зависимости от электрических характеристик светодиода колеблется от 10 до 200 мВт.

Необходимо отметить, что в светодиодах глубина модуляции в 2—3 раза меньше глубины модуляции тока, а в полупроводниковых лазерах глубина резко возрастает и соответствует току.

Ширина излучающей области $p-n$ перехода не более 0,3 мм, но неоднородность задержек излучения в различных точках активной области приводит к искажению пространственно-временной структуры (к фазовой неоднородности) модулированного излучаемого потока. Для зоны $p-n$ перехода, соответствующей максимуму излучения и ограниченной уровнем интенсивности 0,5, неоднородность задержек не превышает 40 пс, а для зоны, ограниченной уровнем интенсивности 0,7 относительно максимума, — 15—30 пс. Кроме того, неоднородность задержек значительно отличается у разных светодиодов и зависит от амплитуды модулирующего тока. При уменьшении амплитуды неоднородность уменьшается, а при форсированных режимах работы светодиода возрастает. Например, при частотах модуляции порядка 1 ГГц неоднородность задержек может привести к фазовой неоднородности модулированного потока 30—40° [119]. Размеры светодиода не превышают 6 мм, масса 3 г; светодиоду не страшны вибрации с амплитудой до 5g (частота 5—30 Гц) и ударные нагрузки до 35g; он сохраняет работоспособность при влажности, достигающей 95% (при $t+20^\circ\text{C}$), и при изменении

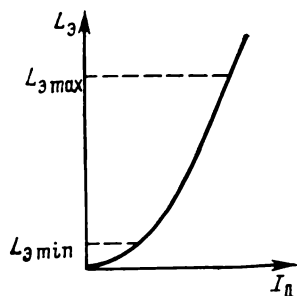


Рис. 23. Световая характеристика светодиода:

$L_{э}$ — яркость излучения; $I_{д}$ — ток, протекающий через светодиод

температуры окружающей среды от -60 до $+80^{\circ}\text{C}$, но при повышении температуры падает энергетическая яркость излучения (примерно $0,8\%$ на 1°C) и увеличивается длина волны излучения (примерно $0,06\%$ на 1°C).

Легкость осуществления внутренней модуляции излучения, портативность, долговечность (срок службы может быть доведен до $10\,000$ ч), надежность и стабильность обусловили применение светодиодов из арсенида галлия в качестве источников излучения при создании современных фазовых геодезических светодальномеров, предназначенных для измерения расстояний до $2-5$ км.

Основными недостатками светодиодов являются сравнительно малая мощность излучения, приходящаяся на единицу телесного угла, и значительная фазовая неоднородность модулированного излучения.

Итак, все источники излучения, применяемые в современных геодезических светодальномерах, обеспечивают излучение в видимой и ближней инфракрасной областях оптического диапазона. Сравнительный анализ источников излучения, применяемых в геодезических светодальномерах, показал, что наиболее перспективными из них являются источники, позволяющие осуществить внутреннюю модуляцию на частотах порядка 10 МГц и более (например, полупроводниковые лазеры и светодиоды), а также газовые и твердотельные лазеры, обеспечивающие мощное узконаправленное излучение в незначительном спектральном диапазоне.

§ 15. ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРАХ

В качестве приемников лучистой энергии геодезических светодальномеров могут быть глаз наблюдателя, фотоэмиссионные приемники и фотодиоды. Фоторезисторы из-за малой чувствительности и значительной инерционности пока не получили практического применения в светодальномерах. Также пока не применяют в светодальномерной практике приемники излучения, в которых перед детектированием осуществляется преобразование несущей частоты способом гетеродинирования, так как последнее сопряжено с рядом существенных технических трудностей [99].

Если визуальный светодальномер используется в дневных условиях, то максимальная чувствительность глаза наблюдателя соответствует $\lambda_{\text{эф}} \approx 0,56$ мкм, а спектральная чувствительность лежит в диапазоне от $0,38$ до $0,78$ мкм (см. рис. 20), в ночных условиях $\lambda_{\text{эф}} \approx 0,51$ мкм [5].

Если абсолютным порогом, вызывающим еще ощущение света при постоянной темнотной адаптации глаза, является пороговая освещенность в плоскости зрачка глаза, равная $2,44 \times$

$\times 10^{-9}$ лк, что соответствует световому потоку порядка 10^{-9} лм [109], то в дневных условиях значение пороговой освещенности может возрасти в 100 000 раз. Контрастная чувствительность глаза, или разностный порог светового раздражения при сравнении яркостей одинаковой цветности, зависит от величины яркости. Минимальная контрастная чувствительность $\sim 1,7\%$ наблюдается при яркостях от 60 до 12 000 кд·м⁻².

Глаз обеспечивает высокую избирательность, но визуальному восприятию свойственны субъективные погрешности и инерционность порядка 0,1 с.

Из фотоэмиссионных приемников при создании светодальномеров чаще всего используют фотоэлектронные умножители (ФЭУ) благодаря их высокой интегральной чувствительности, высокой контрастной чувствительности, практически линейной световой характеристике (от пороговых световых потоков вплоть до 10^{-4} лм), высокой пороговой чувствительности и резкому ослаблению влияния шумов нагрузочного сопротивления [8, 80, 105].

Пороговая чувствительность $\Phi_{\text{пор}}$ ФЭУ зависит от темнового тока $i_{\text{т}}$ (теплового шума), квантовых шумов и дробового эффекта

$$\Phi_{\text{пор}} = \sqrt{\frac{2qi_{\text{т}}(1+B)}{RcS_iS_{i\phi}}}, \quad (88)$$

где q — заряд электрона ($q \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); B — коэффициент, зависящий от дробового эффекта; $1,5 < (1+B) < 3$; R и c — входная нагрузка ФЭУ и емкость входной цепи соответственно, определяющие ширину Δ_f полосы пропускания цепи включения ФЭУ ($\Delta_f \approx \frac{1}{2Rc}$, единичная полоса пропускания $\Delta_f = 1$ Гц); $i_{\text{т}}$, S_i — темновой ток и интегральная чувствительность ФЭУ соответственно; $S_{i\phi}$ — интегральная чувствительность фотокатода.

Спектральная плотность шумов ФЭУ имеет спад, начиная с 3 кГц.

При приеме светового потока, излучаемого лазером, следует вместо $\Phi_{\text{пор}}$ учитывать монохроматический пороговый световой поток $\Phi_{\lambda \text{ пор}}$

$$\Phi_{\lambda \text{ пор}} = \Phi_{\text{пор}} \frac{K}{S(\lambda)}, \quad (89)$$

где K — коэффициент использования ФЭУ светового потока от эталонного излучателя; $S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность ФЭУ.

Иногда, например при выполнении светоэнергетического расчета импульсного лазерного светодальномера, необходимо знать квантовую пороговую чувствительность. Поскольку монохроматический пороговый световой поток $\Phi_{\lambda \text{ пор}}$ и соответ-

вующее ему количество $N_{\lambda \text{ пор}}$ квантов излучения связаны между собой равенством [80]

$$N_{\lambda \text{ пор}} = \frac{\Phi_{\lambda \text{ пор}}}{hc} \lambda \Delta t, \quad (90)$$

где $h = 6,6252 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме; λ — длина волны монохроматического излучения; Δt — интервал времени, в течение которого воздействует на фотокатод монохроматический свет, то, подставив значения постоянных h и c , получим выражение, определяющее квантовую пороговую чувствительность,

$$N_{\lambda \text{ пор}} = 5,03 \cdot 10^{14} \Phi_{\lambda \text{ пор}} \lambda \Delta t. \quad (91)$$

В случае значительного светового потока $\Phi_{\text{ф}}$ от фона, когда $\Phi_{\text{ф}} \gg \Phi_{\text{пор}}$, при определении приведенного к этим условиям значения порогового светового потока $\Phi'_{\text{пор}}$ необходимо учитывать влияние соответствующих флуктуаций фототока $i_{\text{ф}}$ [80]

$$\Phi'_{\text{пор}} = \frac{\Phi_{\text{пор}}}{\sqrt{i_{\text{т}}}} \sqrt{i_{\text{т}} + i_{\text{ф}}} = \Phi_{\text{пор}} \sqrt{1 + \frac{\Phi_{\text{ф}} S_i}{i_{\text{т}}}}. \quad (92)$$

Аналогичным образом можно найти, используя формулы (89) и (91), значения монохроматического порогового светового потока и квантовой пороговой чувствительности при сильных фоновых световых потоках.

Когда же, помимо значительного светового потока от фона, на фотокатод ФЭУ поступает мощный световой поток $\Phi_{\text{п}}$, несущий измерительную информацию, приведенное к этим условиям значение порогового светового потока $\Phi'_{\text{пор}}$ будет

$$\Phi'_{\text{пор}} = \Phi_{\text{пор}} \sqrt{1 + \frac{(\Phi_{\text{ф}} + \Phi_{\text{п}}) S_i}{i_{\text{т}}}}. \quad (93)$$

Контрастная чувствительность $K_{\text{к}}$, или чувствительность ФЭУ к относительному изменению интенсивности принимаемого светового потока, может быть представлена следующим образом:

$$K_{\text{к}} = \frac{\Phi'_{\text{пор}}}{\Phi_{\text{ф}} + \Phi_{\text{п}}}, \quad (94)$$

эта формула справедлива при условии

$$\Phi_{\text{ф}} + \Phi_{\text{п}} < \Phi_{\text{max}}, \quad (95)$$

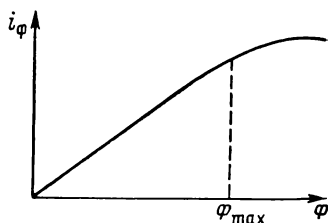
где Φ_{max} — световой поток, соответствующий верхней границе линейного участка световой характеристики ФЭУ (рис. 24). Минимальное значение контрастной чувствительности $K_{\text{к min}}$ можно реализовать при суммарном световом потоке $\Phi_{\text{ф}} + \Phi_{\text{п}} = \Phi_{\text{max}}$

$$K_{\text{к min}} = \frac{\Phi'_{\text{пор}}}{\Phi_{\text{max}}}. \quad (96)$$

Поскольку пороговая чувствительность $\Phi_{\text{пор}}$, интегральная чувствительность S_i и темновой ток i_T известны заранее, значение светового потока $\Phi_{\text{п}}$, необходимого для реализации заданной или выбранной контрастной чувствительности K_K в условиях сильных фоновых световых потоков, с учетом формул (93) и (94) будет

Рис. 24. Световая характеристика фотоэлектронного умножителя:

Φ — суммарный принимаемый световой поток;
 i_{Φ} — фототок; Φ_{max} — максимальный световой поток, определяющий верхнюю границу линейного участка световой характеристики



$$\Phi_{\text{п}} = \frac{1}{2K_K^2} \left[\left(\Phi_{\text{пор}}^2 \frac{S_i}{i_T} - 2K_K^2 \Phi_{\Phi} \right) \pm \sqrt{\left(\Phi_{\text{пор}}^2 \frac{S_i}{i_T} - 2K_K^2 \Phi_{\Phi} \right)^2 + 4K_K^2 \left(-K_K^2 \Phi_{\Phi}^2 + \Phi_{\text{пор}}^2 + \Phi_{\Phi}^2 \Phi_{\text{пор}}^2 \frac{S_i}{i_T} \right)} \right] \quad (97)$$

В ночных условиях при использовании лазерного излучателя и спектральной селекции отраженного светового потока при помощи узкополосных интерференционных светофильтров, фоновый световой поток ничтожно мал и его можно не учитывать при выполнении светоэнергетических расчетов. При практическом отсутствии фоновых световых потоков и мощном световом потоке $\Phi_{\text{п}}$, несущем измерительную информацию, необходимо при определении приведенного к этим условиям значения порогового светового потока $\Phi'_{\text{пор}}$ учитывать доминирующее влияние флуктуаций фототока $i_{\text{п}} = S_i \Phi_{\text{п}}$, следовательно,

$$\Phi'_{\text{пор}} = \Phi_{\text{пор}} \sqrt{1 + \frac{\Phi_{\text{п}} S_i}{i_T}} \quad (98)$$

Применив формулы (98) и (94), можно определить значение светового потока $\Phi_{\text{п}}$, необходимого для реализации заданной или выбранной контрастной чувствительности приемника излучения (ФЭУ) (при $\Phi_{\Phi} \approx 0$):

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{\Phi_{\text{пор}}^2 \left[\frac{S_i}{i_T} \pm \sqrt{\left(\frac{S_i}{i_T} \right)^2 + \frac{4K_K^2}{\Phi_{\text{пор}}^2}} \right]}{2K_K^2} \quad (99)$$

Иногда при выполнении светоэнергетического расчета светодальномерного комплекта необходимо знать отношение сигнал/шум, которое определяют следующим образом.

Если принять во внимание все источники шумов, за исключением теплового шума нагрузки R , то, учитывая формулы

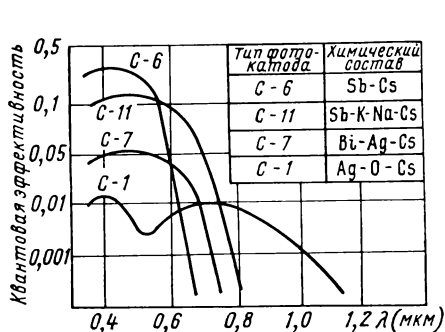


Рис. 25. Спектральные характеристики некоторых типов фотокатодов

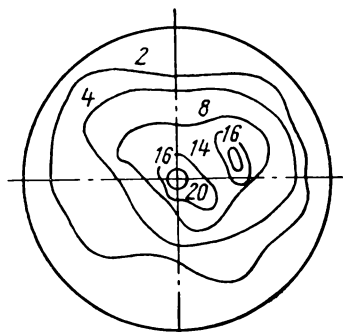


Рис. 26. Диаграмма относительной интегральной чувствительности фотокатода ФЭУ-27 (диаметр фотокатода 25 мм)

(88) и (92), отношение сигнал/шум можно записать в следующем виде:

$$\frac{c}{ш} \approx \frac{i_n^2}{2q\Delta_f(i_T + i_n + i_\Phi)} = \frac{S_i^2 \Phi_n^2}{2q\Delta_f[i_T + S_i(\Phi_n + \Phi_\Phi)]}. \quad (100)$$

В геодезических светодальномерах для обеспечения необходимой надежности целесообразно, как показала практика, выполнить условие

$$\frac{c}{ш} \geq 10. \quad (101)$$

Диапазон спектральной чувствительности ФЭУ 0,25—1,1 мкм (рис. 25), его определяют выбором материала, из которого изготавливается фотокатод, и спектральным пропусканием входного окна. Различные участки фотокатода обладают далеко не одинаковой чувствительностью. Путем соответствующего уменьшения размеров облученной площадки на фотокатode ФЭУ и выбора ее местоположения можно существенно повысить чувствительность фотокатода (рис. 26), при этом пропорционально уменьшению диаметра облученной площадки фотокатода будет уменьшаться пороговая чувствительность ФЭУ [8].

Фотоэлектронные умножители обладают ничтожно малой, по сравнению с глазом наблюдателя, инерционностью. Обычно за постоянную времени ФЭУ принимают интервал времени τ , в течение которого фототок на выходе ФЭУ достигает 63% от

максимального значения (за интервал времени, равный 3τ , фототок достигает 95 %). Воздействует на ФЭУ ступенчатый световой поток, интенсивность которого мгновенно изменяется от нулевого до максимального значения. Иногда используют и другие параметры, характеризующие временную разрешающую способность ФЭУ. Например, из-за неизохронности траекторий фото- и вторичных электронов возможны неадекватность формы электрических выходных импульсов форме световых импульсов на входе и погрешность определения времени между двумя световыми импульсами. Для уменьшения дисперсии времени пролета электронов стремятся, прежде всего, уменьшить время задержки сигнала, которое в обычных ФЭУ близко к 30 нс [8].

Учитывая постоянную времени τ , можно представить импульсную характеристику $S_{\text{и}}(t)$ ФЭУ (реакцию его на единичный световой импульс) следующим образом [80]:

$$S_{\text{и}}(t) = \frac{S_i}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (102)$$

где S_i — статическая интегральная чувствительность ФЭУ; e — основание натуральных логарифмов; t — текущее время. А в случае приема светового потока, интенсивность которого гармонически модулирована с частотой ω , интегральная чувствительность S_{ω} ФЭУ будет зависеть от частоты модуляции

$$S_{\omega} = \frac{S_i}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}. \quad (103)$$

Постоянная времени большинства ФЭУ не более 10^{-9} — 10^{-8} с, следовательно, влияние инерционности ФЭУ будет ничтожно мало при частотах модуляции не более 100 МГц. Именно это позволяет одновременно с приемом светового потока осуществлять и высокочастотную демодуляцию, глубина демодуляции $M_{\text{д}} \approx 90\%$, причем практически отсутствуют нелинейные искажения (при дальнейшем увеличении частоты глубина демодуляции резко уменьшается и возрастут нелинейные искажения).

Преобразование частоты модуляции способом гетеродинирования несколько повышает чувствительность ФЭУ. Для этого на ФЭУ, помимо принимаемого потока излучения, подается электрический сигнал от гетеродинного генератора (можно подавать и еще один поток излучения, модулированный с частотой гетеродинного генератора). Использование гетеродинирования частот непосредственно в ФЭУ позволяет осуществить в нем демодуляцию уже на частотах до 1000 МГц и уменьшает влияние временных задержек в ФЭУ (так как фазовые погрешности пропорциональны частоте).

Для демодуляции и гетеродинирования частот непосредственно в ФЭУ необходимо управлять электронным потоком ли-

бо с использованием динодов, либо при помощи специальных модулирующих электродов внутри колбы ФЭУ, либо при помощи магнитов. Существуют и другие способы управления электронными потоками. Наиболее перспективным является способ управления при помощи внешнего электромагнитного поля. Например, введение внешнего модулирующего электрода в виде кольца, накладываемого на торец ФЭУ-28 (ФЭУ-51,

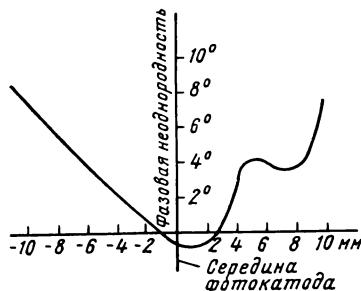


Рис. 27. Фазовое поле фотокатода ФЭУ, используемого в качестве демодулятора на частоте 15 МГц [121]

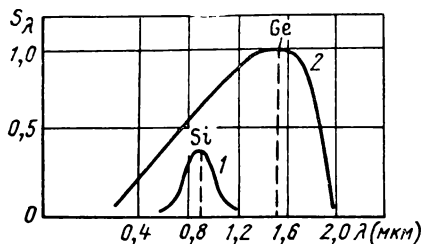


Рис. 28. Спектральные характеристики фотодиодов:
1 — кремниевый; 2 — германиевый

ФЭУ-68), и магнитной статической коррекции на участке фотокатод — первый динод позволяет осуществить непосредственно в ФЭУ демодуляцию или гетеродинирование частоты. Введение же двух модулирующих электродов позволяет использовать одновременно ФЭУ и в качестве демодулятора и смесителя [24, 86, 121]. Для обеспечения минимальных нелинейных искажений и фазовой однородности в пределах фотокатода ФЭУ (рис. 27, [121]) подбирают оптимальное модулирующее напряжение, вводят корректирующие магнитные элементы, делают стабильным положение оси принимаемого потока относительно фотокатода, ограничивают поперечные размеры светового потока, попадающего на фотокатод.

Как уже отмечалось, частотные ограничения для ФЭУ определяются двумя факторами: временной задержкой между входным и выходным сигналами и разбросом времени пролета электронов. Временная задержка — это время пролета электронов через ФЭУ, а временная дисперсия — это влияние разброса начальных скоростей эмитируемых электронов и разности длин их траекторий. В настоящее время создано несколько типов быстродействующих ФЭУ, например ФЭУ со скрещенными магнитными полями, устраняющими разброс длин траекторий пролета электронов, работают на частотах до 4 ГГц или ФЭУ, в которых для улучшения временного разрешения умножительные системы на ковшеобразных динодах имеют дополнительные ускоряющие электроды [6].

К основным недостаткам ФЭУ относятся сравнительно большие габариты, высокое напряжение питания, разрушение эмиттеров при облучении значительными световыми потоками, сильная зависимость выходного фототока от изменений питающего напряжения.

Фотодиоды — фотоэлектрические полупроводниковые приборы, принцип действия которых основан на использовании фотогальванического эффекта на $p-n$ переходе, имеют малые габариты, не боятся сильных засветок. В настоящее время широкое распространение получили фотодиоды двух типов: кремневые и германиевые, первые имеют максимальную чувствительность при $\lambda_{эф} = 0,85$ мкм, вторые — при $\lambda_{эф} = 1,55$ мкм (рис. 28).

Интегральная чувствительность кремневых фотодиодов достигает $5 \text{ А} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ($9 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}$), а германиевых — $10 \text{ А} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ($25 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}$). Темновые токи фотодиодов обычно не превышают нескольких микроампер (у германиевых фотодиодов величина темнового тока при изменении температуры от 20 до 50° С может меняться в 5 раз), а у специальных кремневых фотодиодов темновой ток может быть порядка 10^{-9} А. В настоящее время созданы кремневые фотодиоды, незначительно уступающие по пороговой чувствительности ФЭУ, особенно в ближнем инфракрасном диапазоне, где квантовая эффективность фотокатодов очень низка.

Величина постоянной времени фотодиода зависит от размеров чувствительной площадки и способов изготовления; обычно она порядка 10^{-6} с, а в специальных фотодиодах, у которых размер чувствительной площадки не более $0,1 \text{ мм}^2$, может быть уменьшена до 10^{-8} с [80]. Быстродействие фотодиодов зависит не только от размеров чувствительной площадки (от емкости $p-n$ перехода), но и от длины волн.

Для повышения чувствительности вместо обычных фотодиодов иногда применяют полупроводниковые лавинные фотодиоды, полоса усиления которых может достигать 10 ГГц, а коэффициент внутреннего усиления при работе в лавинном режиме может быть равен 100 [8].

К приемникам лучистой энергии рассматриваемого типа относятся и фототранзисторы, которые в отличие от фотодиода имеют два и более $p-n$ перехода. Они сочетают свойства фотодиода и усилительные свойства транзистора, что приводит к существенному увеличению интегральной чувствительности и в то же время к ухудшению пороговой чувствительности и увеличению постоянной времени. Пока отмеченные недостатки не будут устранены, для приема потоков излучения в геодезических светодальномерах целесообразно использовать фотодиоды с малошумящим каскадом усиления, а не фототранзистор.

Для наиболее эффективного использования излучаемого светодальномером светового потока необходимо согласовывать

спектральные характеристики источника излучения и приемника. В качестве примера правильного и неправильного сочетания источника излучения с приемником рассмотрим сочетание светодиода с кремниевым и германиевым фотодиодами, в первом случае корреляционный коэффициент будет равен 0,9, а во втором — 0,51.

Анализ и исследование приемников излучения, применяемых в геодезических светодальномерах, убедительно свидетельствуют, что наиболее перспективными являются фотоэлектрические приемники: фотоэлектронные умножители и фотодиоды, обладающие широкой спектральной чувствительностью, повышенной пороговой и контрастной чувствительностями и незначительной инерционностью. Они позволяют производить непосредственно в приемнике излучения демодуляцию принимаемого светового потока и преобразование частоты модуляции потока способом гетеродинирования. При этом для гарантирования функциональной и точностной стабильности светодальномера необходимо обеспечить постоянство размеров, освещенности и положения облученного участка чувствительной зоны фотоэлектрического приемника излучения.

§ 16. АТМОСФЕРА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Расстояние между источником излучения и приемником световой поток проходит в приземном слое атмосферы — тропосфере. Высота тропосферы над поверхностью Земли в зависимости от широты местности лежит в пределах от 10 до 17 км.

Тропосфера представляет собой смесь газов, водяного пара и мельчайших взвешенных частиц — аэрозолей. При прохождении через нее светового потока Φ из-за молекулярного поглощения в газах и рассеяния молекулами и аэрозолями происходит ослабление светового потока, которое для оптически однородной среды может быть представлено экспоненциальным законом Бугера [19, 25, 56, 96, 117, 118, 122]:

$$\Phi_{2S} = \Phi e^{-\alpha 2S} = \Phi \tau_a^{2S}, \quad (104)$$

где Φ_{2S} — световой поток, прошедший двойное измеряемое расстояние S ; α — показатель ослабления; τ_a — коэффициент пропускания.

Коэффициент пропускания может быть представлен в виде произведения

$$\tau_a = \tau_n \tau_p, \quad (105)$$

где τ_n — коэффициент пропускания, определяемый поглощением; τ_p — коэффициент пропускания, определяемый рассеянием.

Молекулярное поглощение в видимой и ближней инфракрасной областях оптического диапазона вызвано в основном молекулами воды и углекислого газа. Не рассматривая феноменологическую теорию процесса молекулярного поглощения [28, 41, 42], отметим «окна» в приземном слое атмосферы для видимой и ближней инфракрасной областей оптического диапазона: 0,40—0,78; 0,80—0,92; 0,98—1,05; 1,17—1,32; 1,46—1,72 мкм (рис. 29).

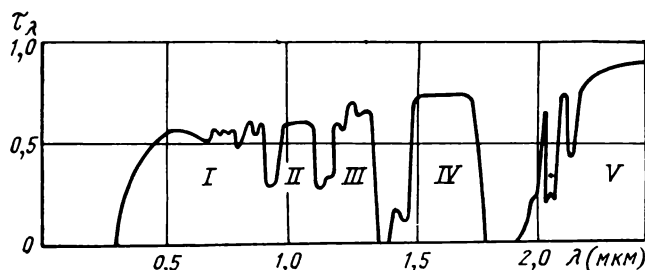


Рис. 29. Относительная спектральная прозрачность атмосферы в видимой и ближней инфракрасной областях оптического диапазона. (Римскими цифрами обозначены «окна» — полосы пропускания)

При использовании в качестве источника излучения лазеров, ширина спектрального диапазона излучения которых значительно меньше ширины приведенных окон прозрачности, необходимо учитывать более тонкую структуру спектра поглощения атмосферы [41, 42].

Среднеинтегральное значение $\tau_{a \text{ ср}}$ коэффициента пропускания для какого-либо спектрального диапазона от λ_1 до λ_2 можно определить по формуле

$$\tau_{a \text{ ср}} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_a(\lambda) d\lambda. \quad (106)$$

Молекулярным рассеянием в инфракрасной области оптического диапазона можно практически пренебречь, но в видимой области его следует учитывать, например при $\lambda_{\text{эф}} = 0,556$ мкм коэффициент пропускания из-за молекулярного рассеяния $\tau_p \approx 0,89$.

Потери на рассеяние аэрозолями не зависят от длины волны излучения, когда размеры частиц (капли дождя, кристаллики снега и льда, частицы пыли и дыма) больше длины волны. В случае легкого тумана или дымки, когда размеры частиц менее 1 мкм, потери для инфракрасного излучения будут незначительны.

Примерное значение коэффициента пропускания τ_a (для атмосферной толщи в 1 км) в полевых условиях можно определить, исходя из условий визуальной видимости (табл. 7) [28].

ТАБЛИЦА 7

Видимость	Коэффициент τ_a пропускания для $\lambda_{эф} = 0,556$ мкм	Расстояние визуальной видимости, км
Идеальная	0,99	150—270
Хорошая	0,92	50
Удовлетворительная	0,82	20

Коэффициент пропускания атмосферы зависит от длины волны излучения. Для газового лазера на He—Ne ($\lambda_{эф} = 0,6328$ мкм) и для светодиода ($\lambda_{эф} \simeq 0,9$ мкм) он будет соответственно в 1,01 и 1,07 раза больше, чем для $\lambda_{эф} = 0,556$ мкм. Например, для условий удовлетворительной видимости коэффициент пропускания атмосферы для излучений лазера и светодиода будет соответственно равен 0,83 и 0,89.

При проектировании светодальномера, работающего в дневное время, обычно принимают видимость удовлетворительной. По результатам десятилетних наблюдений в условиях Подмосковья удовлетворительная визуальная видимость и выше составила около 50%, дождь, снег и туман составили $\sim 9\%$, остальное время была дымка, при которой видимость была несколько ниже удовлетворительной [28]. Следует отметить, что видимость ночью несколько выше, чем днем.

При прохождении потока через атмосферу происходит не только ослабление, но и искажение его, которое носит аддитивный и мультипликативный характер. К аддитивной помехе следует прежде всего отнести лучистый поток от фона (облаков, неба, леса и т. д.). Наиболее яркими источниками фоновой лучистой энергии являются облака и небо в дневное время суток, яркость которых примерно на 5 порядков меньше яркости солнца и зависит от времени года и суток, от высоты и географических координат места, от местных условий и т. д. (еще более ярким источником фонового излучения может быть свежеснеженный снег, освещенный солнцем). Примерные значения яркости свечения неба и облаков приведены в табл. 8 [33].

Спектральный состав излучения дневных облаков и неба для $\lambda < 3$ мкм определяется главным образом рассеянным излучением солнца, но несколько отличается от спектральной характеристики солнечного излучения (рис. 30) [99]. При использовании узкополосных интерференционных светофильтров (или дихроичных зеркал), спектральный диапазон пропускания которых соответствует спектральному диапазону излучения лазера

или светодиода, влияние фона будет существенно ослаблено. При этом спектральная плотность энергетической яркости полуденного неба с легкими облаками для $\lambda_{эф} = 0,6328$ мкм будет

$$R_{\lambda\phi} \approx 0,65 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{\AA}}, \quad (107)$$

а для $\lambda_{эф} \approx 0,91$ мкм

$$R_{\lambda\phi} \approx 1,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{\AA}}. \quad (108)$$

ТАБЛИЦА 8

Условия	Яркость свечения неба
В полдень, небо, покрытое светлыми облаками	10^4 кд·м ⁻²
В полдень, безоблачное небо	$4 \cdot 10^3$ кд·м ⁻²
Днем в пасмурную погоду	10^3 кд·м ⁻²
Ночью, без луны	10^{-4} кд·м ⁻²

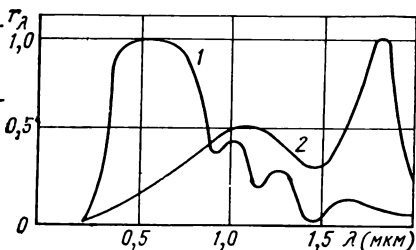


Рис. 30. Относительные спектральные характеристики фонового излучения: 1 — излучение солнца вблизи поверхности земли; 2 — излучение полуденного неба, обусловленное отражением от облаков [99]

Другим источником аддитивной помехи может быть фон, создаваемый излучаемым световым потоком (рассеянный назад световой поток). Этот фон возникает в результате ослабления излучения, вызванного рассеянием аэрозольных частиц. Для подавляющего большинства геодезических светодальномеров, когда максимальное измеряемое расстояние не превышает 50 км, а коэффициент пропускания атмосферы не менее 0,82, яркость этого фона не превышает 10^{-4} от яркости излучаемого светового сигнала и ввиду малости может не приниматься во внимание [115].

Причиной мультипликативных искажений излучаемого светового потока является турбулентция атмосферы, которая приводит к маломасштабным интерференционным явлениям в пределах поперечного сечения потока (сцинтилляции потока) [17, 41, 42]. Это выразится в ослаблении интенсивности светового потока, в низкочастотном модулировании его, называемом мерцанием. Подробно эти вопросы исследованы на примере мерцания изображений звезд. Перераспределение интенсивности в пределах сечения светового потока носит случайный характер, период частоты мерцаний может быть от нескольких миллисекунд до нескольких секунд. Максимальные амплитуды

имеют мерцания, частота которых не превышает 10 Гц. Также из-за турбуленции происходит дополнительное угловое расширение узконаправленного излучаемого пучка лучей до $6-30''$, угловые амплитуды мгновенных колебаний центра пучка достигают $3''$, а суточное блуждание — $6-30''$ [17]. Быстрые изменения траектории пучка лучей являются следствием нормальной или случайной рефракции, а устойчивые искривления траектории — следствием аномальной рефракции.

При теоретическом рассмотрении влияния турбуленции на распространение оптического сигнала используют так называемую пространственную функцию, введенную А. Н. Колмогоровым, которая для однородной локально-изотропной турбуленции может быть представлена так [103]:

$$D_{\pi}(r) = C_{\pi}^2 r^{\frac{2}{3}}, \quad (109)$$

где $C_{\pi} \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1/3}$ — метеорологический параметр; $l_0 < r < L_0$; $l_0 \approx (1 \div 2) \text{ мм}$ — внутренний масштаб турбуленции, соответствующий минимальному размеру неоднородностей атмосферы; $L_0 \approx (5 \div 10) \text{ мм}$ — внешний масштаб турбуленции, соответствующий максимальному размеру неоднородностей.

За количественную меру флуктуаций интенсивности светового потока, вызванных турбуленцией атмосферы, принимают величину

$$\sigma_0^2 = 1,23 C_{\pi}^2 K^{\frac{7}{6}} (2S)^{\frac{11}{6}}, \quad (110)$$

где $K = 2\pi : \lambda$ — волновое число; S — измеряемое расстояние.

Расширение Δ_D , вследствие турбуленции диаметра пучка лучей, выраженное в сантиметрах, может быть определено по эмпирической формуле

$$\Delta_D = 9 \cdot 10^{-6} S^{1.2}, \quad (111)$$

где S — измеряемое расстояние, выраженное в метрах.

Влияние турбуленции особенно велико при измерении значительных расстояний. Временные характеристики турбуленции позволяют правильно выбрать программу и методику измерений, оптимальное количество приемов, оптимальную длительность программы измерений и т. д. Например, минимальная длительность программы измерений определяется следующим образом:

$$T_{\min} \geq 2NT_0, \quad (112)$$

где N — число приемов в программе; T_0 — интервал времени между двумя соседними определениями метеорологических фактов (например, при определении температуры $T_0 \geq 2 \text{ мин}$).

Следует отметить, что в современных геодезических свето-

дальномерах с автоматизированным процессом измерения времени, затрачиваемое на одно измерение, может быть не более нескольких секунд (в это время выполняются следующие операции: внутренняя калибровка, предварительное измерение расстояния для определения числа целых фазовых циклов, точное измерение с введением известных поправок). Если время, затрачиваемое на измерение расстояния светодальномером, не превышает 5 мин, метеорологические условия определяют дважды: до измерений и после.

Рассмотрение процесса прохождения светового потока в атмосфере позволяет сделать вывод, что, помимо ослабления, вызванного поглощением и рассеянием, из-за влияния турбулентности и случайной рефракции происходят модулирование, ослабление, расширение и изменение направления распространения светового потока. Все это необходимо учитывать при выполнении энергетического расчета, при определении частоты парафазно-балансного способа индикации определенной разности фаз, при определении минимальной допустимой расходимости излучаемого модулированного светового потока и диаметра входного зрачка светодальномера.

При теоретическом рассмотрении влияния турбулентности на распространение электромагнитных колебаний оптического диапазона целесообразно использовать пространственную функцию, введенную А. Н. Колмогоровым. Временные характеристики турбулентности позволяют правильно выбрать программу и методику светодальномерных измерений.

§ 17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РАССТОЯНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОМ

В связи с тем что оптическая плотность атмосферы неодинакова, траектория распространения светового потока будет несколько искривлена. Радиус кривизны траектории

$$\rho = \frac{R}{K}, \quad (113)$$

где $R \approx 6378$ км — радиус Земли; K — коэффициент вертикальной рефракции (для средней полосы Советского Союза $K \approx 0,1-0,2$). Погрешность из-за непрямолинейного распространения светового потока будет незначительной, например, при измерении расстояний порядка 30 км она не превышает нескольких миллиметров. Следовательно, световой поток распространяется практически прямолинейно, поэтому предельная величина измеряемого расстояния $S_{\text{п}}$, определяемая из условия

видимости между светодальномером и отражателем, для равнинной местности будет

$$S_{\pi} \approx 3,6 (\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}), \quad (114)$$

где H_1 и H_2 — высоты, выраженные в метрах, светодальномера и отражателя.

Скорость распространения светового потока в атмосфере зависит от длины волны, температуры, давления и влажности. Коэффициентом, учитывающим влияние перечисленных факторов на скорость распространения света, является показатель преломления атмосферы. Например, скорость U распространения монохроматического светового потока, или фазовая скорость, так как она является скоростью распространения поверхности одинаковых фаз, будет

$$U = \frac{c}{n}, \quad (115)$$

где c — скорость света в вакууме; n — показатель преломления атмосферы (воздуха).

Скорость света в вакууме, являющаяся одной из фундаментальных физических постоянных, определялась много раз самыми различными способами. Наиболее точное определение было выполнено в 1972 г. американскими учеными [20, 53, 113, 129]. На XVI Генеральной ассамблее Международного геодезического и географического союза в 1975 г. в Гренобле было принято следующее значение скорости света в вакууме:

$$c = 299\,792\,458 \pm 1,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (116)$$

При этом отмечалось, что погрешность рекомендованного значения не превышает $4 \cdot 10^{-9}$.

Показатель преломления воздуха определяется по формуле Эдлена

$$n = 1 + A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (117)$$

где $A = 2876,04 \cdot 10^{-7}$; $B = 16,288 \cdot 10^{-7}$; $C = 0,136 \cdot 10^{-7}$ — постоянные дисперсионные коэффициенты, определенные Сирсом и Барреллом для сухого воздуха при температуре 0°C , давлении $101\,324,72 \text{ Па}$ и содержании $\text{CO}_2 \sim 0,03\%$.

Суммарная погрешность формулы Эдлена не превышает 10^{-7} .

Как уже отмечалось, используемые в современных геодезических светодальномерах модулированные световые потоки не являются монохроматическими и представляют собой сравнительно узкий спектр гармонических колебаний с очень близкими частотами. В этом случае вводится понятие групповой скорости v , представляющей собой скорость перемещения энергии

в пространстве. Связь между фазовой скоростью и групповой может быть представлена в следующем виде:

$$v = U - \lambda \frac{dU}{d\lambda}, \quad (118)$$

а групповой показатель $n_{\text{гр}}^*$ преломления атмосферы определяется по формуле

$$n_{\text{гр}}^* = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \approx 1 + A + \frac{3B}{\lambda_{\text{эф}}^2} + \frac{5C}{\lambda_{\text{эф}}^4}, \quad (119)$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ — эффективная длина волны несущих колебаний, выраженная мкм.

Формула (119) справедлива с погрешностью не более 1×10^{-6} для спектрального диапазона $\delta\lambda \leq 0,1$ мкм. Погрешность определения $\lambda_{\text{эф}}$, равная 0,001 мкм, соответствует погрешности определения показателя преломления $\sim 0,6 \cdot 10^{-8}$.

Групповой показатель преломления $n_{\text{гр}}$ с учетом влияния метеорологических факторов можно вычислить по упрощенной формуле Кольрауша

$$n_{\text{гр}} = 1 + \frac{(n_{\text{гр}}^* - 1) P}{\left(1 + \frac{1}{273,16} t\right) 101\,324,72} - \frac{7,3273e}{1 + \frac{1}{273,16} t} \cdot 10^{-6} \quad (120)$$

где t — температура воздуха, °C; P — давление, Па; e — парциальное давление водяных паров, Па. Погрешность формулы Кольрауша — не более $2 \cdot 10^{-7}$.

При определении показателя преломления атмосферы следует учитывать среднеинтегральные значения метеорологических факторов вдоль трассы прохождения светового потока от светодальномера до отражателя. Поскольку показатель преломления атмосферы непрерывно меняется (при этом амплитуда случайных флуктуационных изменений может достигать нескольких единиц шестого знака при частоте 0,1 Гц), процесс определения метеорологических факторов должен длиться не менее нескольких десятых долей секунды. Определение с требуемой быстротой среднеинтегральных значений метеорологических факторов является технически сложной задачей, поэтому обычно определяют температуру, давление и влажность на точках стояния светодальномера и отражателя (на точке стояния отражателя измеряют только температуру и давление). Получаемые в результате этой замены погрешности в благоприятных условиях (при измерении расстояний до нескольких километров в равнинной местности, при облачной и ветреной погоде) приведены в табл. 9 [94], при этом погрешности определения соответствующих метеорологических приборов должны быть не более значений, приведенных в таблице.

При определении метеорологических факторов во время измерений в гористой местности следует вносить поправку за изменение давления. Кроме того, учитывая суточное изменение температуры в приземном слое воздуха, целесообразно дневные измерения расстояний более 10 км начинать через 2—3 ч после восхода солнца и заканчивать за 2—3 ч до захода.

ТАБЛИЦА 9

Метеорологический фактор	Погрешность определения среднеинтегрального значения метеорологического фактора	Соответствующая погрешность определения показателя преломления
Температура	$\pm 0,2^{\circ} \text{C}$	1:5 000 000
Давление	$\pm 13 \text{ Па}$	1:25 000 000
Давление водяных паров	$\pm 40 \text{ Па}$	1:60 000 000

В неблагоприятных условиях (при измерении значительных расстояний в гористой местности с большими перепадами высот конечных точек или в жаркий безветренный день) погрешности определения среднеинтегральных значений метеорологических факторов будут примерно в десять раз больше. Наибольшее влияние на показатель преломления воздуха оказывает изменение температуры. Минимальная погрешность определения показателя преломления в неблагоприятных условиях 1 : 500 000. Если же метеорологические условия определять только на точке стояния светодальномера, погрешность определения группового показателя преломления при измерении расстояний 20—25 км может достигать 1 : 350 000 [90]. При измерении расстояний до 2 км достаточно вести метеорологические наблюдения только на одном из концов измеряемого расстояния.

Для ускорения вычислительных операций поправки за влияние метеорологических факторов вводят по заранее составленным таблицам и номограммам. Если связать между собой датчики атмосферных данных и светодальномер, внесение поправок может быть автоматизировано, например, соответствующим изменением частоты модуляции.

Учитывая спектральные характеристики источников и приемников излучения, применяемых в геодезических светодальномерах, можно сделать вывод, что в качестве несущих колебаний оптического диапазона, с учетом «окон» пропускания атмосферы, в этих светодальномерах используют следующие спектральные участки видимой и ближней инфракрасной областей: 0,40—0,78; 0,80—0,92; 0,98—1,05; 1,17—1,32; 1,46—1,72 мкм. Допустимая ширина спектрального диапазона излучения определяется заданной точностью проектируемого светодальномера (например, для светодальномеров, гарантирующих точность измерения не ниже $1 \cdot 10^{-5}$, $\delta_{\lambda} \leq 0,1$ мкм).

§ 18. РЕФРАКТОМЕТРЫ

Повышение точности современных геодезических светодальномеров связано с решением одной из основных проблем светодальномерной техники — более точным определением показателя преломления атмосферы. Помимо уже рассмотренного метода определения показателя преломления атмосферы, основанного на учете метеорологических факторов, в настоящее время разработано несколько других методов [47]. Например, метод введения поправок, определяемых по измерениям зенитных расстояний. Но он организационно довольно сложен, не обеспечивает необходимой точности в условиях горной местности и при наличии случайных аномалий рефракции.

Можно определить показатель преломления атмосферы при помощи рефрактометра, в котором имеется два строго идентичных объемных резонатора: в одном из них вакуум, а в другом воздух — представитель атмосферы. Из-за разных диэлектрических свойств сред, находящихся во внутренних объемах резонаторов, частоты собственного резонанса их будут отличаться друг от друга. Разность резонансных частот объективно характеризует показатель преломления атмосферы, находящейся вблизи рефрактометра. Этот метод может найти применение при создании высокоточных геодезических светодальномеров, работающих на частотах модуляции порядка 1 ГГц и измеряющих расстояния до 1 км. Отметим, что высокая точность определения показателя преломления атмосферы при измерении расстояний до 1 км гарантируется также учетом метеорологических условий.

И, наконец, можно определить среднеинтегральное значение показателя преломления атмосферы в момент измерения расстояния при помощи дисперсионного рефрактометра [87, 90]. Этот инструментальный способ определения показателя преломления атмосферы основан на использовании дисперсии света в атмосфере, т. е. зависимости разности оптических путей различных длин волн от метеорологических условий вдоль измеряемого расстояния. При использовании двух волн излучения λ_1 и λ_2 среднеинтегральное значение показателя преломления атмосферы определяется по формуле

$$n = 1 + \Delta_s \frac{(n_0 - 1)}{S \Delta_{n_0}} + \left[(n_0 - 1) \frac{\Delta_{v_0}}{\Delta_{n_0}} - (v_0 - 1) \right] \frac{e}{t}, \quad (121)$$

где Δ_s — измеряемая при помощи рефрактометра разность оптических путей для световых потоков с длинами волн λ_1 и λ_2 ; n_0 и v_0 — значения показателей преломления для сухого воздуха и водяных паров в стандартных условиях для той длины волны, для которой определяется среднеинтегральное значение показателя преломления; $v_0 - 1 = (17,044 - \frac{0,557}{\lambda^2}) \cdot 10^{-6}$ — пре-

ломляющая способность водяного пара; Δn_0 и Δv_0 — разность показателей преломления волн λ_1 и λ_2 для сухого воздуха и водяных паров в стандартных условиях; S — измеряемое светодальномером расстояние; t и e — температура и влажность, измеренные в одной или в двух концевых точках измеряемого расстояния.

В зависимости от точности определения среднеинтегрального значения показателя преломления атмосферы можно рассчитывать допустимые погрешности измерения разности оптических путей m_{Δ_s} и определения среднего значения влажности m_e

$$\frac{m_n}{n} \approx m_n \approx \frac{n_0 - 1}{\Delta n_0} \sqrt{\left(\frac{m_{\Delta_s}}{\Delta_s}\right)^2 + \left(\frac{m_e}{t}\right)^2 \Delta v_0^2}, \quad (122)$$

где $m_n : n$ — относительная погрешность определения показателя преломления атмосферы.

Если обеспечивается пренебрегаемо малое влияние погрешности определения среднего значения влажности (т. е. выполняется условие $\frac{m_e}{t} \Delta v_0 \leq \frac{1}{3} \frac{m_{\Delta_s}}{S}$, погрешность вычисления по формуле (121) среднеинтегрального значения показателя преломления атмосферы будет зависеть, по существу, лишь от погрешности измерения разности оптических путей.

Вариант трехволнового дисперсионного метода, позволяющего полностью исключить учет метеорологических факторов, из-за существенных технических трудностей в связи с обязательным выбором одной из волн в радиодиапазоне, по-видимому, нецелесообразно использовать при геодезических измерениях.

Предельные точностные возможности определения среднеинтегрального значения показателя преломления атмосферы при помощи двухлучевого рефрактометра современными техническими средствами, как показали результаты испытаний, проведенных американскими и английскими учеными, не выше 10^7 [124].

Из формул (121) и (122) следует, что точность определения среднеинтегрального значения показателя преломления атмосферы тем выше, чем больше разность показателей преломления Δn_0 и измеряемое расстояние S . Поэтому большое значение имеет правильный выбор источников излучения. Высокая спектральная интенсивность лазеров определяет в основном целесообразность использования их в качестве источников излучения для рефрактометра. При этом значение минимальной длины волны излучения будет определяться границей пропускания атмосферы в фиолетовой области ($\sim 0,4$ мкм).

Итак, одним из основных направлений дальнейшего повышения точности измерения расстояний более нескольких километров геодезическими светодальномерами в любых метеорологических и физико-географических условиях является создание системы светодальномер — рефрактометр, т. е. системы, позволяющей одновременно определять время, затрачиваемое световым потоком на прохождение двойного измеряемого расстояния, и среднеинтегральное значение показателя преломления атмосферы.

Рассмотрим некоторые из возможных вариантов функциональной схемы системы светодальномер — рефрактометр, которая имеет много общего со схемой фазового светодальномера. Основное отличие заключается в том, что в рефрактометре необходимо определить разность оптических путей Δ_s (или разность фаз) принимаемых модулированных потоков с длинами волн несущих колебаний λ_1 и λ_2 , а в светодальномере — разность фаз принимаемого и излучаемого потоков с длиной волны несущих колебаний λ_1 или λ_2 . При этом в первом случае определяемая разность фаз, как правило, не более фазового цикла, а во втором — во много раз больше. Следовательно, точностные требования при определении разности фаз в первом и во втором случаях будут весьма различны.

Измерение разности фаз принимаемых световых потоков (с длинами волн λ_1 и λ_2) с требуемой точностью в двухканальной схеме рефрактометра с двумя пространственно разделенными приемниками излучения пока осуществить трудно, так как предварительно необходимо один или оба световых сигнала преобразовывать в электрические, что сопряжено с возникновением дополнительных трудно контролируемых фазовых погрешностей. Единственный путь исключения этих погрешностей — осуществление синхронной демодуляции при помощи демодулятора, устанавливаемого перед приемниками излучения. В совмещенной системе светодальномер — рефрактометр можно производить поочередное (или одновременное) сравнение фаз каждого из двух принимаемых световых потоков с фазой общего электрического опорного (модулирующего) сигнала и определять разности фаз φ_{λ_1} и φ_{λ_2} , что соответствует полностью измерению разности фаз компенсационным способом, применяемым в светодальномерах.

В целях упрощения фазоизмерительного процесса и уменьшения погрешности измерения разности фаз, очевидно, целесообразно осуществлять измерение разности фаз именно компенсационным способом: либо путем плавного изменения частоты модуляции в некотором диапазоне, либо использованием вместо фазовращателя оптической линии задержки. При этом погрешность m_φ измерения разности фаз будет определяться в основном погрешностью m_φ индикации определенной разности фаз.

Поскольку при использовании в качестве источников излучения лазеров уровень принимаемого светового потока, несущего информацию, достаточно высок, очевидно, нет необходимости светодальномер и рефрактометр устанавливать на противоположных концах измеряемого расстояния (в этом случае оптическая схема рефрактометра вмонтирована в пассивный отражатель светодальномера). Кроме того, при совмещенной установке светодальномера и рефрактометра на одном из концов измеряемого расстояния использование одних и тех же узлов и блоков позволяет создать компактный светодальномер-рефрактометр, по размерам незначительно отличающийся от размеров светодальномера, существенно упростить организацию и проведение измерений, а также обеспечить жесткий внутренний контроль фазометрических трактов схемы.

Оптический путь, проходимый световым потоком с длиной волны λ_1 в атмосфере до отражателя и обратно, является путем, приведенным к вакууму, следовательно,

$$2Sn_{\lambda_1} = \frac{c}{f} \left(N_1 + \frac{\Phi_{\lambda_1}}{2\pi} \right), \quad (123)$$

где n_{λ_1} — среднеинтегральное значение показателя преломления атмосферы для излучения с длиной волны λ_1 ; f — частота модуляции; N_1 — число целых фазовых циклов; Φ_{λ_1} — разность фаз в пределах последнего фазового цикла; c — скорость света в вакууме.

По аналогии можно записать выражение, определяющее оптический путь для светового потока с длиной волны λ_2 :

$$2Sn_{\lambda_2} = \frac{c}{f} \left(N_2 + \frac{\Phi_{\lambda_2}}{2\pi} \right). \quad (124)$$

Поскольку $\lambda_2 > \lambda_1$, то $n_{\lambda_1} > n_{\lambda_2}$ и, как правило, $N_1 = N_2$ следовательно, разность оптических путей после несложных математических преобразований может быть представлена следующим образом:

$$\Delta_s = 2S(n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}) = \frac{c}{2\pi f} (\Phi_{\lambda_1} - \Phi_{\lambda_2}). \quad (125)$$

Итак, измерив поочередно (достаточно быстро) или одновременно разности фаз Φ_{λ_1} и Φ_{λ_2} , можно определить разность оптических путей Δ_s .

При этом, так как погрешности определения скорости света в вакууме и основной частоты модуляции могут быть прак-

тически пренебрегаемо малы, погрешность определения разности оптических путей можно выразить следующим образом:

$$m_{\Delta_s} \approx \frac{c}{2\pi f} \sqrt{m_{\varphi_{\lambda_1}}^2 + m_{\varphi_{\lambda_2}}^2}, \quad (126)$$

или, учитывая, что $m_{\varphi_{\lambda_1}} \approx m_{\varphi_{\lambda_2}} \approx m_{\varphi_0}$, получим формулу, определяющую необходимое значение частоты модуляции:

$$f \geq \frac{cm_{\varphi_0}}{\sqrt{2}\pi m_{\Delta_s}}. \quad (127)$$

Рассмотрим в качестве примера некоторые особенности двух функциональных схем светодальномера-рефрактометра, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом.

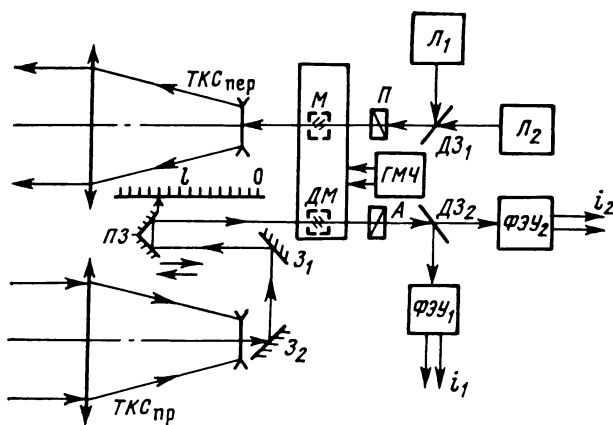


Рис. 31. Схема светодальномера-рефрактометра с оптической линией задержки:

$ТКС_{пер}$ и $ТКС_{пр}$ — передающая и приемная телескопические коллимирующие системы; $М$ — модулятор; $ДМ$ — демодулятор; $П$ — поляризатор; $А$ — анализатор; $ДЗ_1$ и $ДЗ_2$ — дихроичные зеркала; $Л_1$ и $Л_2$ — лазеры; l — отсчет по шкале оптической линии задержки (или величина перемещения подвижного зеркала); $ФЭУ_1$ и $ФЭУ_2$ — фотоэлектронные умножители; i_1 и i_2 — фототоки; $ПЗ$ — подвижное зеркало; $З_1$ и $З_2$ — поворотные неподвижные зеркала

Функциональная схема светодальномера-рефрактометра, работающего на фиксированных частотах СВЧ модуляции с оп-

тической линией задержки, применяемой в качестве фазовращателя при измерении разности фаз излучаемых и принимаемых световых потоков, представлена на рис. 31. При использовании прибора в качестве рефрактометра световые потоки от лазеров $\mathcal{L}_1$ и $\mathcal{L}_2$ с длинами волн λ_1 и λ_2 , соответственно, пройдя поляроид-поляризатор $\mathcal{P}$, попадают на дихроичное зеркало $\mathcal{DZ}_1$, которое световой поток с длиной волны λ_1 отражает, а световой поток с λ_2 пропускает. Модулирующий электрический сигнал от генератора ГМЧ поступает к объемному резонатору, в котором расположены кристаллические идентичные модулятор $\mathcal{M}$ и демодулятор $\mathcal{DM}$. Пройдя модулятор, модулированные по поляризации световые потоки с длинами волн λ_1 и λ_2 формируются при помощи передающей телескопической коллимирующей системы $\mathcal{TКС}_{\text{пер}}$ в узко направленный световой поток, посылаемый на отражатель. Отраженный световой поток поступает в приемную телескопическую коллимирующую систему $\mathcal{TКС}_{\text{пр}}$, которая формирует из потока пучок параллельных лучей небольшого диаметра и направляет этот пучок при помощи зеркал $\mathcal{Z}_1$ и $\mathcal{Z}_2$ в оптическую линию задержки. Длина пути l , проходимого световым потоком в этой линии, может быть измерена при перемещении подвижного зеркала $\mathcal{ПЗ}$ и определена путем взятия отсчета по шкале оптической линии задержки. От подвижного зеркала поток, пройдя кристалл-демодулятор и поляроид-анализатор $\mathcal{A}$, падает на дихроичное зеркало $\mathcal{DZ}_2$, которое делит его на два (световой поток с длиной волны λ_2 проходит через это зеркало, а световой поток с длиной волны λ_1 отражается от него). Каждый из световых потоков поступает соответственно на фотокатод фотоэлектрического умножителя $\PhiЭУ_1$ или $\PhiЭУ_2$.

Разности фаз излучаемого и принимаемого световых потоков с длинами волн λ_1 и λ_2 измеряются поочередно (это является одним из недостатков рассматриваемой схемы). Минимальные значения фототоков i_1 и i_2 , получаемые при индикации определенной разности фаз компенсационным способом экстремума (при перемещении подвижного зеркала $\mathcal{ПЗ}$), будут соответствовать условиям

$$\varphi_{\lambda_1} = \frac{2\pi f n_{\lambda_1} l_{\lambda_1}}{c}, \quad (128)$$

$$\varphi_{\lambda_2} = \frac{2\pi f n_{\lambda_2} l_{\lambda_2}}{c}, \quad (129)$$

где l_{λ_1} и l_{λ_2} — отсчеты по шкале оптической линии задержки для световых потоков с длинами волн λ_1 и λ_2 соответственно.

Подставив выражения (128) и (129) в уравнение (125), получим зависимость, определяющую разность оптических путей

$$\Delta_s = l_{\lambda_1} n_{\lambda_1} - l_{\lambda_2} n_{\lambda_2}. \quad (130)$$

Если при измерении разности фаз излучаемого и принимаемого световых потоков с длиной волны λ_2 вместе с подвижным зеркалом ПЗ перемещать шкалу оптической линии задержки, отсчет l_{λ_2} будет равен нулю. Если затем, закрепив шкалу оптической линии задержки, измерить разность фаз излучаемого и принимаемого световых потоков с длиной волны λ_1 , получим упрощенную зависимость (130)

$$\Delta_s = l_{\lambda_1} n_{\lambda_1} \approx l_{\lambda_1} n_{0\lambda_1}. \quad (131)$$

Следует отметить, что процесс перемещения подвижного зеркала, регистрацию отсчета по шкале оптической линии задержки и определение разности оптических путей можно автоматизировать. Это позволит легко задавать и выдерживать требуемую программу измерений.

Определив разность оптических путей Δ_s , по формуле (121) вычисляют среднеинтегральные значения групповых показателей преломления атмосферы n_{λ_1} и n_{λ_2} , а затем величину измеряемого расстояния

$$S = \frac{c}{2n_{\lambda_1}f} N_1 + \frac{l_{\lambda_1}}{2},$$

$$S = \frac{c}{2n_{\lambda_2}f} N_2 + \frac{l_{\lambda_2}}{2}. \quad (132)$$

Если из схемы светодальномера-рефрактометра исключить оптическую линию задержки и для фиксации определенной разности фаз компенсационным способом экстремума плавно изменять частоту модулирующего электрического сигнала в некотором диапазоне, отсчитывание по шкале оптической линии задержки будет заменено отсчитыванием по шкале генератора ГМЧ (рис. 32).

При использовании этого прибора в режиме рефрактометра минимальным значениям фототоков i_1 и i_2 будут соответствовать следующие выражения:

$$2S = \frac{c}{n_{\lambda_1} (f + \Delta f_1)} N_1, \quad (133)$$

$$2S = \frac{c}{n_{\lambda_2} (f + \Delta f_2)} N_2,$$

где Δf_1 и Δf_2 — изменение частот модуляции для световых потоков с длинами волн λ_1 и λ_2 соответственно.

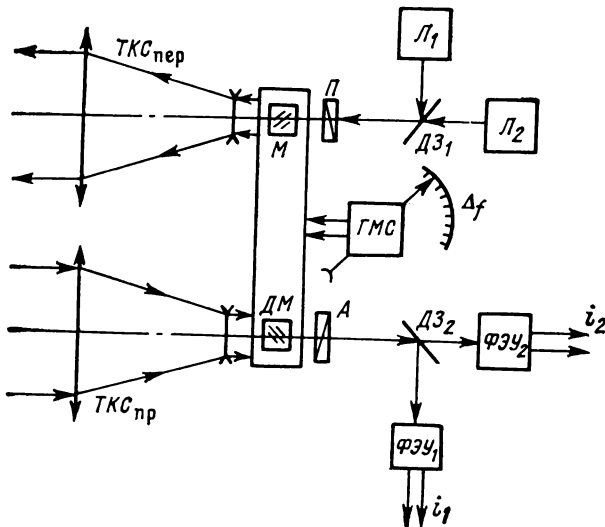


Рис. 32. Схема светодальномера-рефрактометра, работающего при плавном изменении частоты модуляции в некотором диапазоне:

Δf — изменение частоты модуляции, определяемое по шкале генератора модулирующей частоты; остальные обозначения см. рис. 31.

Сравнив соответствующие выражения в системе уравнений (132) с выражениями (133), можно получить следующие зависимости:

$$l_{\lambda_1} = \frac{c N_1 \Delta f_1}{n_{\lambda_1} f (f + \Delta f_1)}, \quad (134)$$

$$l_{\lambda_2} = \frac{c N_2 \Delta f_2}{n_{\lambda_2} f (f + \Delta f_2)}.$$

Используя зависимости (130) и (131), можно определить разность оптических путей следующим образом:

$$\Delta_s \approx n_{0\lambda_1} (l_{\lambda_1} - l_{\lambda_2}), \quad (135)$$

$$\Delta_s \approx n_{0\lambda_2} (l_{\lambda_1} - l_{\lambda_2}) \quad (136)$$

или с учетом зависимостей (134) и условия $N_1 = N_2$

$$\Delta_s = \frac{cN_1(\Delta_{f_1} - \Delta_{f_2})}{(f - \Delta_{f_1})(f - \Delta_{f_2})}. \quad (137)$$

Определив разность оптических путей Δ_s по формуле (121), можно вычислить среднеинтегральные значения групповых показателей преломления n_{λ_1} и n_{λ_2} , а затем по формуле (133) величину измеряемого расстояния.

§ 19. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ МОДУЛЯТОРОВ
И ДЕМОДУЛЯТОРОВ СВЕТОВОГО ПОТОКА

Целесообразно рассмотреть некоторые конструктивные особенности модуляционных светодальномеров, например, вопросы, связанные с модуляцией и демодуляцией светового потока по интенсивности.

Среднеинтегральное значение интенсивности излучения за период несущих колебаний не зависит ни от частоты, ни от фазы несущих колебаний, поэтому модуляция интенсивности возможна для монохроматического и немонхроматического световых потоков.

В современных фазовых геодезических светодальномерах для обеспечения необходимой точности частота модуляции, как правило, не менее 10 МГц. Осуществить модуляцию на столь высокой частоте непосредственно в источнике излучения (внутреннюю модуляцию) возможно только в светодиодах и полупроводниковых лазерах, но можно модулировать поток излучения при помощи специального устройства, называемого модулятором (внешняя модуляция).

При осуществлении внутренней модуляции интенсивности излучения светодиодов и полупроводниковых лазеров путем непосредственного воздействия на них модулирующего электрического сигнала возможно перераспределение энергии излучения (рис. 33). При этом максимальное значение $\Phi_{\max}$ интенсивности модулированного светового потока может быть значительно больше интенсивности немодулированного светового потока $\Phi_{\text{ист.}}$. Например, при импульсной модуляции максимальное значение интенсивности пропорционально скважности импульсного излучения. При этом среднеинтегральное за период повторения импульсов излучения значение плотности тока, протекающего через зону $p-n$ перехода, равно плотности тока до импульсной модуляции

$$\Phi_{\max} = Q\Phi_{\text{ист}} = \frac{T_{\text{и}}}{\tau_{\text{и}}} \Phi_{\text{ист}}, \quad (138)$$

где $T_{\text{и}}$ — период повторения импульсов излучения; $\tau_{\text{и}}$ — длительность импульсного излучения.

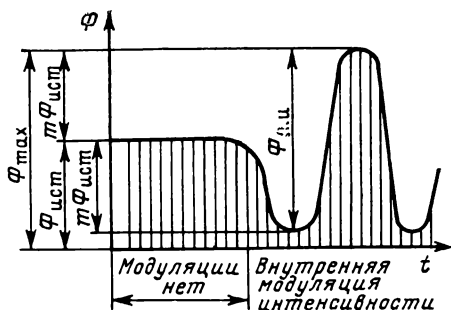
При осуществлении внешней модуляции интенсивности перераспределение энергии излучения невозможно, следовательно, максимальное значение модулированного светового потока не может быть больше светового потока, излучаемого источником,

$$\Phi_{\max} = \tau_m \Phi_{\text{ист}}, \quad (139)$$

где τ_m — коэффициент пропускания модулятора.

Рис. 33. Перераспределение энергии излучения при осуществлении внутренней модуляции интенсивности светового потока непосредственно в источнике излучения:

Φ — световой поток; t — текущее время; $\Phi_{\text{ист}}$ — световой поток, излучаемый источником, когда модуляции нет; $\Phi_{\max}$ — максимальное значение интенсивности модулированного потока; $\Phi_{\text{и}}$ — динамический диапазон



Помимо этого, использование внутренней модуляции упрощает конструкцию светодиода, уменьшает его габариты и потребляемую электрическую мощность. Но, к сожалению, мощность излучения светодиодов и полупроводниковых лазеров, позволяющих осуществить внутреннюю модуляцию интенсивности на частотах не менее 10 МГц, пока является недостаточной для измерения значительных расстояний. Поэтому в геодезических светодиодах, предназначенных для измерения расстояний более 5÷10 км или работающих в локационном режиме, используют внешнюю модуляцию [1, 49, 63, 75, 83, 135].

В целях выявления оптимальных конструктивных параметров модулятора и его рабочих режимов проводят анализ модулированного светового потока, используя различный математический аппарат. Наиболее строгим является метод, разработанный еще в 30-х годах профессором П. Г. Тагером и основанный на представлении модулированного потока в виде ряда Фурье с использованием в качестве коэффициентов функций Бесселя первого рода [107]. Для решения некоторых конкретных задач можно применять более простые и менее трудоемкие методы, например, для анализа модуляторов, основанных на применении поляризованного света, в некоторых случаях используют параметры Стокса и матричный способ Мюллера или нормированные векторы и матрицы Джонса [30, 120, 135].

Однако при этом вопрос о влиянии искажений, вносимых

модулятором, на измерение разности фаз в целом обычно не затрагивается. Рассмотрим, как влияют глубина модуляции, нелинейные и фазовые искажения, вносимые при модуляции, на эффективность действия модулятора светового потока и на процесс измерения расстояния светодальномером [72].

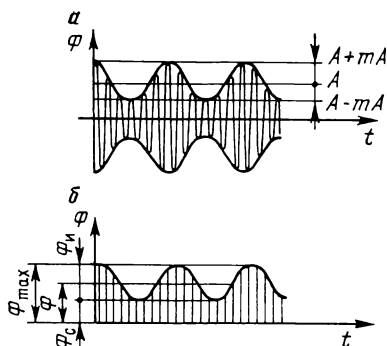


Рис. 34. Два вида модуляции: а — амплитудная, где A — амплитуда; б — модуляция интенсивности

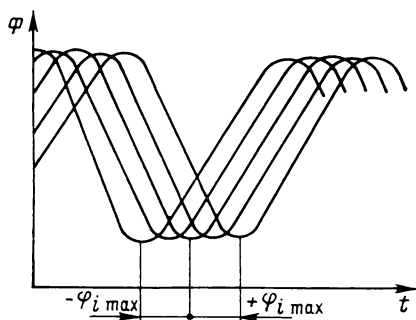


Рис. 35. Искажение модулированного светового потока вследствие инерционности модулятора:

$\pm \varphi_{i \max}$ — максимальные значения фазовых сдвигов

Глубина m модуляции интенсивности светового потока не равна общепринятому коэффициенту амплитудной модуляции (рис. 34, а и б) [72, 99]. При амплитудной модуляции амплитуда сигнала изменяется относительно уровня A на величину $\pm mA$, а при модуляции интенсивности величина интенсивности изменяется от максимального значения $\Phi_{\max}$ до минимального значения Φ_c

$$\Phi_c = \Phi_{\max}(1 - m). \quad (140)$$

Следовательно, глубина модуляции интенсивности светового потока может быть определена следующим образом:

$$m = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_c}{\Phi_{\max}} = \frac{\Phi_{\text{и}}}{\Phi_{\max}} = \frac{2\Phi_a}{\Phi_{\max}}, \quad (141)$$

где $\Phi_{\text{и}}$ — динамический диапазон изменения интенсивности светового потока; Φ_a — амплитуда изменения интенсивности.

Мгновенное значение Φ гармонически модулированного без нелинейных искажений светового потока, учитывая выражение (139), может быть представлено следующей зависимостью (допустим, что начальная фаза модулированного потока равна нулю):

$$\Phi = \frac{\tau_m \Phi_{\text{ист}}}{2} [(2 - m) + m \cos \omega t], \quad (142)$$

где ω — частота модуляции; t — текущее время.

Для однозначного определения фазы модулированного светового потока по мгновенному значению интенсивности и для обеспечения модуляции с минимальными нелинейными искажениями допустимое значение глубины модуляции должно быть $m \leq 1$. При $m \gg 1$ будет осуществляться импульсная модуляция интенсивности с частотой следования импульсов, равной частоте модуляции. Однако из-за малой эффективности использования потока излучения внешняя модуляция в импульсных светодиодах обычно не применяется (эффективность определяется отношением длительности импульса к периоду следования импульсов).

Максимальная эффективность использования светового потока будет при глубине модуляции $m = 1$. Если глубина модуляции меньше единицы, часть светового потока, не несущая измерительной информации, будет

$$\Phi_c = \Phi_{\text{ист}} \tau_m (1 - m). \quad (143)$$

Вследствие инерционности модулятора выходящий из него световой поток имеет разную фазу в плоскости сечения, перпендикулярного к направлению распространения, или фазовую неоднородность, которая в подавляющем большинстве случаев не превышает $\pm 3^\circ$. При этом можно представить общий световой поток как множество (n) одинаковых по интенсивности составляющих потоков (рис. 35), каждый из которых имеет свою начальную фазу φ_i , тогда мгновенное значение интенсивности общего потока может быть выражено с учетом формулы (142) следующим образом:

$$\Phi = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_m}{2} \left[(2 - m) + \frac{m}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \cos(\omega t + \varphi_i) \right]. \quad (144)$$

Следовательно, фазовая неоднородность не приведет к ослаблению общего модулированного светового потока, но вызовет уменьшение динамического диапазона (это соответствует уменьшению глубины модуляции)

$$\Phi_n = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_m}{2} (1 + \cos \varphi_{i \max}). \quad (145)$$

Поскольку в геодезических светодиодах фазовость модулированного светового потока не превышает $\pm 3^\circ$, динамический диапазон практически не уменьшится.

Однако фазовая неоднородность модулированного светового потока может привести к существенным фазовым погрешностям при измерении разности фаз. При использовании отдельных пространственных составляющих потока значения фазовой погрешности могут достигать $\varphi_{i \max}$, а при использовании всего светового потока фазовая погрешность будет равна нулю либо будет носить систематический характер, но при соответствую-

щей методике измерений ее влияние может быть исключено. Поэтому, помимо конструктивных мер, уменьшающих фазовую неоднородность, применяют пространственную селекцию составляющей светового потока с одинаковой фазой (например достаточно точным ориентированием светодающего относительно отражателя) или вводят оптические устройства, позволяющие интегрировать составляющие светового потока, которые поступают в приемник излучения.

Фазовая нестабильность $\Delta\varphi$, т. е. изменение разности фаз излучаемого модулированного светового потока и электрического модулирующего сигнала, является следствием нестабильности конструктивных параметров модулятора, его свойств и положения. Эта погрешность несколько изменит выражение (142), определяющее мгновенное значение светового потока,

$$\Phi = \frac{\Phi_{\text{ист}}\tau_m}{2} [(2 - m) + m \cos(\omega t + \Delta\varphi)], \quad (146)$$

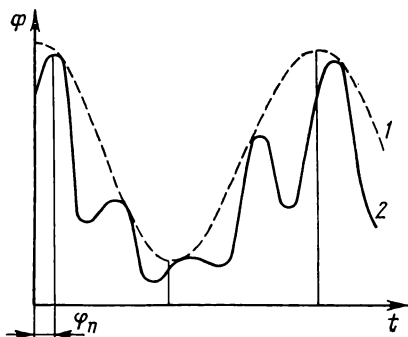


Рис. 36. Два вида изменения интенсивности модулированного светового потока:

1 — без нелинейных искажений; 2 — с нелинейными искажениями

но не изменит, так же как в предыдущем случае, значений всего модулированного светового потока и динамического диапазона его, несущего измерительную информацию. Для исключения влияния фазовой нестабильности на результат измерений в светодающем вводят оптическую калибровочную линию, обеспечивающую «оптическое замыкание», длина которой соответствует диапазону фазовой нестабильности.

Вследствие нелинейных искажений, которые может внести модулятор, изменение интенсивности модулированного светового потока не будет соответствовать синусоидальному модулирующему электрическому сигналу. Известно, что любой периодический сигнал можно представить в виде суммы отдельных гармонических сигналов (ряда Фурье). Допустим, что нелинейные искажения незначительны и их влияние может быть учтено как дополнительное модулирование модулированного без нелинейных искажений светового потока еще одним гармоническим сигналом (рис. 36)

$$\Phi = \frac{\Phi_{\text{ист}}\tau_m}{4} [(2 - m) + m \cos(\omega t)] [(2 - m_n) + m_n \cos(\omega n t + \varphi_n)], \quad (147)$$

где $n=2, 3, \dots$ — номер соответствующей гармоники основной модулирующей частоты; m_n — глубина модуляции на дополнительной частоте; φ_n — фазовый сдвиг по отношению к фазе основной модулирующей частоты. Выполнив несложные математические преобразования, получим

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_m}{4} \left[(2-m)(2-m_n) + m(2-m) \cos \omega t + \right. \\ & + m_n(2-m) \cos (n\omega t + \varphi_n) + \frac{1}{2} m m_n \cos (\omega t + n\omega t + \varphi_n) + \\ & \left. + \frac{1}{2} m m_n \cos (\omega t - n\omega t - \varphi_n) \right]. \end{aligned} \quad (148)$$

Выражение (148) свидетельствует о том, что при двукратном гармоническом модулировании интенсивности модулированный световой поток содержит четыре переменные составляющие с частотами, соответствующими двум частотам модуляции, а также сумме и разности частот модуляции.

Итак, вследствие нелинейных искажений, вносимых модулятором, произойдет одинаковое ослабление в $2:(2-m_n)$ раз всего светового потока и его динамического диапазона, несущего измерительную информацию. Хотя нелинейные искажения не приведут к фазовым изменениям модулированного светового потока, но из-за них нельзя будет гарантировать однозначность определения фазы модулированного светового потока по мгновенному значению интенсивности его.

Аналогично можно учесть влияние и значительных нелинейных искажений, когда дополнительное модулирование уже несколькими гармониками модулирующего электрического сигнала эквивалентно нелинейным искажениям, вносимым модулятором. В этом случае значение всего светового потока и его динамического диапазона, несущего измерительную информацию, будет ослаблено в K раз

$$K = \frac{2^{(n-1)}}{(2-m_2)(2-m_3) \dots (2-m_n)}, \quad (149)$$

где n — общее число гармонических модулирующих электрических сигналов; $m_2, m_3, \dots, m_n$ — глубины модуляции на дополнительных гармониках ($2\omega, 3\omega, \dots, n\omega$).

Под коэффициентом γ нелинейных искажений, вносимых модулятором, целесообразно понимать отношение светового потока, потерянного из-за нелинейных искажений (а не суммы световых потоков, соответствующих всем гармоническим составляющим, кроме основной, так как они входят в световой поток, несущий измерительную информацию), к световому потоку, несущему измерительную информацию,

$$\gamma = \frac{\frac{\Phi_{\max}}{2} m - \frac{\Phi_{\max}}{2^n} m (2 - m_2) (2 - m_3) \dots (2 - m_n)}{\frac{\Phi_{\max}}{2^n} m (2 - m_2) (2 - m_3) \dots (2 - m_n)} =$$

$$= \frac{2^{n-1}}{(2 - m_2) (2 - m_3) \dots (2 - m_n)} - 1. \quad (150)$$

Учитывая полученное выражение (150), определяющее коэффициент нелинейных искажений, можно преобразовать зависимость (142)

$$\Phi = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_m}{2(1 + \gamma)} [(2 - m) + m \cos \omega t]. \quad (151)$$

В результате нелинейных искажений, вносимых модулятором, произойдет одинаковое уменьшение в $(1 + \gamma)$ раз всего светового потока и его динамического диапазона, несущего измерительную информацию, и не будут гарантированы условия однозначного определения фазы потока по мгновенному значению его интенсивности.

У подавляющего большинства модуляторов, применяемых в геодезических светодальномерах (см. табл. 10), при глубине модуляции m не менее 70% коэффициент нелинейных искажений γ не превышает 5—10%.

При использовании внутренней модуляции непосредственно в источнике излучения (см. рис. 33) мгновенное значение интенсивности модулированного светового потока, учитывая зависимость (151), можно представить следующим образом:

$$\Phi = \frac{\Phi_{\text{ист}}}{(1 + \gamma)} (1 + m \cos \omega t). \quad (152)$$

Если при этом, помимо модуляции по гармоническому закону, происходит еще и импульсная модуляция излучаемого светового потока (например, когда светодиод или полупроводниковый лазер используется в качестве источника излучения комбинированного светодальномера), то, учитывая формулу (138), мгновенное значение интенсивности модулированного светового потока можно выразить зависимостью

$$\Phi = \frac{\Phi_{\text{ист}} T_{\text{и}}}{(1 + \gamma) \tau_{\text{и}}} (1 + m \cos \omega t). \quad (153)$$

Сравнив зависимости (152) и (153) с выражением (151), можно определить коэффициенты K_1 и K_2 , характеризующие увеличение интенсивности модулированного светового потока при замене внешней модуляции внутренней в фазовом и комбинированном светодальномерах соответственно

$$K_1 = \frac{(1 + m)}{\tau_m},$$

$$K_2 = \frac{(1+m) T_n}{\tau_m \tau_n}.$$

Мгновенное значение интенсивности принимаемого модулированного светового потока, поступающего в приемник излучения фазового светодаляномера, в котором разность фаз излучаемого и принимаемого световых потоков измеряется непосредственно, с учетом формулы (151) и коэффициента K , учитывающего потери лучистой энергии при прохождении светового потока в приемеопередатчике, отражателе и в атмосфере, можно представить следующим образом:

$$\Phi = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_m K}{2(1+\gamma)} [(2-m) + m \cos \omega t]. \quad (154)$$

В этом случае динамический диапазон $\Phi_{\text{пи}}$ принимаемого светового потока, несущий информацию о фазе модулированного светового потока, будет

$$\Phi_{\text{пи}} = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_m K m}{(1+\gamma)},$$

а максимальное значение интенсивности принимаемого светового потока $\Phi_{\text{n max}}$

$$\Phi_{\text{n max}} = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_m K}{(1+\gamma)}.$$

При измерении разности фаз компенсационным способом следят за изменением составляющей светового потока, прошедшей через демодулятор и несущей информацию об измеряемой разности фаз. В качестве демодулятора может быть использован, помимо устройства, идентичного модулятору (или самого модулятора), непосредственно фотоэлектрический приемник излучения.

Мгновенное значение τ_d пропускания (чувствительности) демодулятора, работающего синхронно и синфазно с модулятором, по аналогии с мгновенным значением излучаемого модулированного светового потока (154), в момент времени, соответствующий приему отраженного светового потока, можно представить следующим образом:

$$\tau_d = \frac{\tau_{d \text{ max}}}{2(1+\gamma_d)} [(2-m_d) + m_d \cos(\omega t + \varphi)], \quad (155)$$

где $\tau_{d \text{ max}}$ — максимальное значение пропускания демодулятора; m_d — глубина демодуляции ($m_d \leq 1$); γ_d — коэффициент нелинейных искажений, вносимых демодулятором; φ — измеряемая разность фаз излучаемых и принимаемых модулированных световых потоков.

Рассматривая действие демодулятора как вторичное син-

хронное гармоническое модулирование интенсивности светового потока и учитывая зависимости (147), (154) и (155), мгновенное значение интенсивности ранее модулированного и прошедшего через демодулятор светового потока можно представить:

$$\Phi = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_{\text{м}} \tau_{\text{д}} \max K}{4(1+\gamma)(1+\gamma_{\text{д}})} \left[(2-m)(2-m_{\text{д}}) + m(2-m_{\text{д}}) \cos \omega t + \right. \\ \left. + m_{\text{д}}(2-m) \cos(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2} mm_{\text{д}} \cos(2\omega t + \varphi) + \frac{1}{2} mm_{\text{д}} \cos \varphi \right]. \quad (156)$$

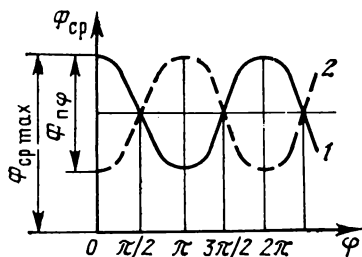


Рис. 37. Изменение среднеинтегрального значения светового потока, прошедшего демодулятор, в зависимости от измеряемой разности фаз:

1 — модулятор и демодулятор синфазны; 2 — модулятор, демодулятор синфазны и противофазны; φ — измеряемая разность фаз; $\Phi_{\text{пф}}$ — динамический диапазон; $\Phi_{\varphi \text{ max}}$ — максимальное значение светового потока

Среднеинтегральное значение светового потока $\Phi_{\text{ср}}$, прошедшего демодулятор (или электрического сигнала, соответствующего этому потоку), будет (рис. 37)

$$\Phi_{\text{ср}} = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_{\text{м}} \tau_{\text{д}} \max K}{4(1+\gamma)(1+\gamma_{\text{д}}) T} \int_0^T \left[(2-m)(2-m_{\text{д}}) + m \times \right. \\ \left. \times (2-m_{\text{д}}) \cos \omega t + m_{\text{д}}(2-m) \cos(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2} mm_{\text{д}} \cos(2\omega t + \varphi) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} mm_{\text{д}} \cos \varphi \right] = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_{\text{м}} \tau_{\text{д}} \max K}{4(1+\gamma)(1+\gamma_{\text{д}})} \left[(2-m)(2-m_{\text{д}}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} mm_{\text{д}} \cos \varphi \right], \quad (157)$$

где $T = (2\pi/\omega)$ — период частоты модуляции; K — коэффициент, учитывающий потери при прохождении светового потока в приемопередатчике, отражателе и в атмосфере.

Итак, динамический диапазон $\Phi_{\text{пф}}$ светового потока, несущий информацию об измеряемой разности φ фаз, будет

$$\Phi_{\text{пф}} = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_{\text{м}} \tau_{\text{д}} \max K mm_{\text{д}}}{4(1+\gamma)(1+\gamma_{\text{д}})}, \quad (158)$$

а максимальное значение принимаемого светового потока $\Phi_{\text{ср max}}$

$$\Phi_{\text{ср max}} = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_{\text{м}} \tau_{\text{д}} \max K \left[(2-m)(2-m_{\text{д}}) + \frac{1}{2} mm_{\text{д}} \right]}{4(1+\gamma)(1+\gamma_{\text{д}})}. \quad (159)$$

Прямое влияние на точность определения разности фаз излучаемого и принимаемого световых потоков оказывают фазовая нестабильность и фазовая неоднородность, вызванные инерционностью модулятора и демодулятора. Для уменьшения влияния этих фазовых искажений принимают следующие меры:

1. Конструктивными методами и средствами стремятся уменьшить влияние фазовых искажений, вносимых модулятором и демодулятором, а также стабилизировать величину этих искажений.

2. Систематическая составляющая фазовых искажений войдет в постоянную поправку светодальномера и будет исключаться при обработке результата измерения.

3. Можно существенно ослабить влияние фазовой неоднородности модулированного светового потока и несинфазности пропускания демодулятора путем использования только центральной части принимаемого потока и подбором оптимальной рабочей зоны демодулятора.

Сравнив выведенные итоговые зависимости (153) и (158), можно сделать вывод, что динамический диапазон принимаемого светового потока, несущий информацию о фазе этого потока, при непосредственном измерении разности фаз будет при прочих равных условиях в 4 раза и более превышать динамический диапазон светового потока, несущего информацию об определяемой разности фаз, при компенсационном способе измерения разности фаз, так как

$$\frac{\Phi_{\text{и}}}{\Phi_{\text{пф}}} = \frac{4(1 + \gamma_{\text{д}})}{\tau_{\text{д max}} m_{\text{д}}} . \quad (160)$$

Если же сравнивать зависимости (154) и (159), можно сделать вывод, что при измерении разности фаз компенсационным способом составляющая часть $\Phi_{\text{сф}}$ светового потока, не несущая информации об измеряемой разности фаз, будет при прочих равных условиях **значительно больше немодулированной** части $\Phi_{\text{с}}$ светового потока, принимаемого приемником излучения в светодальномерах с измерением разности фаз непосредственным способом. Например, при глубинах модуляции и демодуляции $m = m_{\text{д}} = 1$

$$\Phi_{\text{сф}} = \Phi_{\text{ср max}} - \Phi_{\text{пф}} = \frac{\Phi_{\text{ист}} \tau_{\text{м}} \tau_{\text{д max}} K}{8(1 + \gamma)(1 + \gamma_{\text{д}})} , \quad (161)$$

$$\Phi_{\text{с}} = \Phi_{\text{п max}} - \Phi_{\text{и}} = 0. \quad (162)$$

Следовательно, в геодезических светодальномерах с источниками излучения сравнительно небольшой мощности, например светодиодами, целесообразно для более эффективного использования светового потока, излучаемого источником, измерение разности фаз осуществлять непосредственным способом.

§ 20. МОДУЛЯТОРЫ СВЕТОВОГО ПОТОКА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРАХ

Помимо обеспечения модуляции светового потока с частотой не менее 10 МГц, модулятор геодезического светодальномера должен быть портативным, экономичным и долговечным, обладать хорошей прозрачностью, достаточным относительным отверстием, или размерами светового окна, обеспечивать при минимальных нелинейных искажениях достаточную глубину модуляции и гарантировать незначительную несинфазность по сечению пучка (гарантировать фазовость модулированного светового потока).

В качестве модуляторов для внешнего модулирования при создании современных геодезических светодальномеров применяют модуляторы, основанные на использовании явления дифракции при прохождении потока излучения через ультразвуковое поле, ячейку Керра и модуляторы, основанные на использовании линейного электрооптического эффекта Погкельса [1, 49, 63, 75, 81, 83, 135]. Мы не будем рассматривать модуляторы, работающие на использовании электромагнитного эффекта Фарадея, и некоторые другие, так как они не применяются в светодальномерной практике.

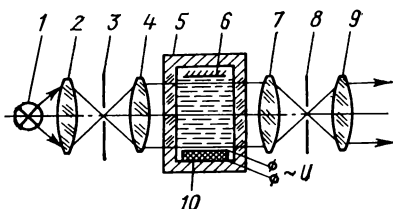
Действие ультразвукового модулятора основано на том, что при распространении ультразвуковых колебаний в упругой и прозрачной среде создаются правильно распределенные, чередующиеся сгущения и разрежения среды, т. е. образуется своеобразная дифракционная решетка. Это имеет место как в случае бегущей, так и в случае стоячей ультразвуковых волн. Постоянная решетка равна длине ультразвуковой волны.

Впервые модулятор на ультразвуке был предложен в 1934 г. советскими учеными Л. И. Мандельштамом, Н. Д. Папалекси, Г. Е. Лансбергом.

Схема, поясняющая действие дифракционного модулятора, представлена на рис. 38. Световой поток, излучаемый источником 1, при помощи оптической конденсорной системы 2 собирается в щелевой диафрагме 3, стоящей в фокальной плоскости линзовой системы 4, которая формирует параллельный пучок лучей, проходящий через дифракционный модулятор 5. Дифракционный модулятор состоит из кюветы, заполненной жидкостью, с прозрачными стенками, пьезопластины 10 — возбуждителя ультразвуковых колебаний и отражателя 6. При работе на стоячих волнах необходимо, чтобы расстояние от пьезопластины до отражателя равнялось целому числу полуволн ультразвуковых колебаний. Это условие должно выполняться с погрешностью не более 5% от ультразвуковой волны, что может соответствовать в зависимости от частоты ультразвуковых колебаний и скорости звука в среде тысячным долям милли-

метра. Чтобы условие, необходимое для обеспечения режима стоячей волны, не нарушалось при изменении температуры окружающей среды, между отражателем 6 и пьезопластинкой ставят специальный каркас из плавленного кварца или инвара, а в качестве заполняющей жидкости используют 17%-ный раствор спирта в воде (инвар или плавленный кварц имеют незначитель-

Рис. 38. Схема модуляции интенсивности светового потока при помощи дифракционного ультразвукового модулятора



ные температурные коэффициенты расширения, а скорость звука в 17%-ном растворе спирта в воде практически не зависит от температуры). В жидкости создается своеобразная ультразвуковая дифракционная решетка. Прошедший через модулятор пучок параллельных лучей при помощи линзовой системы 7 собирается в плоскости щелевой диафрагмы 8, совмещенной с фокальной плоскостью объектива 9 передающей оптической системы светодальномера. В плоскости щелевой диафрагмы 8, которая служит для выбора соответствующего дифракционного спектра, наблюдается дифракционная картина, состоящая из ряда светлых линий (спектров), разделенных темными промежутками. Положение спектров определяется углом θ

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{\Lambda} m, \quad (163)$$

где m — порядок спектра; Λ — длина ультразвуковой волны; λ — длина световой волны. По мере увеличения амплитуды модулирующего напряжения, подаваемого на пьезопластинку, число дифракционных спектров увеличивается и интенсивность в спектрах каждого порядка изменяется. Происходит перераспределение лучистой энергии по спектрам. Таким образом, результатом прохождения светового потока через ультразвуковое поле является изменение интенсивности в дифракционных спектрах с частотой, определяемой частотой ультразвуковых колебаний. Световой поток становится модулированным. На бегущей ультразвуковой волне можно осуществить модулирование с частотой не более нескольких десятков килогерц, при использовании стоячих волн — до нескольких сотен мегагерц. Причем в последнем случае дифракционная ультразвуковая решетка будет дважды появляться и исчезать за период ультразвуковых колебаний, поэтому частота модуляции оказывается в два раза больше частоты ультразвуковых колебаний.

Как самые интенсивные для модуляции используют основной (нулевой) или первый спектр. В основном спектре глубина модуляции всегда меньше 100%, а в первом равна 100%. Однако максимальная интенсивность светового потока в первом спектре в три раза меньше, чем в основном, поэтому в целях получения наибольшей интенсивности используют обычно основной спектр.

Для сохранения модулирующих свойств ультразвукового поля необходимо, чтобы ширина d светящейся щели 3 (приведенного источника) не превышала определенного значения

$$d < f_2' \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (164)$$

где f_2' — фокусное расстояние оптической конденсорной системы 2 (см. рис. 38).

Модулятор потребляет не более 1—2 Вт электрической мощности, обладает коэффициентом пропускания около 70%, действует только на фиксированных частотах и дает значительную фазовую нестабильность в модулированном световом потоке (достигающую 30°).

Для повышения фазовой стабильности был предложен дифракционный модулятор на смешанных волнах, в котором используют еще один излучатель ультразвука, аналогичный первому и установленный у противоположной стенки кюветы [84, 85]. В этом случае фазовая нестабильность после 30—40 мин работы модулятора не превышает 3°. Дифракционный модулятор был использован в геодезических светодальномерах ГД-300 и ГДМ, созданных в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова [85, 102].

Высокой фазовой стабильностью обладают дифракционные модуляторы, изготовленные из кристалла кварца, которые, например, использованы в светодальномере EOS, созданном в ГДР Народным предприятием «Карл Цейсс» [16].

В Ереванском политехническом институте им. К. Маркса в макете высокоточного светодальномера был использован ультразвуковой дифракционный модулятор на кристалле ниобата лития, который обеспечивал стабильную модуляцию светового потока на частоте 150 МГц при изменении температуры окружающей среды от -10 до $+40^\circ\text{C}$ [81].

Возбуждение в упругой прозрачной среде двух ультразвуковых волн: первой, более высокочастотной — стоячей волны в качестве поднесущей частоты, а второй, низкочастотной — бегущей волны в качестве модулирующей позволяет осуществить модуляцию интенсивности светового потока и при плавном изменении частоты модуляции, а также импульсную модуляцию (поднесущая частота должна не менее чем в пять раз превышать частоту модуляции).

Рассмотрим ячейку Керра, действие которой основано на том, что некоторые прозрачные изотропные вещества, помещенные в сильное поперечное электрическое поле, становятся анизотропными или двоякопреломляющими [107]. При этом разность Δ фаз колебаний в обыкновенном и необыкновенном лучах пропорциональна квадрату напряженности электрического поля

$$\Delta = 2\pi B l E^2, \quad (165)$$

где B — электрическая постоянная Керра; l — длина пути, проходимого световым потоком в анизотропной среде; $E = (U:300d)$ — напряженность электрического поля; U — напряжение, приложенное к электродам конденсатора Керра; d — расстояние между электродами (в конденсаторах Керра геометрических светодальнометров $0,2 < d < 1,5$ мм).

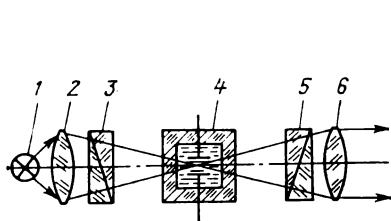


Рис. 39. Схема модуляции интенсивности светового потока при помощи ячейки Керра

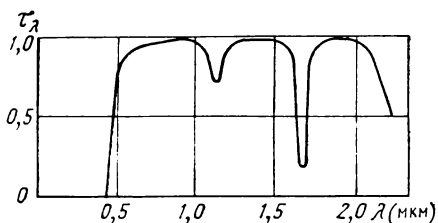


Рис. 40. Относительная спектральная прозрачность нитробензола

Схема, поясняющая действие ячейки Керра в качестве модулятора светового потока, представлена на рис. 39. Световой поток, излучаемый источником 1, при помощи оптической конденсорной системы 2 собирается между электродами конденсатора Керра 4, середина которых совпадает с фокальной плоскостью объектива 6 передающей оптической системы светодальнометра. Прежде чем попасть в конденсатор Керра, поток излучения проходит через поляризатор 3, который превращает его в плоскополяризованный. Под действием приложенного к электродам конденсатора Керра напряжения нитробензол (C_6H_6) становится анизотропным, поэтому прошедший через него плоскополяризованный световой поток превращается в эллиптически-поляризованный, так как колебания обыкновенного и необыкновенного лучей будут обладать разностью Δ фаз. При помощи анализатора 5 изменения разности фаз преобразуются в изменения интенсивности потока излучения, выходящего из анализатора.

Наибольшая глубина модуляции получается, когда плоскости поляризации поляризатора и анализатора параллельны ($\alpha=0^\circ$) или взаимно перпендикулярны ($\alpha=90^\circ$), последнее делается чаще, и расположены под углом $\beta=45^\circ$ к направлению электрического поля. При этих условиях эллиптическая поляризация превращается в круговую. Углы взаимной ориентации

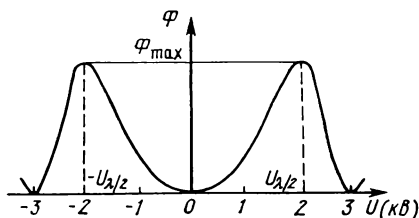


Рис. 41. Световая характеристика ячейки Керра для монохроматического светового потока (поляризатор и анализатор скрещены):

Φ — интенсивность выходящего светового потока; U — приложенное к электродам конденсатора Керра напряжение; $U_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение; $\Phi_{\max}$ — максимальное значение интенсивности светового потока

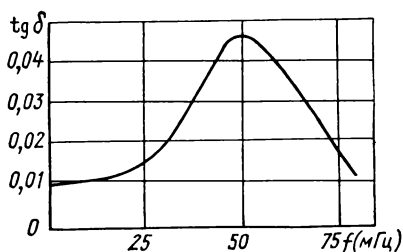


Рис. 42. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в нитробензоле от частоты модулирующего напряжения:

f — частота; $\text{tg } \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь

α и β необходимо выдерживать с погрешностью не более $\pm 1^\circ$. Значение светового потока Φ , прошедшего через ячейку Керра при $\beta=45^\circ$ и $\alpha=90^\circ$, будет

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin^2 \frac{\Delta}{2} = \Phi_{\max} \sin^2 \left(\pi \frac{BU^2}{d^2 300^2} \right), \quad (166)$$

где $\Phi_{\max}$ — максимальное значение светового потока, прошедшего через ячейку Керра.

Значение отношения $l:d$ определяется допускаемыми фазовыми искажениями структуры модулированного светового потока из-за неоднородности электрического поля у концов электродов. Поскольку, как уже отмечалось, фазовые искажения не должны превышать $\pm 3^\circ$, то $l:d > 8$. Толщина t электродов конденсатора Керра обычно выбирается в пределах

$$0,1d \leq t \leq d. \quad (167)$$

В качестве оптической среды в ячейке Керра используют химически чистый нитробензол, удельное сопротивление которого не менее 10^{10} Ом·см⁻³. Нитробензол обладает малой инерционностью (10^{-10} с) и значительной электрооптической постоянной (например, для $\lambda=0,6328$ мкм при $t=+20^\circ\text{C}$ $B \approx 3 \cdot 10^{-5}$ см·В⁻²). На рис. 40 представлен график относительной спектральной

прозрачности нитробензола в видимой и ближней инфракрасной областях оптического диапазона.

Графически модуляционная зависимость (167), характеризующая изменение интенсивности выходящего из ячейки Керра светового потока в зависимости от напряжения, приложенного к электродам конденсатора Керра, представлена на рис. 41. Для модуляции обычно используют первые (правую и левую) ветви модуляционной характеристики ячейки Керра, при этом для обеспечения наименьших нелинейных искажений, помимо гармонического модулирующего напряжения с амплитудой U_m , к электродам конденсатора прикладывается постоянное напряжение смещения U_0 (поляризующее напряжение). Оптимальные соотношения между прикладываемыми напряжениями следующие:

$$0,9 < \frac{U_0}{U_{\lambda/2}} + \frac{U_m}{U_{\lambda/2}} < 1, \quad (168)$$

$$0,55 < \frac{U_0}{U_{\lambda/2}} < 0,7, \quad (169)$$

где $U_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение, при котором $\Delta = \pi$ и $\Phi = \Phi_{\max}$.

Мгновенное напряжение u , приложенное к конденсатору Керра, определяется выражением

$$u = U_0 + U_m \cos \omega t, \quad (170)$$

где ω — частота модуляции.

Ячейка Керра одинаково хорошо обеспечивает модуляцию на фиксированных частотах и при плавном изменении частоты. Предельная, практически целесообразная, частота модуляции 30 МГц, при коэффициенте нелинейных искажений, не превышающем 5—10%, глубина модуляции может достигать 80%.

Мощность диэлектрических потерь, выделяемая в виде тепла при подаче модулирующего напряжения на конденсатор Керра, определяется по формуле

$$P = U^2 \omega c \operatorname{tg} \delta, \quad (171)$$

где U — действующее модулирующее напряжение; c — емкость конденсатора Керра; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь. Емкость конденсатора Керра может быть определена по формуле

$$c = \frac{\epsilon a l}{4 \pi d}, \quad (172)$$

где $\epsilon \approx 36,4$ — диэлектрическая постоянная нитробензола при 20°C; a — ширина электродов конденсатора Керра, см.

Значение тангенса угла диэлектрических потерь зависит от частоты модулирующего напряжения (рис. 42). При частоте

модуляции не более 30 МГц мощность диэлектрических потерь не превышает 10—15 Вт. За счет выделяемого тепла нитробензол в работающем конденсаторе Керра не замерзает при температурах до -10°C .

Для уменьшения рассеиваемой на конденсаторе Керра в виде тепла электрической мощности и коэффициента нелинейных искажений увеличивают примерно в два раза поляризующее напряжение U_0 , прикладываемое к конденсатору Керра. Тем самым обеспечивается положение исходной рабочей точки на середине прямолинейного участка второй ветви модуляцион-

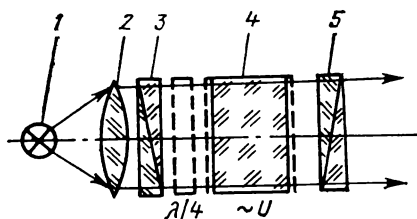


Рис. 43. Схема модуляции интенсивности светового потока при помощи кристаллического модулятора Погкельса

ной характеристики ячейки Керра (см. рис. 41) и соответственно уменьшается амплитуда U_m гармонического модулирующего напряжения. Это рекомендуется делать лишь при использовании лазерного излучения (квазимонохроматического) и при работе конденсатора Керра в более жестком режиме, чем предусмотрено в условиях (168) и (169).

Для обеспечения стабильной и эффективной работы конденсатора Керра в течение длительного времени, помимо использования химически чистого нитробензола, покрывают электроды конденсатора тонким слоем золота, принимают специальные меры при герметизации кюветы для ослабления воздействия на нитробензол резких перепадов температуры, используют конденсатор Керра при модуляции светового потока в ненапряженном режиме, соответствующем условиям (168) и (169).

К недостаткам ячейки Керра следует отнести малый коэффициент пропускания (не превышает 25—30%), резкое уменьшение электрооптической постоянной при увеличении температуры (например, при температуре $+40^{\circ}\text{C}$ она уменьшается примерно в два раза по сравнению с той, которая была при температуре $+20^{\circ}\text{C}$), высокую температуру замерзания нитробензола ($+5,6^{\circ}\text{C}$), сравнительно небольшое относительное отверстие конденсатора Керра (не превышает 1:4) и сравнительно большие абсолютные значения прикладываемых напряжений U_0 и U_m .

Модуляторы, основанные на использовании линейного электрического эффекта Погкельса в кристаллах, отличаются от ячейки Керра тем, что в них направление электрического поля

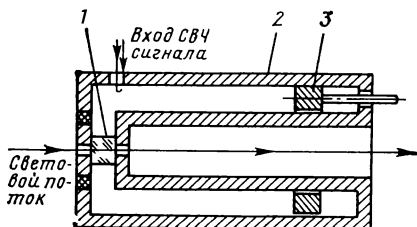
совпадает с распространением светового потока, а фазовый сдвиг между обыкновенным и необыкновенным лучами прямо пропорционален напряженности электрического поля [4, 30, 49, 63, 75]

$$\Delta = 2\pi \frac{n_0^3 r_{63} U}{\lambda_{\text{эф}} 300}, \quad (173)$$

где n_0 — показатель преломления кристалла для обыкновенного

Рис. 44. Схема кристаллического модулятора Поккельса, работающего на частотах выше нескольких сотен мегагерц:

1 — кристалл модулятора; 2 — объемный резонатор; 3 — кольцевой поршневой компенсатор



луча; r_{63} — электрооптический коэффициент; U — напряжение, приложенное к электродам — обкладкам кристалла; $\lambda_{\text{эф}}$ — эффективная длина несущих световых волн.

Схема, поясняющая действие кристаллического модулятора Поккельса, представлена на рис. 43. Световой поток, излучаемый источником 1, при помощи оптической конденсорной системы 2 формируется в параллельный пучок лучей, который, пройдя поляризатор-поляризатор 3 и будучи плоскополяризованным, попадает в кристаллический модулятор 4 с прозрачными электродами. Под действием приложенного к обкладкам кристалла напряжения он становится анизотропным, поэтому, проходящий через него плоскополяризованный световой поток становится эллиптически-поляризованным, так как колебания обыкновенного и необыкновенного лучей будут обладать разностью Δ фаз. Соответствующим взаимным ориентированием поляризатора, анализатора и кристалла-модулятора, обычно, вместо эллиптической поляризации, используют наиболее эффективную круговую поляризацию. При помощи поляроида-анализатора 5 изменения разности фаз преобразуются в изменения интенсивности выходящего светового потока.

Мгновенное значение прошедшего через модулятор светового потока при скрещенных поляроидах изменяется в зависимости от приложенного к кристаллу напряжения следующим образом:

$$\Phi = \Phi_{\text{max}} \sin^2 \frac{\Delta}{2} = \Phi_{\text{max}} \sin^2 \left(\pi \frac{n_0^3 r_{63} U}{\lambda_{\text{эф}} 300} \right), \quad (174)$$

где Φ_{max} — максимальное значение светового потока, прошедшего через кристаллический модулятор Поккельса.

Для обеспечения наименьших нелинейных искажений, помимо переменного напряжения с амплитудой $U_m \approx 0,3 U_{\lambda/2}$, прикладывается поляризующее напряжение $U_0 \approx 0,5 U_{\lambda/2}$ (где $U_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение). В кристаллическом модуляторе Поккельса благодаря линейной зависимости разности фаз обыкновенных и необыкновенных лучей от приложенного напряжения вместо поляризующего напряжения можно использовать четвертьволновую пластинку $\lambda/4$ (см. рис. 43), поставленную между поляризатором и кристаллом-модулятором (хотя это несколько уменьшает коэффициент пропускания модулятора).

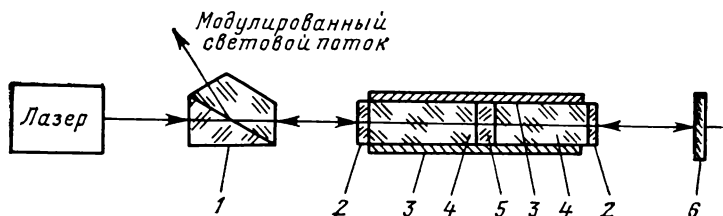


Рис. 45. Кристаллический модулятор типа ДП-663 [83]

Диаметр светового окна (или поперечный размер) кристалла d должен быть не менее чем в три раза больше диаметра пучка лучей, проходящего через него, так как фазовый сдвиг распределяется неравномерно по сечению кристалла.

Глубина модуляции при нелинейных искажениях не более 5—10% будет около 90%, коэффициент пропускания модулятора при сравнительно большом световом отверстии составит примерно 20—30%. Кристаллы могут работать в широком спектральном диапазоне — 0,25—13 мкм.

Электрооптический эффект Поккельса наблюдается в кристаллах дигидрофосфата аммония (ADP), дигидрофосфата калия (KDP), ниобата лития, ниобата бария-натрия, ниобата бария-стронция, тантала-ниобата калия, арсенида галлия, теллурида кадмия и в других кристаллах [99]. В настоящее время используют в основном первые три кристалла. Например, кристаллы KDP при $\lambda_{эф} = 0,6328$ мкм и $t = 22^\circ\text{C}$ характеризуются показателем преломления для обыкновенного луча $n_o \approx 1,46$, электрооптическим коэффициентом $r_{63} \approx 3,15 \cdot 10^{-7}$ см/в, хорошей прозрачностью в спектральном диапазоне от 0,2 до 2,1 мкм (потери 3÷4% на 1 см).

Кристаллический модулятор Поккельса одинаково хорошо обеспечивает модуляцию на фиксированных частотах и при плавном изменении частоты модуляции, предельная частота определяется частотой молекулярного резонанса, т. е. примерно

10 ГГц (глубина модуляции при этом будет порядка 20%). При частоте модуляции не более нескольких сотен мегагерц кристалл помещают между прозрачными обкладками конденсатора или в виде полосок, при более высоких частотах модуляции кристалл обычно ставят в объемный резонатор, а световой поток проходит через отверстия, являющиеся заперделными волноводами (рис. 44) [74, 92]. Потребляемая кристаллом электрическая мощность может быть определена по формуле (171), тангенс угла диэлектрических потерь, например, для кристалла KDP давен 0,007. При модуляции на максимальных частотах мощность диэлектрических потерь не превышает обычно нескольких ватт.

К недостаткам кристаллического модулятора Поккельса следует отнести сравнительно большие абсолютные значения прикладываемых напряжений U_0 и U_m , на электрооптический эффект сильно влияет изменение температуры, кристаллы ADP и KDP обладают большой гигроскопичностью [последнее практически можно исключить, если выращивать кристаллы в тяжелой воде, как например, дейтерированный дигидрофосфат (DKDP)].

Помимо продольного электрооптического эффекта, для модуляции может быть использован поперечный электрооптический эффект (направление силовых линий электрического поля перпендикулярно к направлению проходящего через модулятор потока). При этом действие модулирующего напряжения снижается пропорционально отношению d/l (d — расстояние между обкладками, l — длина кристалла по направлению светового потока) и весьма существенно влияет на процесс модуляции естественная анизотропия кристалла, для компенсации которой используют два идентичных последовательно стоящих кристаллических элемента, соответствующим образом развернутых относительно друг друга. В качестве примера рассмотрим некоторые конструктивные параметры серийно выпускаемого кристаллического модулятора типа ДП-663 (рис. 45), основанного на использовании поперечного электрооптического эффекта и предназначенного для модуляции излучения газового гелий-неонового лазера ($\lambda=0,6328$ мкм) [83]. Кварцевая фазосдвигающая пластинка $5z$ — среза (толщиной 5 мм) поворачивает плоскость поляризации проходящего плоскополяризованного светового потока на 90° . Два идентичных кристалла 4 типа KDP, стоящих последовательно друг за другом, исключают влияние естественной анизотропии. Световой поток, излучаемый лазером, проходит через кристаллы дважды, в прямом и, отразившись от зеркала 6, в обратном направлениях, при этом полуволновое напряжение может быть определено по приближенной формуле

$$U_{\lambda/2} \approx \frac{d}{l} 4380 \text{ [В]}. \quad (175)$$

Тип модулятора	Коэффициент нелинейных искажений γ , %	Глубина модуляции m , %	Коэффициент пропускания τ_m , %	Фазовая неоднородность светового потока, °	Предельная частота модуляции	Потребляемая электрическая мощность, Вт	Примечание
Дифракционный	$<(5-10)$	70 (нулевой спектр)	<70	$<\pm 3$ (на скрещен- ных волнах)	100 МГц	$<(1-2)$	Модулирование возможно только на фиксирован- ных частотах (без под- несущей)
Ячейка Керра	$<(5-10)$	80	$<(25-30)^*$	$<\pm 3$	30 МГц	$<(10-15)$	
Кристаллический модулятор Пок- кельса	$<(5-10)$	90	$<(25-40)^*$	—	10 ГГц	$<(1-2)$	На предельных частотах модуляции $m \approx 20\%$

* При использовании источников плоскополяризованного излучения, например лазеров, коэффициенты пропускания ячеек Керра и кристаллического модулятора Поккельса будут примерно в два раза больше.

При толщине кристалла вдоль направления действия электрического поля $d=3$ мм (расстояние между обкладками 3) и длине кристалла вдоль распространения светового потока $l=30$ мм (расстояние между защитной стеклянной пластинкой 2 и кварцевой фазосдвигающей пластинкой 5) $U_{\lambda/2} \approx 438$ В. В качестве поляризатора и анализатора используется интерференционный поляризатор 1. Максимальная частота для рассматриваемого модулятора около 100 МГц. Модулятор обеспечивает глубину модуляции не менее 96% при диаметре пучка лучей, поступающих в модулятор с расходимостью $\sim 10'$, не более 1,2 мм. Потери лучистой энергии при прохождении через модулятор не превышают 20—22%. Электрическая емкость модулятора $c \approx (21 \div 28)$ пФ. Следует отметить, что емкость кристалла определяет быстродействие модулятора.

Сравнительно недавно в печати появились сообщения об успешном использовании в качестве модулятора кристаллов ниобата лития [75], при этом реализуется поперечный электрооптический эффект. Применение кристалла ниобата лития, по сравнению с кристаллами типа Р, позволяет уменьшить величину модулирующего напряжения (полуволновое напряжение не превышает 180 В), кристалл значительно прочнее и негигроскопичен, меньше подвергается влиянию температур. Кристалл ниобата лития прозрачен в диапазоне от 0,3 до 6 мкм, электрическая емкость $c \approx 18—20$ пФ. Потери лучистой энергии при прохождении через модулятор не превышают 35%. Максимальная частота модуляции 4200 МГц. При частоте модуляции 470 МГц глубина модуляции $m \approx 87\%$, а потребляемая электрическая мощность около 5 Вт.

Конструктивные характеристики и параметры рассмотренных модуляторов, определяющие выбор модулятора при проектировании геодезического светодаляномера, представлены в табл. 10 (приведенные данные соответствуют частоте модуляции 15—30 МГц).

Масса и размеры рассмотренных модуляторов светового потока обычно незначительны. Модуляторы обеспечивают довольно высокую спектральную прозрачность в видимой и ближней инфракрасной областях оптического диапазона.

Следует отметить, что электрооптические модуляторы, помещенные между зеркалами оптического резонатора твердотельного или газового лазеров, могут быть использованы в качестве модулятора добротности, а модуляция добротности, по существу, является внутренней модуляцией, так же как модуляция, основанная на изменении мощности накачки. При этом необходимое модулирующее напряжение будет значительно меньше напряжения для осуществления внешней модуляции, так как необходимо лишь преобразовать линейно-поляризованный световой поток в поток со слабой эллиптической поляризацией [1].

§ 21. МОДУЛЯЦИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА ПО ПОЛЯРИЗАЦИИ

Как уже отмечалось, в электрооптических модуляторах светового потока воздействие модулирующего напряжения приводит к фазовому сдвигу между обыкновенным и необыкновенным лучами. При этом поступающий в модулятор плоскополяризованный световой поток, выходя из него, становится эллиптически-поляризованным. Таким образом, изменяя модулирующее напряжение, можно изменять поляризационные свойства выходящего из модулятора светового потока, т. е. осуществить модуляцию по поляризации [54, 129, 135]. Характерной особенностью модуляции по поляризации является постоянство интенсивности светового потока.

Практическая реализация этого вида модуляции возможна, например, в фазовых геодезических светодальномерах, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом и в качестве модулятора и демодулятора используются идентичные конденсаторы Керра 3 и 4, работающие синхронно и синфазно (рис. 46) (или когда оптическая схема приемопередатчика светодальномера является автоколлимационной и один и тот же конденсатор Керра выполняет роль модулятора и демодулятора). Вместо конденсаторов Керра возможно использование двух идентичных кристаллических модуляторов Погкельса.

Используя формулы (165), (166) и (170), мгновенное значение Δ_m разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами светового потока, выходящего из конденсатора Керра — модулятора, можно представить следующим образом:

$$\Delta_m = 2\pi Bl \left[\frac{(U_0 + U_m \cos \omega t)}{300d} \right]^2, \quad (176)$$

где U_0 — поляризующее напряжение; U_m — амплитуда модулирующего напряжения; ω — частота модуляции; t — текущее время; d — расстояние между электродами конденсатора Керра.

Для более эффективного использования модулятора конденсатор Керра ориентируют так, чтобы направление электрического поля было под углом 45° к плоскости поляризации поляроида-поляризатора ($\beta = 45^\circ$). В этом случае выходящий из конденсатора Керра световой поток будет иметь круговую поляризацию. При выборе значений напряжений U_0 и U_m вместо условий (168) и (169) целесообразно учитывать другие условия [54]:

$$0,5 < \frac{U_0}{U_{\lambda/2}} < 0,7, \quad (177)$$

$$0,5 < \frac{U_m}{U_{\lambda/2}} < 0,7. \quad (178)$$

Прежде чем попасть во второй конденсатор Керра — демодулятор, модулированный световой поток проходит двойное измеряемое расстояние, поэтому мгновенное значение Δ_d допол-

нительной разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами, получаемой в конденсаторе Керра—демодуляторе, с учетом формулы (176), будет

$$\Delta_d = 2\pi B l \left[\frac{U_0 + U_m \cos(\omega t + \varphi)}{300d} \right]^2, \quad (179)$$

где φ — разность фаз принимаемого и излучаемого световых потоков.

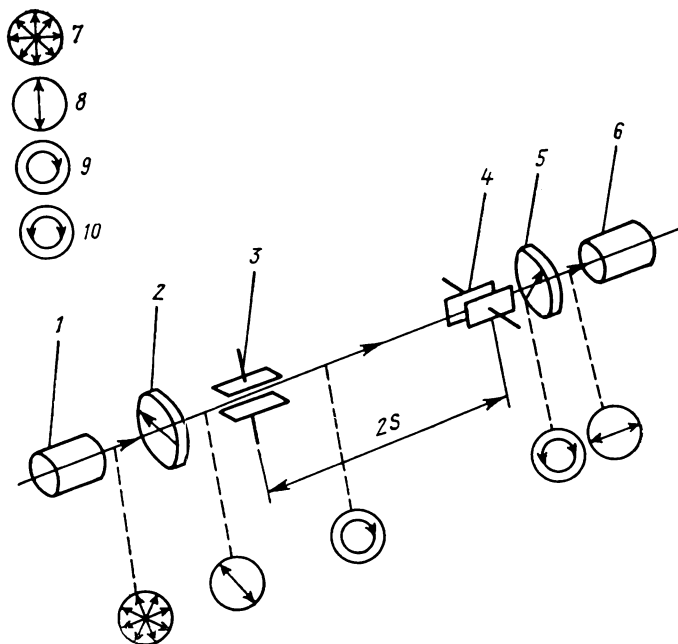


Рис. 46. Схема использования модуляции и демодуляции светового потока по поляризации для измерения разности фаз в геодезическом светодальномере:

1 — источник излучения; 2 — поляризатор; 3 — конденсатор Керра—модулятор; 4 — конденсатор Керра—демодулятор; 5 — анализатор; 6 — приемник излучения; 7 — естественный световой поток; 8 — плоская (линейная) поляризация; 9 — круговая поляризация; 10 — круговая поляризация (два направления циркуляции)

Для получения информации об изменениях измеряемой разности фаз φ в зависимости от интенсивности светового потока, поступающего в приемник излучения, между конденсатором Керра—демодулятором 4 и приемником излучения 6 необходимо поставить поляризатор-анализатор 5 (см. рис. 46), и обеспечить условия, при которых мгновенные фазовые сдвиги Δ_m и Δ_d между обыкновенным и необыкновенным лучами, определяемые по формулам (176) и (178), были противоположны по знаку. Для получения противоположного по знаку фазового сдвига в

конденсаторе Керра — демодуляторе надо либо установить его так, чтобы направление электрического поля было перпендикулярно к направлению электрического поля в конденсаторе Керра — модуляторе (рис. 47), либо между этими конденсаторами Керра поставить фазосдвигающую полуволновую пластинку. В обоих случаях будет обеспечиваться противоположное направление круговой поляризации в конденсаторе Керра — демодуляторе.

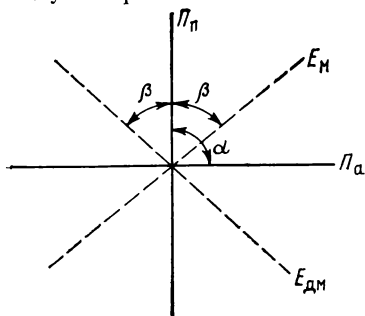
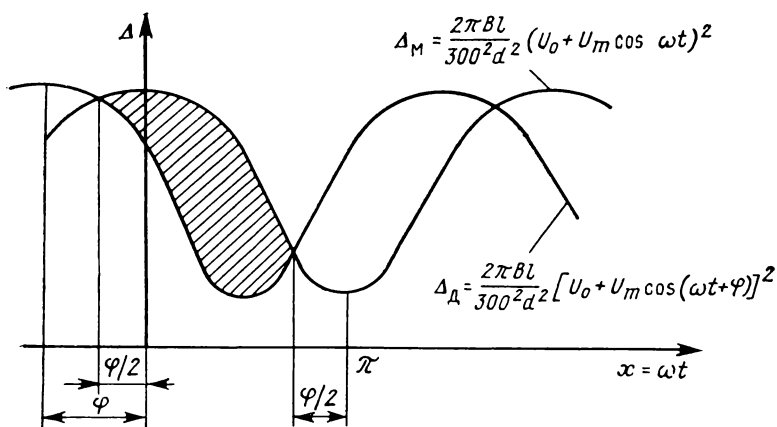


Рис. 47. Схема взаимного ориентирования плоскостей поляризации P_n и P_a поляризатора и анализатора, электрических полей E_M и E_{DM} конденсатора Керра — модулятора и конденсатора Керра — демодулятора

Рис. 48. Графики, имитирующие процесс взаимной компенсации воздействий модулирующего и демодулирующего конденсаторов Керра на световой поток



При разности фаз ϕ излучаемого и принимаемого модулированных световых потоков, равной нулю, выражения (176) и (179) будут идентичны, но противоположны по знаку, т. е. конденсатор Керра — демодулятор полностью компенсирует модулирующее воздействие на световой поток конденсатора Керра — модулятора. Поступающий к поляризатору-анализатору световой поток будет плоскополяризованным, причем плоскость поляризации его, заданная поляризатором-анализатором, будет перпендикулярна к плоскости поляризации поляризатора-анализатора, следовательно, этот поток будет погашен и в приемник излучения не попадет. Во всех других случаях, когда $\phi \neq 0$, некомпенсированное мгновенное значение разности $(\Delta_M - \Delta_D)$ приве-

дет к тому, что световой поток будет проходить через поляроид-анализатор и поступать в приемник излучения.

Определим значение $\Delta_{\text{ср}}$ нескомпенсированной разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами, которое определяет величину светового потока, поступающего в приемник излучения [66] (рис. 48):

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{2\pi Bl}{300^2 d^2} \int_{-\frac{\varphi}{2}}^{\pi - \frac{\varphi}{2}} (\Delta_{\text{м}} - \Delta_{\text{п}}) dx =$$

$$= \frac{2\pi Bl}{300^2 d^2} \int_{-\frac{\varphi}{2}}^{\pi - \frac{\varphi}{2}} \{(U_0 + U_m \cos x)^2 - [U_0 + U_m \cos(x + \varphi)]^2\} dx, \quad (180)$$

где $x = \omega t$. Выполнив несложные математические вычисления и преобразования, получим

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{16Bl\pi}{300^2 d^2} U_0 U_m \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (181)$$

На рис. 48 заштрихован участок, площадь которого пропорциональна среднеинтегральному значению нескомпенсированной разности фаз $\Delta_{\text{ср}}$ между обыкновенным и необыкновенным лучами.

Схема, представленная на рис. 46, соответствует схеме ячейки Керра, только конденсатор Керра имеет две пары взаимно перпендикулярных электродов, отстоящих друг от друга на расстоянии 2 с. Поэтому, учитывая формулы (157), (165) и (181), получаем выражение, определяющее среднеинтегральное значение светового потока $\Phi_{\text{ср}}$, поступающего в приемник излучения,

$$\Phi_{\text{ср}} = \Phi_{\text{ист}} \tau_{\text{м}}^2 K \sin^2 \left(\frac{8\pi Bl U_0 U_m}{300^2 d^2} \sin \frac{\varphi}{2} \right), \quad (182)$$

где $\Phi_{\text{ист}}$ — поток, излучаемый источником; $\tau_{\text{м}}$ — коэффициент пропускания каждого из конденсаторов Керра; K — коэффициент, учитывающий потери лучистой энергии при прохождении светового потока в приемеопередатчике, отражателе и в атмосфере.

Выбором напряжений U_0 и U_m обеспечивают выполнение условий (177) и (178), при которых динамический диапазон $\Phi_{\text{пф}}$ поступающего в приемник излучения светового потока, несущий информацию об измеряемой разности фаз φ , будет

$$\Phi_{\text{пф}} = \Phi_{\text{ср max}} = \Phi_{\text{ист}} \tau_{\text{м}}^2 K. \quad (183)$$

Из выражения (182) видно, что при изменении разности фаз φ излучаемого и принимаемого световых потоков будет наблю-

даться изменение светового потока $\Phi_{\text{ср}}$, поступающего в приемник излучения. При рассмотрении этого выражения, представленного графически на рис. 49, можно заметить, что минимумы у кривой значительно острее максимумов. Поэтому при индикации определенной разности фаз, которая необходима при измерении разности фаз компенсационным способом, обычно фиксируют минимальную интенсивность поступающего в прием-

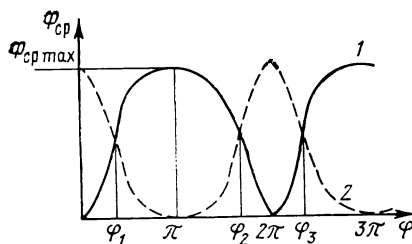


Рис. 49. Графические зависимости интенсивности светового потока, поступающего в приемник излучения от разности фаз при индикации определенной разности фаз компенсационным способом экстремума:

1 — конденсаторы Керра работают синхронно и синфазно; 2 — конденсаторы Керра работают синхронно и противофазно

ник излучения светового потока, что соответствует разности фаз $\varphi_0 = 0$. Принято называть этот способ индикации определенной разности фаз компенсационным способом экстремума (КСЭ). Следует отметить, что в этом случае полностью взаимно компенсируется влияние нелинейных искажений, вносимых конденсаторами Керра, поэтому при выборе конкретных значений напряжений U_0 и U_m возможны отступления от условий (170). Если же в качестве модулятора и демодулятора используется один и тот же конденсатор Керра, практически полностью исключается влияние фазовых искажений, вносимых конденсатором Керра.

Преимущества компенсационного способа индикации определенной разности фаз, заключающиеся в отсутствии влияния нелинейных искажений, вносимых при модуляции и демодуляции, являются доминирующими при осуществлении модуляции и демодуляции на частотах выше нескольких сотен мегагерц, когда резко возрастают нелинейные искажения, падает глубина модуляции и невозможно осуществить демодуляцию непосредственно в фотоэлектрическом приемнике.

Формула (181) выведена при предположении, что конденсаторы Керра строго идентичны, точно выполнены условия ориентирования по схеме, изображенной на рис. 47, поляризатор и анализатор полностью поляризуют проходящий через них световой поток. Все неучтенные факторы приведут лишь к тому, что минимальный световой поток, поступающий в приемник излучения при $\varphi = 0$, не будет равен нулю, т. е. незначительно уменьшится динамический диапазон потока $\Phi_{\text{ср}}$.

Применение модуляции светового потока по поляризации вместо модуляции интенсивности в геодезических светодальномерах позволяет более эффективно использовать излучаемый

источником световой поток, т. е. в этом случае динамический диапазон $\Phi_{\text{пф}}$ светового потока, поступающего в приемник излучения и несущего информацию об измеряемой разности фаз φ , будет равен максимальному значению потока (183).

Если те же конденсаторы Керра (см. рис. 46), поставив между ними третий поляризатор, использовать для осуществления модуляции и демодуляции интенсивности светового потока, то в этом случае динамический диапазон, определяемый по формуле (158), будет примерно в пять раз меньше.

§ 22. ИНДИКАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕННОЙ РАЗНОСТИ ФАЗ ИЗЛУЧАЕМОГО И ПРИНИМАЕМОГО МОДУЛИРОВАННЫХ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ

В геодезических светодальномерах, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом, прежде чем взять отсчет по шкале фазовращателя (или оптической линии задержки, или генератора модулирующего электрического сигнала переменной частоты), соответствующий измеряемой разности фаз φ , необходимо осуществить индикацию определенной разности фаз φ_0 .

При модуляции и демодуляции интенсивности светового потока среднеинтегральное значение потока $\Phi_{\text{ср}}$, поступающего в приемник излучения, определяется по формуле (157). Графически зависимость этого потока от разности фаз φ представлена на рис. 37, на котором приведены два графика: первый соответствует синхронному и синфазному действию модулятора и демодулятора, второй — когда модулятор и демодулятор действуют в противофазе и синхронно. Следовательно, фиксируя определенные значения потока $\Phi_{\text{ср}}$, можно осуществлять индикацию определенной разности фаз φ_0 . В настоящее время известны и используют в геодезических светодальномерах следующие способы индикации определенной разности фаз [134].

При фиксировании максимальных значений светового потока $\Phi_{\text{ср}}$ осуществляется индикация определенной разности фаз $\varphi_0 = \pi 2N$ (модулятор и демодулятор синхронны и синфазны). Этот способ называют способом максимума. При фиксировании минимальных значений (индикация определенной разности фаз способом минимума) $\varphi_0 = \pi (2N + 1)$, в обоих случаях $N = 0; 1; 2 \dots$.

Для гарантирования нормальных условий работы светодальномера необходимо, чтобы максимальное значение светового потока, определяемого по формуле (159) и равное

$$\Phi_{\text{ср max}} = \Phi_{\text{ист}} \frac{\tau_m \tau_d \max K [(2 - m)(2 - m_d) + 0,5mm_d]}{4(1 + \gamma)(1 + \gamma_d)}, \quad (184)$$

не превышало светового потока Φ_{max} , соответствующего верхней границе линейного участка световой характеристики приемника излучения, но было значительно больше светового потока

от фона $\Phi_{\text{ф}}$ и приведенного к этим условиям порогового светового потока $\Phi'_{\text{пор}}$. Допустим, что при измерении интенсивности светового потока, поступающего в приемник излучения (см. рис. 37), во всем динамическом диапазоне $\Phi_{\text{пф}}$, определяемом по формуле (158), значение порогового светового потока постоянно, следовательно,

$$\Phi'_{\text{пор}} \approx K_{\text{к}} \Phi_{\text{ср max}}, \quad (185)$$

где $K_{\text{к}}$ — контрастная чувствительность приемника излучения.

Таким образом, при изменении разности фаз принимаемого и излучаемого модулированных световых потоков на угол $3m_{\text{ф}_0}$, равный предельной погрешности индикации определенной разности фаз каким-либо способом, изменение светового потока, поступающего в приемник излучения, равно пороговому световому потоку (3 — коэффициент, учитывающий переход от предельного к среднему квадратическому значению погрешности).

Например, при индикации определенной разности фаз каким-либо из экстремальных способов (способом максимума или минимума)

$$\Phi'_{\text{пор}} = \frac{\Phi_{\text{пф}}}{2} (1 - \cos 3m_{\text{ф}_0}), \quad (186)$$

где $\frac{\Phi_{\text{пф}}}{2}$ — амплитуда переменной составляющей светового потока, поступающего в приемник излучения, которая равна половине динамического диапазона (158).

Учитывая формулы (158) и (185), а также то, что $K_{\text{к}} \ll 1$, и при небольших значениях $m_{\text{ф}_0}$, $\cos 3m_{\text{ф}_0} \approx \sqrt{1 - \left(\frac{3m_{\text{ф}_0}}{\rho^0}\right)^2}$, преобразовав зависимость (186), получим

$$\begin{aligned} m_{\text{ф}_0} &= \frac{2\rho^0}{3} \sqrt{K_{\text{к}} \left[0,5 + \frac{(2-m)(2-m_{\text{д}})}{mm_{\text{д}}} \right]} \approx \\ &\approx 38^\circ \sqrt{K_{\text{к}} \left[0,5 + \frac{(2-m)(2-m_{\text{д}})}{mm_{\text{д}}} \right]}, \end{aligned} \quad (187)$$

где ρ^0 — угол, равный 1 рад и выраженный в градусах.

При максимальных значениях глубин модуляции и демодуляции, когда $m = m_{\text{д}} = 1$, выражение (187) несколько упростится:

$$m_{\text{ф}_0} = \frac{2\rho^0 \sqrt{1,5 K_{\text{к}}}}{3} \approx 47^\circ \sqrt{K_{\text{к}}}. \quad (188)$$

При индикации определенной разности фаз каким-либо из парафазно-балансных (нулевых) способов используются обе зависимости 1 и 2 (см. рис. 37) либо разделенные в пространстве (способ «сравнений»), либо во времени (способы «нулевой» и «мерцаний»). Фиксируют моменты, когда значения сигналов,

соответствующие обоим графикам, равны, а определенная разность фаз $\varphi_0 = \frac{\pi}{2} (2N + 1)$. Разделение во времени, выполняемое при помощи специального фазового переключателя, должно вестись для исключения влияния флуктуаций атмосферы на частоте не менее 100 Гц.

Погрешность индикации определенной разности фаз каким-либо из парафазно-балансных способов может быть определена по формуле

$$m_{\varphi_0} = \frac{1}{3} \arcsin \left(\frac{\Phi'_{\text{пор}}}{2 \cdot 0,5 \Phi_{\text{пф}}} \right) \approx \frac{\Phi'_{\text{пор}} \rho^\circ}{3 \Phi_{\text{пф}}}, \quad (189)$$

где 2 — коэффициент, учитывающий одновременное одинаковое но противоположное по знаку, изменение интенсивностей световых потоков, принимаемых источником излучения и соответствующих графикам 1 и 2 (см. рис. 37); 3 — коэффициент, учитывающий переход от предельной к средней квадратической погрешности индикации.

Учитывая формулы (158) и (185) и преобразуя зависимость (189), получаем выражение, определяющее погрешность индикации определенной разности фаз каким-либо из парафазно-балансных способов,

$$m_{\varphi_0} \approx \rho^\circ \frac{K_K}{3} \left[0,5 + \frac{(2 - m)(2 - m_d)}{m m_d} \right], \quad (190)$$

а при $m = m_d = 1$

$$m_{\varphi_0} \approx 29^\circ K_K.$$

Выведенные зависимости (187) и (190) показывают, что погрешности индикации определенной разности фаз зависят от контрастной чувствительности приемника излучения и от глубин модуляции и демодуляции. Кроме того, индикация парафазно-балансными способами значительно точнее индикации экстремальными способами.

В светодаальномерах, в которых используется модуляция светового потока по поляризации и разность фаз измеряется компенсационным способом, индикация определенной разности фаз, как уже отмечалось, может быть осуществлена компенсационным способом экстремума. При этом фиксируют минимальные значения светового потока $\Phi_{\text{ср}}$ (см. рис. 49), поступающего в приемник излучения и характеризующегося зависимостью (182), которые соответствуют определенной разности фаз $\varphi_0 = \pi 2N$.

При индикации определенной разности фаз компенсационным способом, учитывая ранее сделанные предпосылки и формулу (182), пороговый световой поток

$$\Phi'_{\text{пор}} = \Phi_{\text{ист}} \tau_m^2 K \sin^2 \left(\frac{8\pi B U_0 U_m}{300^2 d^2} \sin \frac{6m_{\varphi_0}}{2} \right), \quad (191)$$

где 3 — коэффициент, учитывающий переход от предельной к средней квадратической погрешности индикации.

Учитывая формулы (182) и (185), а также то, что

$$\frac{8\pi B U_0 U_m}{300^2 d^2} = \pi \frac{k}{2} \quad \text{и} \quad \sin \frac{m_{\varphi_0}}{0,67} \approx \frac{m_{\varphi_0}}{0,67\rho^\circ},$$

и преобразуя зависимость (191), получаем

$$K_{\kappa} = \sin^2 \left(\frac{\pi k m_{\varphi_0}}{1,2\rho^\circ} \right), \quad (192)$$

где $1 < k < 1,4$ — коэффициент, зависящий от выбора напряжений U_0 и U_m с учетом зависимостей (177) и (178).

Учитывая, что

$$\sin^2 \left(\frac{\pi k m_{\varphi_0}}{1,3\rho^\circ} \right) \approx \left[\frac{\pi k m_{\varphi_0}}{1,3(\rho^\circ)^2} \right]^2,$$

благодаря малой величине угла

$$\frac{\pi k m_{\varphi_0}}{1,3\rho^\circ}$$

и преобразовывая зависимость (192), получаем выражение, определяющее погрешность индикации определенной разности фаз компенсационным способом экстремума,

$$m_{\varphi_0} \approx \frac{24^\circ \sqrt{K_{\kappa}}}{k}. \quad (193)$$

При модуляции светового потока по поляризации возможно осуществление индикации определенной разности фаз балансным компенсационным способом. Например, при индикации определенной разности фаз нулевым способом, предложенным Ф. П. Носковым [78], используют обе зависимости 1 и 2 (см. рис. 49) и фиксируют моменты (подобно тому, как это делается в парафазно-балансных способах при модуляции светового потока по интенсивности) равенства световых потоков, соответствующих обоим графикам. В этом случае фиксируемые разности фаз φ_1 и φ_2 и т. д. постоянны, но неизвестны, так как зависят от глубины модуляции и режимов работы конденсаторов Керра. Поскольку они располагаются симметрично относительно значений, соответствующих определенным разностям фаз φ_0 , следовательно,

$$\varphi_0 = \pi 2N = \frac{\varphi_2 + \varphi_3}{2} \quad (194)$$

или

$$\varphi_0 = \pi (2N + 1) = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}.$$

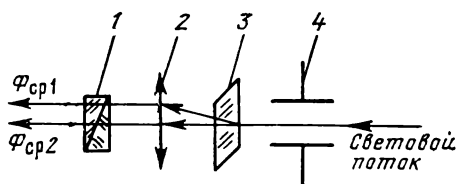
Следует отметить, что наибольшая точность индикации будет, когда равенство сравниваемых потоков получается при их значении, равном $0,5 \Phi_{\text{ср max}}$, что соответствует фиксированию разности фаз

$$\varphi_i = \frac{\pi}{4} (2N + 1).$$

Для осуществления индикации определенной разности фаз нулевым способом Ф. П. Носкова анализатор в схеме, представленной на рис. 46, заменяют двойным анализатором (рис. 50),

Рис. 50. Схема насадки для индикации определенной разности фаз нулевым способом, предложенным Ф. П. Носковым:

1 — анализатор; 2 — линзовая система; 3 — пластинка исландского шпата; 4 — конденсатор Керра-де-модулятор



состоящим из тонкой пластинки исландского шпата 2 и поляроида 1.

Интересен балансный компенсационный способ индикации определенной разности фаз, предложенный В. Ф. Хомазой и В. П. Васильевым [116]. В этом способе плавно изменяющаяся модулирующая частота попеременно резко увеличивается и уменьшается на определенную величину Δf (зависящую от измеряемого расстояния), соответственно изменяя на постоянную величину $\Delta \varphi$ разность фаз излучаемых и принимаемых модулированных световых потоков. При равенстве световых потоков $\Phi_{\text{ср1}}$ и $\Phi_{\text{ср2}}$, поступающих в приемник излучения, расположенных симметрично относительно $\Phi_{\text{ср min}}$ и соответствующих увеличенной и уменьшенной частотам модуляции, плавное изменение частоты прекращается и фиксируется непосредственно определенная разность фаз $\varphi_0 = \pi 2N$ (сравниваемые световые потоки разделены во времени), поэтому этот способ индикации точнее способа, предложенного Ф. П. Носковым, в $\sqrt{2}$ раз.

Погрешность m_{φ_0} однократной индикации определенной разности фаз балансным компенсационным способом, предложенным В. Ф. Хомазой и В. П. Васильевым, можно определить, преобразовав нижеприведенную зависимость ($\Delta \varphi = 60^\circ$)

$$\Phi'_{\text{пор}} = k \Phi_{\text{ср max}} \left\{ \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \sin \left(\frac{60^\circ - 3m_{\varphi_0}}{2} \right) \right] - \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \sin \frac{60^\circ}{2} \right) \right\},$$

учитывая выражение (185), после несложных преобразований получим

$$m_{\phi_0} \approx 57^\circ \frac{K_k}{k}. \quad (195)$$

Например, как показали результаты полевых исследований [134], при визуальном наблюдении погрешность индикации определенной разности фаз одним приемом для компенсационного способа экстремума примерно равна 3° и для балансного способа Ф. П. Носкова — $1,5^\circ$ (каждый прием состоял из двукратного подхода к фиксируемому значению интенсивности наблюдаемого потока «слева» и двукратному подходу «справа»).

ТАБЛИЦА 11

Вид модуляции светового потока	Способ индикации определенной разности фаз	Погрешность однократной индикации m_{ϕ_0}
По интенсивности	Экстремальный Парафазно-балансный	13 1,5
По поляризации	Компенсационный способ экстремума Балансный компенсационный способ, предложенный В. Ф. Хомазой и В. П. Васильевым	3,5 1,4

Для более наглядного сравнения рассмотренных способов индикации определенной разности в табл. 11 приведены вычисленные по формулам (187), (190), (193) и (195) погрешности однократной индикации при условии, что контрастная чувствительность приемника излучения $K_k = 3\%$, глубины модуляции и демодуляции $m \approx m_d \approx 0,8$ и коэффициент, зависящий от режимов работы конденсаторов Керра при осуществлении модуляции светового потока по поляризации, $k = 1,2$ (эти условия соответствуют визуальному приему в оптимальных условиях и когда в качестве модулятора и демодулятора используют идентичные конденсаторы Керра).

Следует отметить, что расчетные значения погрешностей индикации достаточно хорошо согласуются с ранее приведенными значениями погрешностей индикации, полученными из результатов полевых измерений.

Сравнительный анализ различных способов индикации определенной разности фаз принимаемого и излучаемого модулированных световых потоков позволяет сделать следующие выводы.

Наиболее точными способами индикации определенной разности фаз являются балансный компенсационный и парафазно-балансный способы. Точность индикации определяется не только способом, но и контрастной чувствительностью приемника

излучения. При индикации определенной разности фаз объективными приемниками излучения, обладающими большей контрастной чувствительностью, чем глаз наблюдателя, погрешности могут быть соответственно уменьшены. Например, при использовании фотоэлектронного умножителя, контрастная чувствительность которого может достигать 0,05%, они уменьшаются примерно на порядок. Поэтому в геодезических светодальномерах целесообразно использовать фотоэлектрические приемники излучения.

Реализация необходимой контрастной чувствительности приемника излучения при индикации определенной разности фаз требует, чтобы максимальное значение принимаемого модулированного светового потока $\Phi_{\text{п max}}$, поступающего в приемник излучения, удовлетворяло условию

$$\Phi_{\text{max}} > \Phi_{\text{п max}} \geq \frac{\Phi'_{\text{пор}}}{K_{\text{к}}}, \quad (196)$$

где $\Phi'_{\text{пор}}$ — пороговый световой поток, определяемый в зависимости от условий по формулам (88), (92), (93) и (98); Φ_{max} — максимальный световой поток, соответствующий верхней границе линейного участка световой характеристики приемника излучения.

Обычно методика измерений предусматривает для повышения точности и исключения систематических погрешностей несколько индикаций определенной разности фаз в приеме, а программа измерений может состоять из нескольких приемов (особенно быстро выполняется сложная программа измерений при работе светодальномера в автоматическом режиме). Следовательно, окончательная погрешность индикации определенной разности фаз будет существенно меньше погрешности одной индикации.

ВЫБОР И РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО СВЕТОДАЛЬНОМЕРА

§ 23. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО СВЕТОДАЛЬНОМЕРА

Оптические конструктивные элементы светодальномера и отражателя служат в основном для обеспечения наиболее эффективного использования излучаемого источником светового потока и для гарантирования возможности измерения максимальных расстояний с заданной точностью в условиях фоновых помех.

Потери лучистой энергии, определяемые отношением потока $\Phi_{\text{п}}$, несущего измерительную информацию и принимаемого приемником, к потоку $\Phi_{\text{ист}}$, излучаемому источником, может быть представлена выражением [71, 73]

$$\frac{\Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{ист}}} = K_{\text{пер}} K_{\text{отр}} K_{\text{пр}} K_{\text{а}} \tau_{\text{а}}^{2S}, \quad (197)$$

где $K_{\text{пер}}$, $K_{\text{отр}}$ и $K_{\text{пр}}$ — коэффициенты эффективности передающей оптической системы светодальномера, отражателя и приемной оптической системы светодальномера соответственно; $K_{\text{а}}$ — коэффициент, учитывающий ослабление светового потока вследствие турбулентности атмосферы; $\tau_{\text{а}}$ — коэффициент пропускания атмосферы; S — измеряемое расстояние.

Значения коэффициентов $K_{\text{а}}$ и $\tau_{\text{а}}$ для различных условий измерений и длин волн излучения были приведены ранее в гл. III.

Причинами энергетических потерь, уменьшающих эффективность того или иного оптического тракта светодальномера, могут быть виньетирование, потери на поглощение при прохождении различных оптических сред, потери при отражении и преломлении и другие потери. Передающая оптическая система светодальномера, помимо источника излучения 1 и объектива 4, формирующего узконаправленный лучистый поток, в случае внешней модуляции включает в себя модулятор 3 и специальную конденсорную оптическую систему 2, служащую для согласования источника излучения с модулятором (рис. 51).

Коэффициент эффективности передающей оптической системы светодальномера, в которой осуществляется внешнее мо-

дулирование интенсивности излучаемого потока, может быть представлен следующим образом:

$$K_{\text{пер}} = K_{\text{ист}} \tau_{\text{к}} \tau_{\text{м}} \tau_{\text{оп}} \frac{m}{2(1 + \gamma)}, \quad (198)$$

где $K_{\text{ист}}$ — коэффициент использования источника излучения; $\tau_{\text{к}}$, $\tau_{\text{м}}$ и $\tau_{\text{оп}}$ — коэффициенты пропускания конденсорной оптической системы, модулятора и объектива передающей оптической системы соответственно; m — глубина модуляции; γ — коэффициент нелинейных искажений, вносимых модулятором.

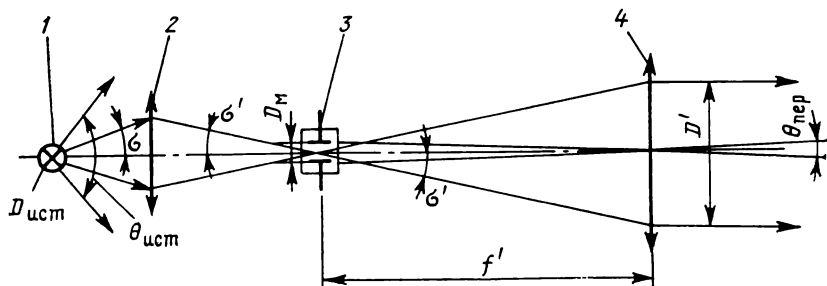


Рис. 51. Обобщенная оптическая схема передающей оптической системы геодезического светодальномера

Излучаемый передающей оптической системой активного отражателя (при измерении расстояния светодальномером с активным отражателем) световой поток может быть модулирован по интенсивности дважды. В этом случае коэффициент эффективности передающей оптической системы будет определяться по формуле

$$K_{\text{пер}} = K_{\text{ист}} \tau_{\text{к}} \tau_{\text{м}} \tau_{\text{оп}} \frac{m(2 - m_2)}{4(1 + \gamma)}, \quad (199)$$

где m_2 — глубина модуляции, обеспечиваемая при дополнительной модуляции.

Когда излучаемый передающей оптической системой световой поток модулирован по поляризации, ее коэффициент эффективности определяется выражением

$$K_{\text{пер}} = K_{\text{ист}} \tau_{\text{к}} \tau_{\text{м}} \tau_{\text{оп}}. \quad (200)$$

Конструктивные параметры ($\tau_{\text{м}}$, m и γ) модуляторов светового потока приведены в табл. 10, а коэффициенты пропускания оптических систем могут быть определены по известной обобщенной формуле

$$\tau = \tau_{\text{оп}}^{S_{\text{оп}}} \tau_n^{N_n} \tau_o^{N_o}, \quad (201)$$

где $\tau_{\text{оп}}$ — коэффициент прозрачности оптической детали (коэф-

коэффициент прозрачности оптического стекла $\sim 0,99$); $S_{\text{оп}}$ — длина пути, проходимо-го световым потоком в оптической детали, см; τ_n — коэффициент, учитывающий потери на отражение при преломлении (для «просветленных» преломляющих поверхностей $\tau_n \approx 0,98 \div 0,99$); N_n — число преломляющих поверхностей; τ_o — коэффициент, учитывающий потери на поглощение при отражении (для диэлектрического зеркального покрытия $\tau_o \approx 0,98 \div 0,99$); N_o — число отражающих поверхностей.

Поскольку излучаемый источником световой поток, согласно закону Ламберта,

$$\Phi_{\text{ист}} = \pi L_{\text{ист}} S_{\text{ист}}, \quad (202)$$

где $L_{\text{ист}}$ — яркость источника; π — телесный угол, в котором происходит излучение; $S_{\text{ист}}$ — площадь излучающего участка источника, то коэффициент $K_{\text{ист}}$ использования источника определяется неполным использованием телесного угла, в котором происходит излучение, и площади излучающего участка источника

$$K_{\text{ист}} = \frac{\Omega_n}{\pi} \cdot \frac{S_n}{S_{\text{ист}}}, \quad (203)$$

где Ω_n и S_n — используемые в действительности телесный угол и площадь излучающего участка источника соответственно.

Изображение излучающего участка поверхности источника при помощи конденсорной оптической системы с увеличением β_k строится в плоскости действующей диафрагмы модулятора. При этом выходной апертурный угол $2\sigma'$ конденсорной системы должен быть не менее относительного отверстия модулятора или объектива (см. рис. 51), следовательно,

$$\frac{\Omega_n}{\pi} \approx \frac{4\sigma'^2}{\theta_{\text{ист}}^2} = \frac{D'^2 \beta_k^2}{\theta_{\text{ист}}^2 f'^2}, \quad (204)$$

где $2\sigma' = 2\sigma' \beta_k$ — угол «охвата» конденсорной оптической системы; $2\sigma' = \frac{D'}{f'}$ — выходной апертурный угол конденсорной системы, равный относительному отверстию объектива; D' — диаметр выходного зрачка светодальномера (диаметр светового отверстия объектива передающей оптической системы светодальномера); $\theta_{\text{ист}}$ — расходимость светового потока, излучаемого источником; f' — фокусное расстояние объектива передающей оптической системы светодальномера.

При этом предполагается, что изображение излучающего участка поверхности источника полностью заполнит площадь S_M действующего отверстия модулятора

$$S_{\text{ист}} \beta_k^2 > S_M, \quad (205)$$

следовательно, виньетирование, вносимое модулятором, будет определять значение отношения $S_n : S_{\text{ист}}$ (см. рис. 51):

$$\frac{S_{\text{и}}}{S_{\text{ист}}} = \frac{S_{\text{м}}}{S_{\text{ист}}\beta_{\text{к}}^2} = \frac{D_{\text{м}}^2}{D_{\text{ист}}^2\beta_{\text{к}}^2}, \quad (206)$$

где $D_{\text{м}}$ — диаметр действующего отверстия модулятора; $D_{\text{ист}}$ — диаметр излучающего участка источника.

Итак, учитывая выражения (198), (203), (206), коэффициент эффективности передающей оптической системы светодиальноме-

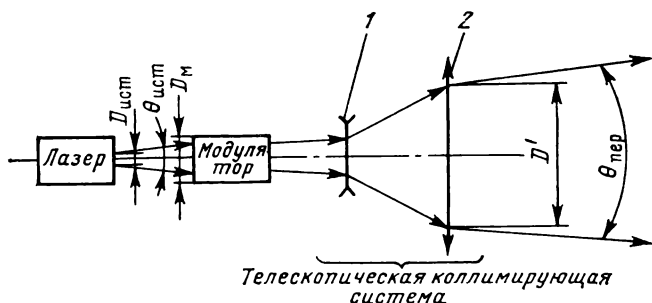


Рис. 52. Оптическая схема передающей оптической системы геодезического светодиальномера, в которой источником излучения служит лазер

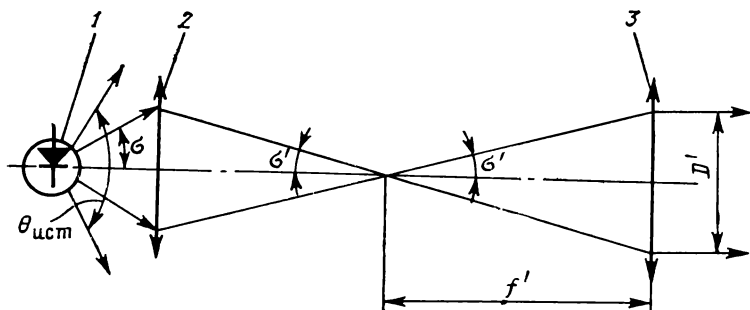


Рис. 53. Оптическая схема передающей оптической системы геодезического светодиальномера, в которой источником излучения является светодиод:

1 — светодиод; 2 — конденсор; 3 — объектив

ра при осуществлении однократной модуляции интенсивности излучаемого светового потока может быть определен по формуле

$$K_{\text{пер}} = \tau_{\text{к}}\tau_{\text{оп}}\tau_{\text{м}} \frac{D_{\text{м}}^2 D'^2 m}{2\theta_{\text{ист}}^2 D_{\text{ист}}^2 (1 + \gamma)}. \quad (207)$$

Когда источником излучения является лазер, вместо объектива передающей оптической системы используют телескопическую коллимирующую систему, состоящую из отрицательной

линзы 1 и объектива 2 (рис. 52). Световой поток, излучаемый лазером, поступает в коллимирующую оптическую систему, пройдя модулятор. Выражение, определяющее коэффициент эффективности передающей оптической системы светодальномера, в этом случае при $D_m \geq D_{ист}$ существенно упростится

$$K_{пер} = \tau_m \tau_t \frac{m}{2(1 + \gamma)}, \quad (208)$$

где τ_t — коэффициент пропускания телескопической коллимирующей системы.

Наиболее целесообразным модулятором при применении лазера является кристаллический модулятор, основанный на использовании линейного электрооптического эффекта Погккельса.

При использовании внутренней модуляции интенсивности лазерного излучения, например, в полупроводниковом лазере, из схемы, представленной на рис. 52, исключается модулятор, а следовательно, изменится формула (208)

$$K_{пер} = \tau_t (1 + m) m, \quad (209)$$

где m — глубина модуляции.

Коэффициент эффективности передающей оптической системы светодальномера, когда в качестве источника и модулятора используется светодиод 1, а излучаемый световой поток формируется в узконаправленный конденсором 2 и объективом 3 (рис. 53), будет

$$K_{пер} \approx \tau_k \tau_{оп} \frac{D'^2 \beta_k^2 (1 + m) m}{\theta_{ист}^2 f'^2}, \quad (210)$$

где β_k — увеличение конденсора.

Увеличение коэффициента эффективности передающей оптической системы светодальномера в $(1 + m)$ раз (или максимального значения интенсивности излучаемого светового потока) при осуществлении внутренней модуляции в полупроводниковом лазере (или светодиоде) происходит за счет соответствующего увеличения динамического диапазона изменения плотности тока, протекающего через зону $p-n$ перехода. При этом среднеинтегральное за период частоты модуляции значение плотности тока равно плотности тока до осуществления внутренней модуляции, а мгновенное максимальное значение не превышает предельного значения, соответствующего насыщению или разрушению зоны $p-n$ перехода.

Как уже отмечалось, для согласования конструктивных параметров источника излучения и модулятора в передающей оптической системе светодальномера устанавливают конденсор. Для использования всей площади выходного зрачка необходимо, чтобы выходной апертурный угол $2\sigma'$ (см. рис. 51) был несколько больше относительного отверстия объектива, а пе-

редний апертурный угол 2σ (угол охвата) стремятся сделать примерно равным расходимости источника излучения. Следует пояснить, что с увеличением переднего апертурного угла усложняется конструкция конденсора. Обычно при расчете конденсоров не осуществляют тщательную абберрационную коррекцию, так как абберрации конденсора не влияют на формирование излучаемого светодальномером пучка лучей, а лишь перераспределяют энергию в плоскости входного зрачка модулятора. Конденсорная система светодальномера, в котором источником излучения является светодиод, используется обычно для повышения эффективности светодиода и для уменьшения влияния фазовой неоднородности излучаемого светового потока, так как создает изображение излучающей площадки светодиода в выходном зрачке объектива передающей оптической системы.

Приняв действующее отверстие модулятора (или приведенную светящуюся площадку источника, когда $D_{\text{ист}} \beta_k < D_m$) находящегося в передней фокальной плоскости объектива передающей оптической системы светодальномера, за расчетный источник излучения, можно рассматривать объектив как прожекторную систему, формирующую излучаемый световой поток с расходимостью $\theta_{\text{пер}}$ (это расходимость пучка, измеряемая по уровню половинной интенсивности),

$$\theta_{\text{пер}} = \sqrt{\left(\frac{D_m}{f'}\right)^2 + \left(\frac{\alpha}{\rho''}\right)^2 + \left(\frac{2,44\lambda_{\text{эф}}}{D'}\right)^2}, \quad (211)$$

где ρ'' — угол, равный 1 рад и выраженный в угловых секундах.

Первое слагаемое подкоренного выражения (211) характеризует влияние поперечных размеров приведенного источника излучения, второе — влияние суммарной угловой абберрации α объектива передающей оптической системы светодальномера, третье — влияние дифракции (предполагается, что влияние всех слагаемых носит случайный характер).

При этом не учитывается влияние турбулентции атмосферы, которое, как отмечалось ранее, при прохождении пучком лучей расстояний более 10 км может привести к дополнительной расходимости пучка, достигающей нескольких десятков угловых секунд.

Минимальное значение расходимости $\theta_{\text{пер}}$ определяется стабильностью взаимного ориентирования светодальномера и отражателя и влиянием быстродействующей переменной составляющей атмосферной рефракции на направление распространения светового потока.

Действительное значение расходимости $\theta_{\text{пер}}$ в реальных передающих оптических системах значительно больше минимального, как правило, равно

$$\theta_{\text{пер}} = \frac{D_m}{f'}, \quad (212)$$

для выполнения этого условия исправляют aberrации объектива до пренебрегаемо малого влияния их, т. е.

$$\alpha < \frac{1}{3} \frac{D_m}{f'} \rho''.$$
 (213)

Когда в оптической схеме передающей системы светодальномера отсутствует модулятор, например при использовании в качестве источника излучения светодиода, обеспечивающего внутреннюю модуляцию, в формуле (211) диаметр D_m действующего отверстия модулятора следует заменить диаметром $D_{ист}$ излучающей площадки светодиода. Но поскольку излучающая площадка светодиода имеет прямоугольную форму, необходимо учитывать два взаимно перпендикулярных плоских угла расхождения излучаемого светодальномером светового потока.

В геодезических светодальномерах обычно используют сравнительно узкий спектральный диапазон излучения, поэтому необходимо уменьшать влияние только монохроматических aberrаций, в основном сферической, значение которой прямо пропорционально кубу относительно отверстия объектива $D:f'$ и зависит от конструкции объектива. Например, для двухлинзового объектива и зеркального сферического объектива (зеркальные и зеркально-линзовые объективы обычно применяются в светодальномерах, когда диаметр светового отверстия объектива порядка 100 мм и более) [59, 118]

$$\alpha_{сф} \geq 0,008 \left(\frac{D}{f'} \right)^3 \rho''.$$
 (214)

Для обеспечения максимальной и равномерной облученности в плоскости отражателя, что одновременно приводит и к выравниванию фазовой структуры модулированного излучаемого светового потока, помимо исправления сферической aberrации, должно быть выполнено условие синусов [111]. Однако полностью исправить сферическую aberrацию практически нельзя, поэтому еще должно быть выполнено условие изопланатизма. Кривая отступления от условия изопланатизма при этом должна иметь тот же характер, что и кривая остаточной сферической aberrации.

Для лучшего формирования излучаемого светового потока плоскость светящейся площадки приведенного источника излучения должна находиться в плоскости наилучшей фокусировки, тогда на расстоянии $S_{0,пер}$ от объектива 2 соберутся лучи, вышедшие из всех точек приведенного источника излучения (рис. 54). Это расстояние называется дистанцией оформления пучка и определяется по формуле

$$S_{0,пер} = \frac{D'}{\theta_{пер}} \approx \frac{D'}{D_m} f'.$$
 (215)

При использовании лазера в качестве источника излучения и специальной коллимирующей телескопической системы для формирования излучаемого потока (см. рис. 52) расходимость $\theta_{\text{пер}}$ можно определить так:

$$\theta_{\text{пер}} = \sqrt{(\theta_{\text{ист}} \Gamma_T)^2 + \left(\frac{\alpha}{\rho''}\right)^2}, \quad (216)$$

где увеличение Γ_T телескопической коллимирующей системы будет

$$\Gamma_T = \frac{D_{\text{ист}}}{D'}. \quad (217)$$

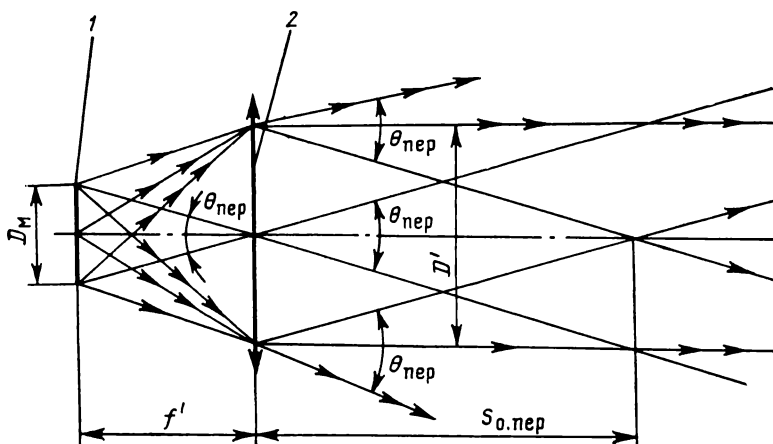


Рис. 54. Схема формирования излучаемого светодальномером светового потока:

1 — плоскость наилучшей фокусировки; 2 — объектив передающей оптической системы

Если угловая сферическая абберация телескопической коллимирующей системы не превышает $1/3 \theta_{\text{пер}}$, расходимость излучаемого светодальномером потока будет

$$\theta_{\text{пер}} \approx \theta_{\text{ист}} \Gamma_T = \frac{\theta_{\text{ист}} D_{\text{ист}}}{D'}. \quad (218)$$

Поскольку излучаемый пучок лучей имеет своеобразную структуру, не являясь ни гомоцентрическим, ни пучком параллельных лучей, габаритный расчет телескопической коллимирующей системы отличается от расчета обычных оптических систем [50].

Учитывая неравномерное распределение энергии по сечению излучаемого светового потока, ориентирование светодальномера относительно отражателя выполняют с погрешностью, не превышающей $0,2 \theta_{\text{пер}}$.

В визуальных светодальномерах обычно в качестве ориентирующего визирного устройства используют приемную оптическую систему светодальномера. В светодальномерах с фотоэлектрическим приемником оно обычно в виде самостоятельного узла, но в качестве объектива этого устройства может быть использован объектив передающей либо приемной оптической системы светодальномера.

При измерении расстояний более нескольких километров визирное устройство используют не только для ориентирования светодальномера относительно отражателя, но и для быстрого поиска и обнаружения отражателя. В этом случае увеличение визирного устройства следует определять по формуле

$$\Gamma_{\tau} \geq \frac{P_{\Gamma}'' S}{\rho'' D_{\text{отр}}}, \quad (219)$$

где P_{Γ}'' — разрешающая способность невооруженного глаза наблюдателя; S — измеряемое расстояние; $D_{\text{отр}}$ — диаметр, характеризующий размеры отражателя (или другого объекта визирования).

При незначительных значениях расходимости излучаемого светодальномером потока (порядка 1' и менее) иногда для облегчения процесса отыскания отражателя и наведения на него светодальномера, что особенно важно в вечернее и ночное время, при помощи специальных вводимых астигматоров увеличивают расходимость $\theta_{\text{пер}}$ (до нескольких десятков минут).

Итак, анализ различных оптических схем передающей оптической системы геодезического светодальномера позволил вывести обобщенные формулы, определяющие энергетическую эффективность системы и расходимость выходящего из нее модулированного светового потока, а также определить основные технические требования, которым должны удовлетворять конструктивные элементы системы, и допустимую погрешность ориентирования системы относительно отражателя.

§ 24. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЯ

В качестве пассивных отражателей, устанавливаемых на противоположном от геодезического светодальномера конце измеряемого расстояния, обычно используют зеркально-линзовый отражатель или отражатель в виде призмного тетраэдра (трипельпризмы), которые изготавливают в виде мозаики из N элементов. Следует отметить, что многоэлементный мозаичный отражатель при суммарной площади действующей поверхности «светосбора», равной действующей поверхности одноэлементного отражателя, обеспечивает более равномерную облученность в плоскости входного зрачка светодальномера и меньшую расходимость отраженного потока, так как каждый элемент мозаичного отражателя, действуя независимо друг от друга,

направляет отраженный поток обратно в передающую оптическую систему светодальномера [111].

Оптическая схема многоэлементного (мозаичного) зеркально-линзового отражателя представлена на рис. 55. Зеркально-линзовый элемент состоит из объектива 1 с диаметром $D_{эл}$ действующей поверхности (диаметром входного и выходного зрачка) и фокусным расстоянием f' и плоского зеркала 2, отражающая поверхность которого совпадает с фокальной плоскостью объектива. Вместо объектива может быть использовано

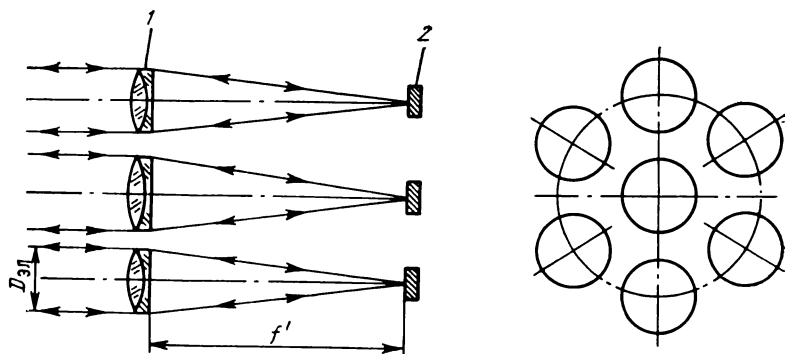


Рис. 55. Оптическая схема многоэлементного (мозаичного) зеркально-линзового отражателя

сферическое зеркало Манжена с двумя неконцентрическими поверхностями. Зеркально-линзовый отражатель необходимо ориентировать относительно светодальномера с погрешностью не более нескольких угловых минут. Например, погрешность ориентирования отражателя, равная $10'$, приведет к 4%-ному вынестированию светового потока.

Трипельпризма — элемент призмленного мозаичного отражателя (рис. 56), имеет три взаимно перпендикулярные отражающие грани и входную грань в виде правильного шестиугольника. Основной характерной особенностью трипельпризмы является то, что световые лучи, упавшие на входную грань, после поочередного отражения от трех отражающих граней выходят из призмы в направлении, обратном и параллельном первоначальному. При этом, если лучи падают под углом 90° к поверхности входной грани, то все они проходят в призме вне зависимости от места падения одинаковый путь $l \leq 1,36 D_{эл}$ (равный удвоенной длине перпендикуляра, опущенного из вершины призмы на плоскость входной грани).

Следует отметить, что падающий на входную грань трипельпризмы пучок световых лучей в призме в действительности проходит в виде шести составляющих пучков, эквивалентный диаметр $D'_{эл}$ которых

$$D'_{\text{эл}} = \frac{D_{\text{эл}}}{\sqrt{6}}. \quad (220)$$

Трипельпризму можно ориентировать относительно светодальномера довольно грубо, но для обеспечения пренебрегаемых малых изменений постоянной поправки светодальномера и действующей площади входного зрачка следует ориентировать ее с погрешностью не более 1° [82, 97].

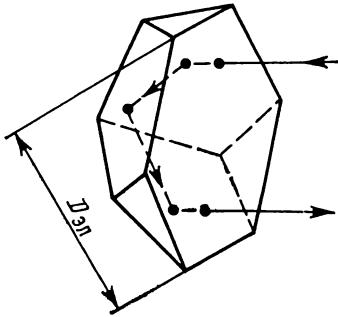


Рис. 56. Трипельпризма

Следует отметить, что при отражении светового потока, модулированного по поляризации, отражающие грани трипельпризмы должны быть зеркальными, чтобы исключить деполаризацию, возникающую при полном внутреннем отражении. Однако в этом случае коэффициент пропускания трипельпризмы соответственно уменьшится.

Число элементов мозаичного отражателя определяют в зависимости от условий, необходимых для нормального функционирования светодальномера. Диаметр $D_{\text{отр}}$ эквивалентного входного зрачка мозаичного отражателя определяется выражением

$$D_{\text{отр}} = \sqrt{N} D_{\text{эл}}, \quad (221)$$

где N — число элементов.

Освещенность E (облученность) в плоскости входного зрачка отражателя, с учетом формулы (197), может быть определена уравнением

$$E = \frac{4\Phi_{\text{ист}} K_{\text{пер}} \tau_a^S}{\pi (\theta_{\text{пер}} S)^2}. \quad (222)$$

При измерении расстояний, значительно больших расстояния $S_{0, \text{пер}}$ дистанционного оформления пучка, и при условии, что энергия в сечении пучка распределяется равномерно и диаметр входного зрачка отражателя $D_{\text{отр}} < S\theta_{\text{пер}}$, коэффициент эффективности отражателя можно определить по формуле

$$K_{\text{отр}} = \frac{\tau_{\text{отр}} N D_{\text{эл}}^2}{\theta_{\text{пер}}^2 S^2}, \quad (223)$$

где $\tau_{\text{отр}}$ — коэффициент пропускания отражателя, учитывающий потери в отражателе.

Когда при измерении расстояния светодальномером выполняется условие $D_{\text{отр}} \geq S\theta_{\text{пер}}$, т. е. диаметр пучка лучей излучаемого светодальномером светового потока не превышает в плос-

кости отражателя диаметра входного зрачка отражателя, виньетирования пучка нет, тогда $K_{отр} = \tau_{отр}$. Например, условие $D_{отр} \geq S\theta_{пер}$ можно выполнить при измерении расстояний до нескольких километров при использовании лазеров и телескопической коллимирующей системы в передающей оптической системе светодаляномера, обеспечивающих $\theta_{пер} \leq 10''$, и когда входной зрачок отражателя $D_{отр} \geq D'$.

В действительности энергия в сечении падающего на отражатель светового потока распределяется неравномерно, однако закон распределения, определяемый влиянием многих случайных факторов, непостоянен и заранее, как правило, неизвестен. Если предположить, что энергия линейно убывает от центра потока к периферии, при точном совмещении оси падающего потока с центром входного зрачка отражателя в числитель формулы (223) следует ввести коэффициент-множитель $\left(2 - \frac{D_{отр}}{\theta_{пер}S}\right)$, учитывающий неравномерное распределение энергии в сечении пучка.

Расходимость отраженного светового потока можно определить по формуле

$$\theta_{отр} = \sqrt{\theta_{отр1}^2 + \theta_{отр2}^2}, \quad (224)$$

где $\theta_{отр1} \approx \frac{D_{эл}}{S}$ — расходимость попадающих на отражательный элемент лучей; $\theta_{отр2}$ — расходимость, вызванная погрешностями изготовления отражательного элемента.

Для зеркально-линзового отражательного элемента расходимость $\theta_{отр2}$ будет определяться расфокусировкой линзы, ее абберациями и децентрировкой, наклоном и клиновидностью зеркал и т. д. Суммарная расходимость, выраженная в секундах, при соблюдении необходимых технологических и конструктивных требований, а также при относительном отверстии линзовой системы не более 1:5 обычно не превышает 30''.

Для трипельпризмы угол расхождения $\theta_{отр2}$ в основном определяется погрешностью Δ_α изготовления двугранных прямоугольных углов [97] (допуск на волнистость и сферичность граней обычно не более одной интерференционной полосы):

$$\theta_{отр2} \approx 2 \cdot 3,3 \cdot n \Delta_\alpha \quad (225)$$

или, если показатель преломления стекла, из которого изготовлена трипельпризма, $n \approx 1,5$,

$$\theta_{отр2} \approx 10 \Delta_\alpha. \quad (226)$$

Практически можно обеспечить при изготовлении трипельпризмы $\Delta_\alpha \geq 1''$, следовательно, минимальная расходимость, выраженная в секундах, $\theta_{отр2} \approx 10''$.

Обычно при измерении расстояний свыше нескольких километров выполняется условие $\theta_{отр1} \leq \frac{1}{3} \theta_{отр2}$, следовательно, в этом случае

$$\theta_{отр} \approx \theta_{отр2}, \quad (227)$$

т. е. расходимость отраженного светового потока определяется только погрешностями изготовления отражательного элемента.

По аналогии с передающей оптической системой светодальномера [см. формулу (215)] дистанцию оформления отраженного пучка лучей можно определить по формуле

$$S_{о.отр} \approx \frac{D_{эл}}{\theta_{отр}}. \quad (228)$$

В настоящее время, например, при использовании в качестве источника излучения геодезического светодальномера лазера, обеспечивающего мощный излучаемый световой поток, имеется возможность измерять расстояния без отражателя, в локационном режиме. В этом случае отражателем является диффузионно рассеивающая поверхность какого-либо объекта, расположенная перпендикулярно к направлению распространения излучаемого светодальномером светового потока (например, стена здания, поверхность земли, плоскость рейки и т. д.). Диффузионно рассеянное отражение возникает, если размеры неровностей отражающей поверхности больше длины световой волны. Оно характерно тем, что телесный угол, в котором распространяется отраженный световой поток, равен π и он значительно больше телесного угла, в котором сосредоточен падающий на отражающую поверхность световой поток.

В этом случае яркость L (или лучистость) освещенной (облученной) поверхности, согласно закону Ламберта, может быть определена так:

$$L = \rho \frac{E}{\pi}, \quad (229)$$

где ρ — коэффициент отражения (Альбедо), который иногда называют коэффициентом яркости; E — освещенность отражающей поверхности, определяемая по формуле (222).

Значения коэффициентов отражения для некоторых плоских поверхностей приведены в табл. 12, при этом предполагается, что длина волны светового потока, излучаемого светодальномером, $\lambda_{эф} \approx 0,56$ мкм (в видимой и ближней инфракрасной областях оптического диапазона они практически те же).

Когда диаметр $D_{отр}$ плоской отражающей шероховатой поверхности больше диаметра ($\theta_{пер} S$) кружка, освещенного световым потоком, излучаемого светодальномером, коэффициент эффективности использования светового потока при отражении

$$K_{\text{отр}} = \rho, \quad (230)$$

а действующий диаметр $D'_{\text{отр}}$ отражателя

$$D'_{\text{отр}} = \theta_{\text{пер}} S. \quad (231)$$

Когда же $D_{\text{отр}} < \theta_{\text{пер}} S$, коэффициент эффективности

$$K_{\text{отр}} = \frac{\rho D_{\text{отр}}^2}{\theta_{\text{пер}}^2 S^2}. \quad (232)$$

ТАБЛИЦА 12

Поверхность	Коэффициент отражения (Альбедо)	Поверхность	Коэффициент отражения (Альбедо)
Фанера, строганая доска	0,40	Снег	0,80
Матовое хромирование (никелирование)	0,50	Песок, земля	0,15
Матовое серебрение	0,75	Белая краска	0,70
Оксид магния	0,96	Защитная краска	0,15
Вода	0,06		

При использовании в качестве диффузионно отражающей поверхности плоской поверхности какого-либо объекта, покрытой окисью магния, можно обеспечить максимальное значение коэффициента отражения ($\rho \approx 0,96$). Если сравнить коэффициент эффективности мозаичного отражателя, определяемый по формуле (222), и диффузионно отражающей плоской поверхности той же площади, определяемой по формуле (232), коэффициент эффективности диффузионно отражающей поверхности может быть не меньше коэффициента эффективности мозаичного отражателя. Однако плотность отраженного светового потока на единицу телесного угла будет при этом в K раз меньше,

$$K = \frac{\theta_{\text{отр}}^2}{\pi}, \quad (233)$$

где $\theta_{\text{отр}}$ — расходимость отраженного от мозаичного отражателя светового потока. Например, если $\theta_{\text{отр}} = 10''$, то $K \approx 7,5 \cdot 10^{-10}$.

Итак, анализ оптических схем отражателей, применяемых в геодезических светодальномерах, показал, что оптимальной для геодезических светодальномеров является схема мозаичного отражателя, состоящего из трипельпризменных элементов. Приведенные обобщенные формулы позволяют определять энергетическую эффективность отражателя и расходимость отраженного светового потока, а также основные технологические допуски при изготовлении призмных элементов.

§ 25. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИЕМНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЕТОДАЛЬНОМЕРА

Приемная оптическая система функционально и конструктивно связана с передающей оптической системой, поэтому оптическая схема приемопередатчика геодезического светодальномера включает в себя обе эти системы. Оптические схемы приемопередатчиков можно поделить на две основные группы: первая — б и а к с и а л ь н а я, когда оптические оси передающей и приемной оптических систем разнесены и параллельны, вторая — к о а к с и а л ь н а я, когда оптические оси передающей и приемной оптических систем совмещены. В тех случаях, когда оптические оси передающего и приемного трактов светодальномера параллельны (отклонение от параллельности не должно превышать $0,2\theta_{\text{пер}}$), для гарантирования попадания отраженного светового потока во входной зрачок светодальномера необходимо, чтобы

$$D' + 2\Delta < \theta_{\text{отр}} S_{\text{min}}, \quad (234)$$

где S_{min} — минимальное измеряемое расстояние; Δ — расстояние между оптическими осями передающей и приемной оптических систем.

Кроме того, при измерении расстояний менее 1 км светодальномером с биаксиальной оптической системой возможно смещение изображения отражателя в поле зрения приемной оптической системы, приводящее к резкому увеличению влияния фазовости принимаемого потока и демодулятора на результат измерения.

Для исключения отмеченных недостатков принимают различные конструктивные меры, например, прикрепляют к каждой трипельпризме мозаичного отражателя специальные клиновые оптические компенсаторы или выбирают диаметр $D_{\text{эл}}$ одноэлементного призмного отражателя несколько больше расстояния между оптическими осями передающей и приемной оптических систем светодальномера. Однако эти решения приводят или к существенному усложнению конструкции отражателя, или к значительному увеличению размеров трипельпризмы. Поэтому в подавляющем большинстве светодальномеров, предназначенных для измерения расстояний до 1—2 км, используют коаксиальную оптическую схему приемопередатчика.

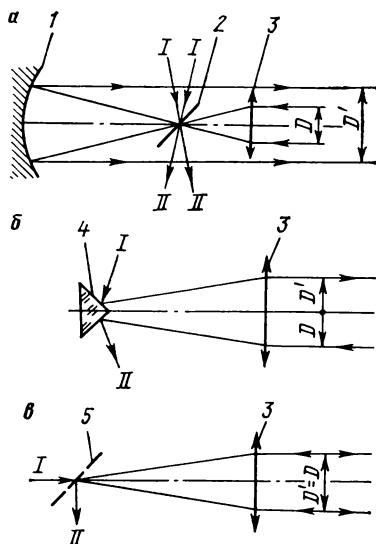
Возможны различные варианты коаксиальных оптических схем приемопередатчика. Например, можно выполнить выходной зрачок передающей системы светодальномера (или наоборот входной) в виде кольца, внутренний диаметр которого является диаметром входного зрачка приемной оптической системы (рис. 57, а).

Можно использовать в качестве выходного и входного зрач-

ков светодальномера половинки одного и того же объектива 3 (см. рис. 57, б), разделение передающей и приемной оптических систем светодальномера по полю зрения осуществляется при помощи двугранного зеркала.

Рис. 57. Варианты коаксиальных оптических схем приемопередатчика светодальномера:

а — зеркально-линзовая система; б — система с разделенными зрачком и полем; в — автоколлимационная система; 1 — зеркальный объектив передающей оптической системы; 2 — тонкое двустороннее плоское зеркало; 3 — объектив приемной оптической системы; 4 — двугранное зеркало; 5 — полупрозрачное зеркало; I — световой поток, идущий от источника излучения; II — световой поток, идущий к приемнику излучения



Можно выполнить передающую и приемную оптические системы светодальномера по автоколлимационной схеме (см. рис. 57, в), при этом объектив 3 является общим для передающей и приемной систем, а разделение осуществляется при помощи полупрозрачного зеркала 5.

Оптимальной из рассмотренных оптических систем является зеркально-линзовая коаксиальная система, поскольку обеспечивает полное использование выходного и входного зрачков (у зеркальных объективов зрачок всегда в виде кольца) и гарантирует четкое пространственное разделение излучаемого и принимаемого световых потоков.

Одним из интересных конструктивных решений коаксиальной оптической схемы приемопередатчика светодальномера является автоколлимационная оптическая схема визуального светодальномера «Кристалл» [111]. В этой схеме разделение излучаемого и принимаемого световых потоков осуществляется по плоскостям поляризации при помощи специального биполяроида 5 (рис. 58). При этом обеспечивается абсолютная идентичность передающего и приемного трактов, так как в них использованы одни и те же объектив 9 и конденсатор Керра 7. Индикация определенной разности фаз осуществляется компенсационным способом экстремума, поворот плоскости поляризации принимаемого светового потока на 90° , по сравнению

с излучаемым, осуществляется за счет двойного прохождения его через четвертьволновую пластинку 8.

Оптические схемы приемопередатчиков некоторых геодезических светодальномеров приведены в монографии Г. А. Фельдмана [111].

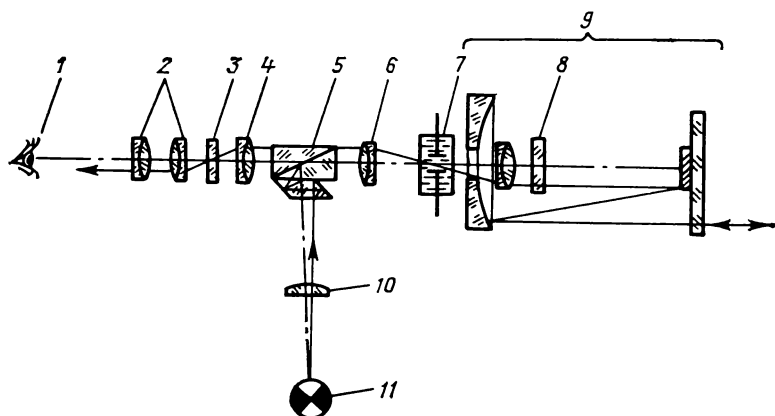


Рис. 58. Коаксиальная оптическая схема приемопередатчика светодальномера «Кристалл»:

1 — глаз наблюдателя; 2 — окуляр; 3 — шкала частотомера; 4 и 6 — линзовые системы; 5 — биполяриод; 7 — конденсатор Керра; 8 — четвертьволновая пластинка; 9 — зеркально-линзовый объектив; 10 — конденсатор; 11 — источник излучения

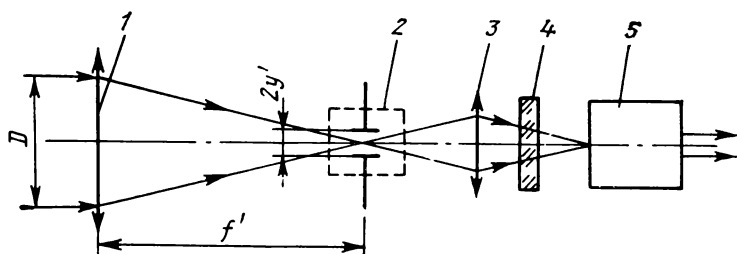


Рис. 59. Обобщенная оптическая схема приемной оптической системы геодезического светодальномера

Приемная оптическая система геодезического светодальномера, обобщенная оптическая схема которой представлена на рис. 59, обычно состоит из следующих основных элементов: объектива 1, демодулятора 2, линзовой согласующей системы 3, светофильтра 4 и приемника излучения 5.

В визуальных светодальномерах приемная оптическая система подобна зрительной трубе, только сетка нитей заменена демодулятором. Для более эффективного использования глаза наблюдателя необходимо, чтобы диаметр D входного

зрачка приемной оптической системы светодальномера был не менее диаметра D_r зрачка глаза. Следует отметить, что при дневных измерениях $D_r \approx 2$ мм, при сумеречных — 4 мм и ночью — 6 мм.

При использовании фотоэлектрических приемников излучения в подавляющем большинстве геодезических светодальномеров схема приемной оптической системы упрощена, так как отсутствует демодулятор — его функции выполняет приемник излучения. Нет демодулятора и в оптических схемах приемной оптической системы фазовых светодальномеров, в которых разность фаз измеряется непосредственно, и в импульсных светодальномерах.

Диаметр D входного зрачка приемной оптической системы светодальномера с точки зрения уменьшения влияния фона должен быть не более диаметра D' выходного зрачка передающей оптической системы, так как с увеличением диаметра входного зрачка возрастают одновременно полезный и фоновый потоки, а при увеличении диаметра выходного зрачка — только полезный поток. Но с увеличением диаметра входного зрачка светодальномера уменьшается влияние флуктуаций интенсивности принимаемого светового потока, вызванных турбуленцией атмосферы, следовательно, увеличится и интенсивность принимаемого светового потока. Влияние атмосферы сильно сказывается при измерении расстояний более нескольких десятков километров, поэтому в этих случаях обычно выбирают диаметр входного зрачка не менее 50 мм, что, например, при приеме немодулированного лазерного излучения с длиной волны 0,6328 мкм обеспечивает прием не менее 50% энергии потока [17, 89], т. е. коэффициент, учитывающий влияние турбуленции, $K_a \approx 0,5$.

При использовании коаксиальных оптических схем приемопередатчика светодальномера с разделенными пополам зрачком и полем (см. рис. 57, б) и автоколлимационных оптических систем (см. рис. 57, в), а также в импульсных светодальномерах, применяемых в спутниковой геодезии, в которых при помощи специального электронно-оптического переключателя один и тот же объектив используется в качестве выходного и входного зрачков светодальномера, диаметр D' выходного зрачка передающей оптической системы равен диаметру D входного зрачка приемной оптической системы светодальномера.

Аберрационная коррекция объектива приемной оптической системы светодальномера выполняется обычно менее тщательно, чем для объектива передающей оптической системы. Это обстоятельство объясняется тем, что требуемое качество изображения в этом случае определяется только необходимым контрастом и четкостью границы, разделяющей изображение отражателя от фона. Суммарная угловая аберрация α объек-

тива приемной оптической системы должна удовлетворять условию

$$\alpha \leq 0,2 (2\omega), \quad (235)$$

где 2ω — угловое поле приемной оптической системы. Поэтому относительное отверстие объектива приемной оптической системы может быть больше относительного отверстия объектива передающей оптической системы светодальномера.

Угловое поле приемной оптической системы светодальномера (см. рис. 59) определяется следующей зависимостью:

$$2\omega = 2\arctg \frac{y'}{f'}, \quad (236)$$

где $2y'$ — линейное поле приемной оптической системы; f' — фокусное расстояние объектива приемной оптической системы.

В приемной оптической системе светодальномера с демодулятором полевой диафрагмой является входное окно демодулятора, следовательно,

$$2y' = D'_d,$$

где D'_d — диаметр входного окна демодулятора.

В приемных оптических системах светодальномера без демодулятора линейное поле выбирают с учетом одновременного обеспечения достаточно хорошей пространственной селекции принимаемого светового потока и исключения влияния случайной рефракции атмосферы. В то же время оно не может быть меньше диаметра $D'_{отр}$ изображения отражателя в фокальной плоскости объектива приемной оптической системы светодальномера, который определяется по формуле

$$D'_{отр} = f' \sqrt{N \left(\frac{D_{эл}}{S} \right)^2 + \left(\frac{\alpha}{\rho''} \right)^2}, \quad (237)$$

где S — измеряемое расстояние; α — суммарная угловая абберация объектива приемной оптической системы; N — число элементов мозаичного отражателя; $D_{эл}$ — диаметр входного (и выходного) зрачка отражательного элемента; f' — фокусное расстояние объектива приемной оптической системы.

Специальная оптическая система 3 (см. рис. 59) обеспечивает согласование диаметра $D'_{отр}$ изображения отражателя с оптимальным диаметром D_o освещенного пятна в плоскости чувствительной зоны приемника излучения и выравнивает освещенность в пределах этого пятна. В качестве такой оптической системы может быть использована, например, линзовая система (или волоконно-оптический светопровод или конический световод), увеличение $\beta_{л.с}$ этой системы определяется по формуле

$$\beta_{л.с} = \frac{D_o}{D'_{отр}}. \quad (238)$$

Величина D_0 определяется выбором оптимального размера наиболее чувствительного участка фотоэлектрического приемника, обладающего к тому же, если фотоэлектрический приемник является демодулятором, достаточно хорошей фазовой стабильностью и однородностью. Например, для большинства фотоэлектронных умножителей, применяемых в светодальномерах, $D_0 \approx (0,6 \div 2,0)$ мм.

Светофильтр 4 (см. рис. 59) применяют для обеспечения спектральной селекции отраженного принимаемого светового потока от фоновоего потока. Когда используют узкополосные интерференционные светофильтры, то для создания пучка параллельных лучей, необходимого для работы интерференционного светофильтра, несколько усложняют линзовую систему 3 [2, 98, 114].

Освещенность E , создаваемую отраженным световым потоком в плоскости входного зрачка приемной оптической системы светодальномера, учитывая формулу (197), можно определить следующим образом:

$$E = \frac{4\Phi_{\text{ист}}K_{\text{пер}}K_{\text{отр}}K_a\tau_a^2S}{\pi\theta_{\text{отр}}^2S^2}, \quad (239)$$

где $\frac{\pi}{4}\theta_{\text{отр}}^2S^2$ — площадь освещенного отраженным световым потоком кружка в плоскости входного зрачка приемной оптической системы.

Коэффициент $K_{\text{пр}}$ эффективности приемной оптической системы фазового геодезического светодальномера, в котором разность фаз измеряется компенсационным способом (т. е. коэффициент, учитывающий ослабление светового потока, несущего информацию об измеряемой разности фаз, в приемной оптической системе) и принимаемый световой поток модулирован по интенсивности, можно определить по формуле (при условии, что энергия в сечении пучка распределяется равномерно и что измеряемое расстояние значительно больше дистанции оформления пучка $S_{0.\text{отр}}$)

$$K_{\text{пр}} = \tau_0\tau_d\tau_f\tau_{\text{л.с}} \frac{m_d D^2}{2(1 + \gamma_d)\theta_{\text{отр}}^2S^2}, \quad (240)$$

где τ_0 , τ_d , τ_f и $\tau_{\text{л.с}}$ — коэффициенты пропускания объектива 1 приемной оптической системы светодальномера, демодулятора 2, светофильтра 4 и линзовой системы 3, согласующей размеры изображения отражателя с оптимальными размерами чувствительной площадки приемника излучения 5 соответственно (см. рис. 59); m_d и γ_d — глубина и коэффициент нелинейных искажений при демодуляции.

Поскольку угловое поле приемной оптической системы светодальномера в подавляющем большинстве случаев больше

расходимости излучаемого передающей оптической системой светового потока

$$2\omega > \theta_{\text{пер}}, \quad (241)$$

то при работе светодальномера в локационном режиме коэффициент эффективности приемной оптической системы с учетом формулы (240) будет определяться зависимостью

$$K_{\text{пр}} = \tau_0 \tau_d \tau_{\text{ф}} \tau_{\text{л.с}} \frac{m_d D^2}{8(1 + \gamma_d) S^2}, \quad (242)$$

т. е. диффузионно рассеивающее отражение происходит в телесном угле, равном π , а приемная оптическая система собирает только часть отраженного светового потока, ограниченного телесным углом $\pi D^2 : 4 S^2$.

Когда же при измерении расстояния светодальномером выполняется условие $D \geq \theta_{\text{отр}} S$, т. е. диаметр пучка лучей отраженного светового потока в плоскости входного зрачка приемной оптической системы не превышает диаметра входного зрачка, виньетирования пучка нет, тогда формула (240) изменится:

$$K_{\text{пр}} = \tau_0 \tau_d \tau_{\text{ф}} \tau_{\text{л.с}} \frac{m_d}{2(1 + \gamma_d)}. \quad (243)$$

Например, условие $D \geq \theta_{\text{отр}} S$ выполняется при измерении расстояний до нескольких километров с мозаичным отражателем, составленным из точно изготовленных трипельпризм ($\theta_{\text{отр}} \leq 10''$), и когда входной зрачок приемной оптической системы светодальномера $D \geq 50$ мм.

В приемных оптических системах фазового геодезического светодальномера, в котором разность фаз измеряется непосредственно, активного отражателя (при измерении расстояния светодальномером с активным отражателем) и импульсного светодальномера демодулятора нет. В этих случаях коэффициент эффективности приемной оптической системы будет определяться без учета потерь, возникающих при демодуляции,

$$K_{\text{пр}} = \tau_0 \tau_{\text{ф}} \tau_{\text{л.с}} \frac{D^2}{\theta_{\text{отр}}^2 S^2}. \quad (244)$$

Коэффициент эффективности приемной оптической системы геодезического фазового светодальномера, в котором разность фаз измеряется компенсационным способом и используется модуляция светового потока по поляризации, может быть определен по формуле

$$K_{\text{пр}} = \tau_0 \tau_d \tau_{\text{ф}} \tau_{\text{л.с}} \frac{D^2}{\theta_{\text{отр}}^2 S^2}. \quad (245)$$

Помимо обеспечения максимальной эффективности при приеме светового потока, несущего измерительную информа-

цию, приемная оптическая система должна гарантировать и максимальное ослабление влияния фона. В большинстве геодезических светодальномеров шумы приемника излучения и последующих усилительных каскадов пренебрегаемо малы по сравнению с влиянием фона (особенно в тех случаях, когда усиление электрического сигнала осуществляется при помощи резонансного усилителя, так как шумы приемника излучения и усилителя носят случайный характер и имеют очень широкий спектр колебаний).

Для надежного и быстрого обнаружения отражателя (или облученного участка диффузионно отражающей поверхности) необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\Phi_{\text{п max}} > \Phi_{\text{ф}}, \quad (246)$$

где $\Phi_{\text{п max}}$ — максимальное значение отраженного светового потока, поступающего в приемник излучения; $\Phi_{\text{ф}}$ — световой поток от фона, поступающий в приемник излучения.

Поскольку отраженный световой поток значителен, кроме того, при обнаружении его может быть использована в качестве опознавательной информации модулирующая частота, то, видимо, целесообразно при выделении светового потока использовать статистические способы и методы [26].

Во время геодезических светодальномерных измерений опознание и взаимное ориентирование светодальномера и отражателя осуществляют визуально: ночью используют видимую глазом часть излучаемого светового потока или специальную сигнальную подсветку, а днем — непосредственно отражатель и светодальномер в качестве визируемых предметов (ночью влияние фона практически отсутствует). В последнее время в некоторых светодальномерах, в которых источником излучения служит светодиод, стали применять звуковой индикатор для ориентирования светодальномера относительно отражателя [62].

Для уменьшения светового потока от фона прежде всего применяют пространственную селекцию. Наиболее эффективной она может быть при измерении расстояний не более нескольких километров, когда возможно выполнение условия

$$D'_{\text{отр}} \geq 2y', \quad (247)$$

где $D'_{\text{отр}}$ — диаметр изображения отражателя, определяемый по формуле (237); $2y'$ — линейное поле приемной оптической системы светодальномера. В этом случае будет существенно ослаблено влияние наиболее сильной фоновой засветки от освещенного солнцем неба или белых облаков, так как этот фон будет закрыт отражателем (следует учитывать в качестве фона свечение толщи атмосферы между светодальномером и отражателем и боковые засветки от освещенного небосвода).

При столь эффективной пространственной селекции абберационная коррекция объектива приемной оптической системы не имеет существенного значения, ибо наличие аббераций может только изменить распределение энергии в пределах кружка — изображения отражателя и несколько увеличить диаметр $D'_{отр}$.

В геодезических светодальномерах, предназначенных для измерения расстояний более нескольких километров, в целях уменьшения влияния турбулентции атмосферы, а также нестациональности ориентирования светодальномера относительно отражателя следует применять полевые диафрагмы с диаметром

$$2y' > D'_{отр},$$

но угловое поле при этом не превышает, как правило, нескольких минут. Очевидно, что в этом случае абберационная коррекция объектива приемной оптической системы существенно влияет на контраст отражателя и фона и, следовательно, на работу светодальномера в целом [111].

Световой поток от фона Φ_{ϕ} , поступающий в приемник излучения светодальномера, когда угловые размеры отражателя значительно меньше углового поля приемной оптической системы светодальномера ($2y' \gg D'_{отр}$),

может быть определен по формуле

$$\Phi_{\phi} = L_{\phi} \tau_0 \tau_d \tau_{\phi} \tau_{л.с} \frac{\pi^2 y'^2 D^2}{4 f'^2}, \quad (248)$$

где L_{ϕ} — яркость фона (конкретные значения яркости фона приведены в табл. 3); $\frac{\pi y'^2}{f'^2}$ — телесное угловое поле приемной оптической системы светодальномера; $\frac{\pi D^2}{4}$ — площадь входного зрачка приемной оптической системы.

Поскольку излучение фона происходит в довольно широком спектральном диапазоне, а спектральный диапазон излучения, полезно используемого в геодезическом светодальномере, обычно не превышает 0,1 мкм, более эффективной по сравнению с пространственной селекцией при помощи полевой диафрагмы является селекция спектральная. Последнюю осуществляют путем установки перед приемником излучения узкополосного светофильтра. Коэффициент K_{ϕ} ослабления фоновой засветки в этом случае будет

$$K_{\phi} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\phi}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \Phi_{\phi}(\lambda) d\lambda}, \quad (249)$$

где λ_1 и λ_2 — границы спектральной полосы пропускания светофильтра; $\Phi_\phi(\lambda)$ — спектральная интенсивность плотности излучения фона; λ_3 и λ_4 — границы спектральной полосы пропускания приемной оптической системы без светофильтра с учетом спектральной чувствительности приемника излучения.

Интерференционные светофильтры могут быть отражающего типа и пропускающими. Избирательность светофильтров в обоих случаях основана на использовании принципа интерференции колебаний в параллельных пластинках [2, 98, 114]. Путем изменения толщины и типа многослойных диэлектрических покрытий можно в широком диапазоне варьировать коэффициент отражения. Для получения незначительного коэффициента отражения необходимо, чтобы показатель преломления диэлектрического покрытия был геометрически средним из показателей преломления подложки и воздуха, а толщина покрытия должна быть кратной нечетному числу четвертей длины световой волны.

Интерференционный пропускающий светофильтр получается в результате нанесения нескольких полупрозрачных металлических слоев на двух сторонах тонкой стеклянной пластинки. Такой светофильтр обладает максимальным пропусканием для световой волны λ , для которой толщина оптической среды кратна $\lambda/2$. Поскольку спектральные характеристики интерференционных светофильтров зависят от угла падения светового потока на них, для гарантирования большей стабильности и эффективности через светофильтр обычно пропускают нормально падающий на него параллельный пучок лучей.

Современные многослойные интерференционные светофильтры в видимой и ближней инфракрасной областях оптического диапазона при коэффициенте пропускания $\tau_\phi \approx 0,35$ обеспечивают спектральную полосу пропускания $\Delta\lambda \approx 18 \text{ \AA}$, при $\tau_\phi \approx 60$ — $\Delta\lambda \approx 32 \text{ \AA}$ и при $\tau_\phi \approx 0,70$ — $\Delta\lambda \approx 90 \text{ \AA}$ [114].

Световой поток от фона Φ_ϕ , поступающий после прохождения интерференционного светофильтра в приемник излучения, можно определить по формуле

$$\Phi_\phi = R_{\lambda\phi} \tau_0 \tau_d \tau_\phi \tau_{\text{л.с}} \frac{\pi^2 y'^2 D^2}{4f'^2} \Delta\lambda, \quad (250)$$

где $R_{\lambda\phi}$ — спектральная плотность энергетической яркости фона (см. формулы (107) и (108)); $\Delta\lambda$ — полоса пропускания интерференционного светофильтра, $\text{\AA}$.

При приеме плоскополяризованного модулированного по интенсивности светового потока или при индикации определенной разности фаз компенсационным способом экстремума использование поляроида-анализатора, стоящего перед приемником излучения, позволяет в два раза ослабить фоновый поток Φ_ϕ , представляющий естественное излучение.

§ 26. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СВЕТОДАЛЬНОМЕРНОГО КОМПЛЕКТА

По рассмотренным ранее функциональным схемам светодальномеров, разным способом модуляции и формулам, определяющим коэффициенты эффективности передающей и приемной оптических систем светодальномера и отражателя, пользуясь уравнением (197), можно определить максимальное значение отраженного светового потока $\Phi_{\text{п max}}$, поступающего в приемник излучения, и динамического диапазона $\Phi_{\text{ши}}$ этого потока, несущего измерительную информацию (табл. 13).

В табл. 13 рассмотрено семь наиболее характерных примеров светодальномерных измерений, для большей идентичности приведенных формул предполагается, что все светодальномеры имеют биаксиальные оптические схемы приемопередатчиков и одинаковый коэффициент пропускания τ_0 оптических схем приемопередатчика и отражателя без учета коэффициентов пропускания модулятора и демодулятора.

1. Фазовый светодальномер, в котором разность фаз измеряется компенсационным способом, световой поток модулируется и демодулируется по интенсивности при помощи модулятора и демодулятора, расстояние измеряется с мозаичным отражателем. При выводе итоговых зависимостей использованы формулы (158), (159), (207), (223) и (240).

2. Фазовый светодальномер, в котором разность фаз измеряется компенсационным способом, световой поток модулируется и демодулируется по поляризации при помощи модулятора и идентичного демодулятора, расстояние измеряется с мозаичным отражателем. При выводе итоговых зависимостей использованы схема (см. рис. 46) и формулы (183), (207), (223), (240).

3. Фазовый светодальномер, в котором разность фаз измеряется непосредственно, световой поток модулируется по интенсивности непосредственно в источнике излучения — светодиоде и демодулируется в фотоэлектрическом приемнике, расстояние измеряется с активным отражателем. В качестве светодальномера (см. рис. 16) и активного отражателя (см. рис. 17) использованы несколько переоборудованные идентичные светодальномеры. При выводе итоговых зависимостей использован график, представленный на рис. 33, и формулы (158), (159), (199), (210), (240).

4. Фазовый светодальномер, в котором разность фаз измеряется непосредственно, световой поток модулируется по интенсивности при помощи модулятора, расстояние измеряется с мозаичным отражателем. При выводе итоговых зависимостей использованы формулы (153), (154), (207), (223) и (244).

5. Фазовый светодальномер, в котором разность фаз измеряется непосредственно, световой поток модулируется по интен-

ТАБЛИЦА 13

Номер примера	Тип светодальномера	Вид модуляции	Тип отражателя	Максимальное значение принимаемого светового потока $\Phi_{\text{п max}}$	Динамический диапазон $\Phi_{\text{п}}$
1	Фазовый с измерением разности фаз компенсационным способом	Внешняя модуляция по интенсивности	Мозаичный отражатель	$\Phi_{\text{ист}} \tau_a^{2S} \tau_0 \tau_m \tau_{\text{д max}} \times \frac{[(2-m)(2-m_{\text{д}})+0,5mm_{\text{д}}] D'^2 ND_{\text{эл}}^2 D^2}{4(1+\gamma)(1+\gamma_{\text{д}}) \theta_{\text{ист}}^2 \theta_{\text{отр}}^2 D_{\text{ист}}^2 S^4} \times$	$\frac{\Phi_{\text{п max}} \times mm_{\text{д}}}{[(2-m)(2-m_{\text{д}})+\frac{1}{2}mm_{\text{д}}]}$
2		Внешняя модуляция по поляризации	Мозаичный отражатель	$\Phi_{\text{ист}} \tau_a^{2S} \tau_0 \tau_m^2 \frac{D'^2 ND_{\text{эл}}^2 D^2}{\theta_{\text{ист}}^2 \theta_{\text{отр}}^2 D_{\text{ист}}^2 S^4}$	$\Phi_{\text{п max}}$
3		Внутренняя модуляция по интенсивности	Активный отражатель	$\Phi_{\text{ист}} \tau_a^S \tau_0 \frac{(1+m+m_{\text{д}}) D'^2 D^2}{\theta_{\text{ист}}^2 D_{\text{ист}}^2 S^2}$	$\Phi_{\text{п max}} \frac{2(m+m_{\text{д}})}{(1+m+m_{\text{д}})}$
4	Фазовый с непосредственным измерением разности фаз	Внешняя модуляция по интенсивности	Мозаичный отражатель	$\Phi_{\text{ист}} \tau_a^{2S} \tau_0 \tau_m \frac{D'^2 ND_{\text{эл}}^2 D^2}{(1+\gamma) \theta_{\text{ист}}^2 \theta_{\text{отр}}^2 D_{\text{ист}}^2 S^4}$	$m \Phi_{\text{п max}}$

Номер примера	Тип светодальномера	Вид модуляции	Тип отражателя	Максимальное значение принимаемого светового потока $\Phi_{\text{п max}}$	Динамический диапазон $\Phi_{\text{п}}$
5	Фазовый с непосредственным измерением разности фаз	Внутренняя модуляция по интенсивности	Мозаичный отражатель	$\Phi_{\text{ист}} \tau_a^{2S} \tau_0 \frac{(1+m) D'^2 N D_{\text{эл}}^2 D^2}{\theta_{\text{ист}}^2 \theta_{\text{отр}}^2 D_{\text{ист}}^2 S^4}$	$\Phi_{\text{п max}} \frac{2m}{(1+m)}$
6	Комбинированный	Внутренняя двойная модуляция по интенсивности	Мозаичный отражатель	$\Phi_{\text{ист}} \tau_a^{2S} \tau_0 \frac{(1+m) T_{\text{н}} D_{\text{н}}'^2 N D_{\text{эл}}^2 D^2}{\tau_{\text{н}}^2 \theta_{\text{ист}}^2 \theta_{\text{отр}}^2 D_{\text{ист}}^2 S^4}$	$\Phi_{\text{п max}} \frac{2m}{(1+m)}$
7	Импульсный	Внутренняя модуляция по интенсивности	Мозаичный отражатель	$\Phi_{\text{ист}} \tau_a^{2S} \tau_0 \frac{D'^2 N D_{\text{эл}}^2 D^2}{\theta_{\text{ист}}^2 \theta_{\text{отр}}^2 D_{\text{ист}}^2 S^4}$	$\Phi_{\text{п max}}$
8		Внутренняя модуляция по интенсивности	Локационный режим	$\Phi_{\text{ист}} \tau_a^{2S} \tau_0 \frac{\rho D^2}{4 S^2}$	$\Phi_{\text{п max}}$

сивности в источнике излучения — светодиоде, расстояние измеряется с мозаичным отражателем. При выводе итоговых зависимостей использован график, представленный на рис. 33, и формулы (153), (154), (210), (223), (244).

6. Комбинированный светодальномер, в котором разность фаз измеряется непосредственно, световой поток модулируется непосредственно в источнике излучения дважды, дополнительная импульсная модуляция введена для повышения интенсивности излучаемого светового потока и уменьшения потребляемой светодальномером электрической мощности, расстояние измеряется с мозаичным отражателем. При выводе итоговых зависимостей использован график, представленный на рис. 33, и формулы (138), (154), (210), (223), (244).

7. Импульсный светодальномер, в котором импульсная модуляция интенсивности осуществляется в источнике излучения — лазере, измерение ведется с мозаичным отражателем. При выводе итоговых зависимостей использованы формулы (197), (200), (203), (223) и (244).

8. Импульсный светодальномер, в котором импульсная модуляция интенсивности осуществляется в источнике излучения — лазере, измерение ведется в локационном режиме (без отражателя). При выводе итоговых зависимостей использованы формулы (200), (203), (230) и (242), а также учитывалось, что площадка диффузионно отражающей поверхности имеет диаметр

$$D_{\text{отр}} \geq \theta_{\text{ист}} \frac{D_{\text{ист}}}{D'} S$$

и угловое поле приемной оптической системы

$$2\omega > \theta_{\text{ист}} \frac{D_{\text{ист}}}{D'}.$$

Хотя приведенные в табл. 13 формулы соответствуют далеко не всем возможным вариантам светодальномерных геодезических измерений, но они позволяют, по результатам анализа и сравнения полученных формул, сделать несколько основных выводов и рекомендаций.

Если сравнить итоговые зависимости, приведенные в первом и четвертом примерах (см. табл. 13), можно констатировать, что в фазовых светодальномерах с модуляцией светового потока по интенсивности, в которых разность фаз измеряется непосредственно, при прочих равных условиях, максимальное значение принимаемого потока в K_1 раз и динамический диапазон в K_2 раз больше, чем в фазовых светодальномерах с модуляцией светового потока по интенсивности и с измерением разности фаз компенсационным способом:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{4(1+\gamma_D)}{\tau_{D \max} [(2-m)(2-m_D) + 0,5mm_D]}, \\ K_2 &= \frac{4(1+\gamma_D)}{\tau_{D \max} mm_D}. \end{aligned} \right\} \quad (251)$$

Итоговые зависимости, приведенные в первом и втором примерах, свидетельствуют, что в фазовых светодиодах, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом и используется модуляция светового потока по поляризации, при прочих равных условиях, максимальное значение принимаемого потока в K_1 раз и динамический диапазон в K_2 раз больше, чем в тех же фазовых светодиодах, но с модуляцией светового потока по интенсивности:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{4(1+\gamma)(1+\gamma_D)}{[(2-m)(2-m_D) + 1/2mm_D]}, \\ K_2 &= \frac{4(1+\gamma)(1+\gamma_D)}{mm_D}. \end{aligned} \right\} \quad (252)$$

При сравнении итоговых зависимостей второго и четвертого примеров видим, что в фазовых светодиодах с непосредственным измерением разности фаз и модуляцией светового потока по интенсивности, при прочих равных условиях, максимальное значение принимаемого потока в K_1 раз и динамический диапазон в K_2 раз больше, чем в фазовых светодиодах, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом и используется модуляция по поляризации:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{1+\gamma}{\tau_M}, \\ K_2 &= \frac{m(1+\gamma)}{\tau_M}. \end{aligned} \right\} \quad (253)$$

Итоговые зависимости четвертого и пятого примеров (см. табл. 13) подтверждают вывод, что в фазовых светодиодах с непосредственным измерением разности фаз и внутренней модуляцией светового потока по интенсивности, при прочих равных условиях, максимальное значение принимаемого потока в K_1 раз и динамический диапазон в K_2 раз больше, чем в тех же светодиодах с внешней модуляцией интенсивности потока:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{(1+m)(1+\gamma)}{\tau_M}, \\ K_2 &= \frac{2(1+\gamma)}{\tau_M}. \end{aligned} \right\} \quad (254)$$

Если сравнивать итоговые зависимости, приведенные в пятом и шестом примерах, можно сделать вывод, что в комбинированных светодальномерах с двойной внутренней модуляцией светового потока по интенсивности и с непосредственным измерением разности фаз, при прочих равных условиях, максимальное значение принимаемого потока в K_1 раз больше максимального значения и в K_2 раз больше динамического диапазона принимаемого потока в фазовых светодальномерах с непосредственным измерением разности фаз и внутренней модуляцией интенсивности излучаемого потока:

$$K_1 = K_2 = \frac{T_n}{\tau_n}. \quad (255)$$

Приведенные в третьем и пятом примерах итоговые зависимости приводят к выводу, что в фазовых светодальномерах с компенсационным способом измерения разности фаз, внутренней модуляцией интенсивности излучаемого потока и при измерении расстояния с активным отражателем, при прочих равных условиях, максимальное значение принимаемого потока в K_1 раз и динамический диапазон в K_2 раз больше, чем в фазовых светодальномерах с непосредственным измерением разности фаз, внутренней модуляцией света по интенсивности и при измерении расстояния с мозаичным отражателем:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{(1 + m + m_2) \theta_{\text{отр}}^2 S^2}{(1 + m) \tau_a^S N D_{\text{эл}}^2}, \\ K_2 &= \frac{(m + m_2) \theta_{\text{отр}}^2 S^2}{m \tau_a^S N D_{\text{эл}}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (256)$$

Если сравнить итоговые зависимости, приведенные в седьмом и восьмом примерах (см. табл. 13), можно сделать вывод, что в импульсных светодальномерах с мозаичным отражателем, при прочих равных условиях, максимальное значение принимаемого светового потока в K_1 раз больше, чем в тех же импульсных светодальномерах, но работающих в локационном режиме,

$$K_1 = \frac{4ND_{\text{эл}}^2}{\rho \theta_{\text{пер}}^2 \theta_{\text{отр}}^2 S^2}. \quad (257)$$

Полученные выражения коэффициентов K_1 и K_2 [см. формулы (251)—(257)] позволяют произвести объективное количественное сравнение любых из приведенных в табл. 13 примеров.

Итак, с точки зрения наиболее эффективного использования излучаемого источником светового потока наилучшим из рассмотренных светодальномеров является импульсный, затем

комбинированный, потом фазовый с непосредственным измерением разности фаз и, наконец, фазовый с компенсационным способом измерения разности фаз.

Наиболее эффективной модуляцией потока является внутренняя модуляция по интенсивности, особенно при импульсном излучении. В фазовых светодальномерах, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом, более эффективной, чем внешняя модуляция по интенсивности, является внешняя модуляция по поляризации.

Наиболее эффективным отражателем является активный отражатель, затем мозаичный и, наконец, диффузионно рассеивающая отражающая плоская поверхность.

Основным назначением оптической схемы приемопередатчика светодальномера и отражателя, как уже отмечалось, является обеспечение наиболее эффективного использования излучаемого источником светового потока и условий, необходимых для нормального функционирования прибора при измерении максимальных расстояний и при влиянии фона.

Помимо условия (246), необходимого для надежного и быстрого опознавания полезного светового потока при выполнении взаимного ориентирования светодальномера и отражателя

$$\Phi_{\Pi \max} > \Phi_{\Phi}, \quad (258)$$

где $\Phi_{\Pi \max}$ — максимальное значение отраженного светового потока, поступающего в приемник излучения, Φ_{Φ} — световой поток от фона, поступающий в приемник излучения, для нормального функционирования светодальномера требуется выполнение следующих условий.

Поскольку, как правило, диапазон измеряемых при помощи светодальномера расстояний довольно широк и весьма различны условия прозрачности (пропускания) атмосферы, при измерении минимальных расстояний в условиях хорошей и отличной видимости, помимо условия (258), необходимо следить за выполнением условия (95)

$$\Phi_{\Phi} + \Phi_{\Pi \max} < \Phi_{\max}, \quad (259)$$

т. е. суммарный световой поток, поступающий в приемник излучения, не должен превышать значения светового потока, соответствующего верхней границе линейного участка световой характеристики приемника излучения. Если условие (259) не выполняется, уменьшают интенсивность суммарного светового потока при помощи специального нейтрального фильтра переменной плотности, устанавливаемого вблизи приемника излучения.

Для нормального функционирования импульсных и фазовых светодальномеров, в которых разность фаз измеряется непосредственно, необходимо, чтобы динамический диапазон

принимаемого светового потока, несущий измерительную информацию, удовлетворял условию

$$\Phi_{\max} > \Phi_{\text{пн}} \geq 10\Phi'_{\text{пор}}, \quad (260)$$

где $\Phi'_{\text{пор}}$ — приведенное к конкретным условиям значение порогового потока, определяемое в зависимости от условий по формулам (88), (92), (93), (98).

Для нормального функционирования фазовых светодальномеров, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом, необходимо, чтобы динамический диапазон $\Phi_{\text{пн}}$ принимаемого светового потока удовлетворял условию (196),

$$\Phi_{\max} > \Phi_{\text{пн}} \geq \frac{\Phi'_{\text{пор}}}{K_{\kappa}}, \quad (261)$$

где K_{κ} — контрастная чувствительность приемника излучения, необходимая для обеспечения требуемой точности при индикации определенной разности фаз (в зависимости от выбранного способа индикации вычисляется по формулам (187), (190), (192), (193) и (195)).

Поскольку, как правило, значение контрастной чувствительности K_{κ} приемника излучения не превышает нескольких процентов, то, сравнив условия (260) и (261), можно сделать вывод, что для нормального функционирования импульсных светодальномеров и фазовых, в которых разность фаз измеряется непосредственно, динамический диапазон принимаемого светового потока может быть в K_3 раз меньше, при прочих равных условиях, чем для фазовых светодальномеров, в которых разность фаз измеряется компенсационным способом,

$$K_3 = \frac{10}{K_{\kappa}}. \quad (262)$$

Если поступающий в приемник излучения и несущий измерительную информацию световой поток $\Phi_{\text{пн}}$ не удовлетворяет условию (260) или (261), то для гарантирования необходимых условий нужно либо выбрать более мощный источник излучения и более чувствительный фотоэлектрический приемник, либо увеличить соответственно диаметры выходного и входного зрачков светодальномера, либо увеличить число элементов мозаичного отражателя, либо выбирать для измерения расстояния более благоприятные условия видимости, которые характеризуются коэффициентом пропускания атмосферы τ_a' ,

$$\tau_a' \geq \tau_a^{2S} \sqrt{K_4}, \quad (263)$$

где τ_a — коэффициент пропускания атмосферы, соответствующий удовлетворительным условиям видимости; K_4 — коэффициент, показывающий во сколько раз динамический диапазон меньше минимально допустимого для нормального функциони-

рования светодальномера при удовлетворительных условиях видимости.

Помимо уже рассмотренных оптических систем, в общую оптическую схему приемопередатчика светодальномера могут войти оптическая калибровочная линия, отсчетное устройство для снятия отсчета по шкале фазовращателя (или частотомера), визирное устройство для ориентирования светодальномера относительно отражателя и оптический центрир для центрирования светодальномера над одним из концов измеряемой линии. Расчет и проектирование всех перечисленных оптических систем, за исключением оптической калибровочной линии, рассмотрен в литературе [71]. Энергетический расчет оптической калибровочной линии проводят при условии, что поступающий в приемник излучения поток $\Phi_{\text{пи}}$ будет удовлетворять условию (261).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ ОСНОВНЫХ ТИПОВ

§ 27. СВЕТОДАЛЬНОМЕР ВЫСОКОТОЧНЫЙ ТИПА СБ-6

Последовательность проектирования и расчета светодальномеров всех типов примерно одинакова. Вначале формулируют основные требования, которым должен удовлетворять проектируемый светодальномер, затем выбирают оптимальную для данного типа светодальномера функциональную схему; оптическую схему приемопередатчика; тип отражателя; некоторые основные конструктивные элементы, например, источник и приемник излучения, модулятор светового потока, фазоизмерительное устройство и т. д.; методику и программу измерений, например способ измерения разности фаз или индикации определенной разности фаз; методику учета влияния метеорологических факторов; способ определения числа целых фазовых циклов и т. д. В ходе расчетов, связанных с точностным, энергетическим и другими видами согласования отдельных блоков, узлов и деталей светодальномерного комплекта между собой, определяют основные конструктивные параметры и характеристики этих блоков и узлов, а также требования к точности их изготовления и сборки.

Светодальномер высокоточный типа СБ-6 предназначен для измерения базисных сторон в звеньях триангуляции 1, 2, 3 и 4 классов, т. е. для измерения расстояний от 20 до 50 км с относительной погрешностью не более 1:400 000, для измерения расстояний от 7 до 20 км с допустимой относительной погрешностью 1:300 000 и для измерения расстояний от 2 до 7 км — не более 1:200 000. Светодальномер можно также использовать для линейных измерений в полигонометрии и трилатерации в государственной геодезической сети соответствующих классов. При этом он должен обеспечивать возможность измерения днем расстояний до 30 и ночью до 50 км.

При проектировании геодезического светодальномера этого типа целесообразно использовать схему фазового светодальномера, биаксиальную оптическую схему приемопередатчика, мозаичный трипельпризмный отражатель, газовый He—Ne лазер в качестве источника излучения, фотоэлектронный умножитель в качестве приемника излучения, кристаллический модулятор Поккельса. Для определения числа целых фазовых

циклов целесообразно использование нескольких фиксированных частот модуляции, поскольку этот способ обеспечивает минимальные частотные погрешности, а измерение разности фаз предпочтительно выполнять компенсационным способом при помощи серийно изготавливаемого радиотехнической промышленностью низкочастотного фазовращателя. Последний действует на промежуточной частоте, получаемой в результате преобразования модулирующей частоты способом гетеродинирования. Осуществлять индикацию определенной разности фаз рекомендуется каким-либо из парафазно-балансных способов, калибруя нулевой и максимальный отсчеты по шкале фазовращателя при помощи линии «оптического замыкания». Фотоэлектронный умножитель целесообразно использовать еще и в качестве демодулятора и смесителя. При этом глубина демодуляции не менее 90% и почти отсутствуют нелинейные искажения, а для уменьшения фазовой неоднородности в пределах фотокатода необходимо подбирать оптимальное значение модулирующего напряжения, подаваемого на управляющий электрод ФЭУ, вводить корректирующие магнитные элементы, обеспечить стабильность положения места падения принимаемого светового потока на фотокатод и выдерживать оптимальные размеры освещаемого участка фотокатода. Функциональная схема проектируемого светодальномера представлена на рис. 12. Исходным расчетом при проектировании геодезических светодальномеров обычно является расчет на точность. Допустим, что светодальномер высокоточный типа СБ-6 предназначается только для измерения базисных сторон в триангуляции 1 класса, тогда условное расстояние $S_y \approx 6,6$ км, так как при измерении расстояний более $3 S_y \approx 20$ км относительная погрешность постоянна и определяется в основном влиянием составляющей m_1 (62),

$$\frac{m_S}{S} = \sqrt{\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_{n_{rp}}}{n_{rp}}\right)^2} = \frac{0,7m_{S_y}}{S_y} = \frac{1}{400\,000}, \quad (264)$$

где $\frac{m_S}{S}$, $\frac{m_f}{f}$ и $\frac{m_{n_{rp}}}{n_{rp}}$ — относительные погрешности измерения расстояния, задания модулирующей частоты, определения группового показателя преломления атмосферы.

Поскольку $m_{S_y} \approx 24$ мм, то

$$\frac{m_f}{f} = \frac{m_{n_{rp}}}{n_{rp}} = \frac{0,5m_{S_y}}{S_y} = \frac{1}{560\,000}, \quad (265)$$

$$m_{op} = m_0 = 0,5m_{S_y} = 12 \text{ мм.} \quad (266)$$

где m_{op} и m_0 — влияние погрешностей ориентирования и отсчитывания.

В неблагоприятных условиях, даже при одновременном учете метеорологических данных на точках стояния светодальномера и отражателя, относительная погрешность $m_{n_{rp}}/n_{rp}$ может достигать 1:500 000 [94], поэтому для обеспечения заданной точности необходимо соответственно уменьшить допустимое значение частотной погрешности

$$\frac{m_f}{f} = \sqrt{\left(\frac{m_S}{S}\right)^2 - \left(\frac{m_{n_{rp}}}{n_{rp}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{400\,000}\right)^2 - \left(\frac{1}{500\,000}\right)^2} \approx \approx \frac{1}{667\,000}. \quad (267)$$

Требуемую точность можно гарантировать, так как в светодальномере используются фиксированные, стабилизированные кварцевыми резонаторами частоты модуляции.

Суммарная погрешность ориентирования будет складываться из следующих погрешностей [54]:

$$m_{op} = \sqrt{2m_c^2 + m_r^2 + m_\delta^2},$$

где $m_c \approx m_r \approx 3,7$ мм — погрешность определения поправок за центровку и редукцию светодальномера и отражателя [54]; следовательно, допустимая погрешность m_δ определения постоянной поправки прибора будет

$$m_\delta = \sqrt{m_{op}^2 - 2(m_c^2 + m_r^2)} = \sqrt{12^2 - 2(3,7^2 + 3,7^2)} \approx 9,4 \text{ мм}, \quad (268)$$

т. е. доминирующей погрешностью, определяющей суммарную погрешность ориентирования, будет погрешность определения постоянной поправки светодальномера.

Согласно исходному заданию, проектируемый светодальномер предназначается и для измерения базисных сторон в триангуляции 2 класса. Проверим, какую точность он будет обеспечивать в наиболее неблагоприятном случае — при измерении минимальных базисных сторон S_{min} в триангуляции 2 класса ($S_{min} = 7$ км). Поскольку $S_{min} > S_y$, то

$$\frac{m_S}{S_{min}} < \frac{m_{S_y}}{S_{min}} \approx \frac{1}{300\,000}. \quad (269)$$

Следовательно, можно констатировать, что светодальномер удовлетворяет точностным требованиям триангуляции 2 класса.

Проверим также, какую точность будет обеспечивать проектируемый светодальномер при измерении минимальных сторон в триангуляции 3 класса ($S_{\min}=5$ км). Поскольку $S_{\min}<S_y$, то

$$\frac{m_S}{S_{\min}} < \frac{m_{S_y}}{S_{\min}} \approx \frac{1}{200\,000}, \quad (270)$$

т. е. светодальномер будет удовлетворять требованиям триангуляции 3 класса. И, наконец, при измерении сторон в триангуляции 4 класса $S_{\min}=2$ км. Поскольку $S_{\min}<\frac{1}{3}S_y$, то

$$\frac{m_S}{S_{\min}} = \frac{0,7m_{S_y}}{S_{\min}} \approx \frac{1}{119\,000}, \quad (271)$$

следовательно, проектируемый светодальномер не удовлетворяет точностным требованиям триангуляции 4 класса. Однако при измерении расстояний от 2 до 5 км, в результате резкого возрастания уровня отраженного светового потока и уменьшения погрешностей центрирования и редуцирования, несколько уменьшится влияние погрешностей ориентирования и отсчитывания, поэтому погрешность измерения расстояний будет в действительности менее 1 : 120 000. Кроме того, согласно требованиям инструкции [43], при измерении минимальных сторон 3 и 4 классов допустимая погрешность может быть увеличена примерно в 1,5 раза.

Благодаря существенному увеличению значения допустимой относительной погрешности при измерении базисных сторон 3 и 4 классов можно определять метеорологические условия только в точке стояния светодальномера. В этом случае погрешность определения группового показателя преломления не будет превышать 1 : 350 000 [90].

При измерении разности фаз компенсационным способом суммарная погрешность m_Φ определяется обычно доминирующим влиянием погрешностей фазовращателя. Погрешность современных серийно выпускаемых радиотехнической промышленностью низкочастотных фазовращателей примерно равна $0,3 \div 0,4^\circ$, следовательно, значение основной модулирующей частоты, определяемое по формуле (57), будет

$$f \geq \frac{m_\Phi v}{4\pi m_0} = \frac{0,35^\circ \cdot 3 \cdot 10^{11}}{4 \cdot 180^\circ \cdot 12} \approx 12 \text{ МГц}. \quad (272)$$

В целях упрощения обработки результата измерения и для удобства сравнения частоты модуляции с государственным эталоном частоты целесообразно принять значение основной модулирующей частоты $f=15$ МГц.

Максимальное значение коэффициента многозначности, определяемое по формуле (32), будет

$$K_{\lambda} = \frac{0,2\pi}{m_{\phi}} = \frac{0,2 \cdot 180^{\circ}}{0,35^{\circ}} \approx 103. \quad (273)$$

Выбрав коэффициент многозначности $K_{\lambda} = 100$, число вспомогательных частот модуляции, необходимых для однозначного определения числа целых фазовых циклов, можно определить по формуле (48)

$$n \geq \log_{K_{\lambda}} \left(S_{\max} \frac{2f}{v} \right) = \log_{100} \left(50 \frac{2 \cdot 15 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^5} \right) \approx 1,7, \quad (274)$$

где $S_{\max} = 50$ км — максимальная длина стороны треугольника в триангуляции 1 класса.

Принимая $n=2$ и учитывая формулы (27), (32) и (33), определяем значения вспомогательных частот модуляции:

$$f_1^* = f \frac{(K_{\lambda} - 1)}{K_{\lambda}} = 15 \frac{(100 - 1)}{100} = 14,85 \text{ МГц}, \quad (275)$$

$$f_2^* = f \frac{(K_{\lambda} - 1)(K_{\lambda} + 1)}{K_{\lambda}^2} = 15 \frac{(100 - 1)(100 + 1)}{100^2} = 14,9985 \text{ МГц}.$$

Для обеспечения пренебрегаемо малого влияния погрешности m_{ϕ_0} индикации определенной разности фаз необходимо выполнить условие

$$m_{\phi_0} \leq \frac{1}{3} m_{\phi}, \quad (276)$$

или допустимое значение погрешности индикации

$$m_{\phi_0} \approx 0,1^{\circ}.$$

Учитывая формулу (190) и то, что глубина модуляции, осуществляемой при помощи кристаллического модулятора Поккельса, $m \approx 0,9$, а глубина демодуляции, осуществляемой при помощи ФЭУ, $m_d \approx 1$, можно определить значение необходимой для гарантирования требуемой точности при индикации определений разности фаз, контрастной чувствительности ФЭУ,

$$\begin{aligned} K_{\kappa} &\leq \frac{m_{\phi_0} m m_d \sqrt{n} \cdot 3}{\rho^0 [(2 - m)(2 - m_d) + 1/2 m m_d]} = \\ &= \frac{0,1^{\circ} \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot \sqrt{4 \times 3}}{\rho^0 [(2 - 0,9)(2 - 1) + 0,5 \cdot 0,9]} \approx 0,006, \end{aligned} \quad (277)$$

где $n=4$ — число однократных индикаций в приеме (обеспечивается путем автоматического интегрирования показаний индикатора).

Схема передающей оптической системы проектируемого геодезического светодальномера типа СБ-6 с лазером в каче-

стве источника излучения и с кристаллическим модулятором Поккельса представлена на рис. 52.

В современных отечественных геодезических светодаальномерах типа СБ-6 источником излучения является гелий-неоновый лазер типа ЛГ-56. Он имеет следующие основные конструктивные параметры и характеристики: длина волны излучения $\lambda = 0,6328$ мкм, ширина спектрального диапазона излучения от 10^{-3} до 10^{-2} А, мощность излучения $\Phi_{\text{э.ист}} \approx 2$ мВт, пульсации мощности излучения не более 10%, расходимость излучаемого пучка лучей $\theta_{\text{ист}} \approx 13'$, диаметр пучка $D_{\text{ист}} \approx 2$ мм, потребляемая электрическая мощность не более 40 Вт, длина $l \approx 350$ мм.

Кристаллический модулятор Поккельса имеет следующие основные параметры: коэффициент пропускания $\tau_m \approx 0,65$; глубина модуляции $m = 0,9$, коэффициент нелинейных искажений $\gamma \approx 0,08$, потребляемая электрическая мощность не более 2 Вт (см. табл. 10).

Необходимое увеличение Γ_T телескопической коллимирующей системы определяется выбором значения расходимости $\theta_{\text{пер}}$ светового потока, излучаемого светодаальномером. Обычно для геодезических светодаальномеров типа СБ-6 $\theta_{\text{пер}} \geq 15''$. Приняв $\theta_{\text{пер}} = 30''$, можно определить увеличение телескопической коллимирующей системы:

$$\Gamma_T = \frac{\theta_{\text{пер}}}{\theta_{\text{ист}}} = \frac{30''}{13 \cdot 60''} \approx 0,038^x. \quad (278)$$

Выполним расчет телескопической коллимирующей системы с увеличением $\Gamma_T = 0,038^x$ для гелий-неонового лазера типа ЛГ-56. Оптический резонатор лазера представляет собой два зеркала — сферическое 1 и плоское 3 (рис. 60). Сферическое зеркало имеет радиус кривизны $R_1 \approx 1$ м, плоское зеркало $R_2 = \infty$, расстояние между ними $L \approx 0,3$ м (здесь же помещена трубка 2 с газовой смесью).

Лучистый поток, излучаемый лазером, имеет минимальный поперечный размер — перетяжку, расстояние Z_1 которой от сферического зеркала может быть определено по формуле [50]

$$Z_1 = \frac{L(R_2 + L)}{R_2 + R_1 + 2L}, \quad (279)$$

или, так как $R_2 = \infty$,

$$Z_1 = L = 0,3 \text{ м}. \quad (280)$$

Диаметр $D_{\text{ист}}$ сечения перетяжки и расходимость $\theta_{\text{ист}}$ излучаемого лазером лучистого потока определяются геометрией резонатора, которая полностью характеризуется так называемым конфокальным параметром резонатора

$$R_3 = \frac{2\sqrt{L(R_1 - L)(R_2 + L)(R_2 - R_1 + L)}}{R_2 - R_1 + 2L}. \quad (281)$$

или, так как $R_2 = \infty$,

$$R_g = 2\sqrt{L(R_1 - L)} - 2\sqrt{0,3(1 - 0,3)} \approx 0,9 \text{ м.} \quad (282)$$

Наименьший достижимый диаметр D_0 перетяжки для основной моды

$$D_0 = 2\sqrt{\frac{R_g \lambda}{2\pi}} = 2\sqrt{\frac{0,9 \cdot 10^3 \cdot 0,6328 \cdot 10^{-3}}{2\pi}} \approx 0,6 \text{ мм.} \quad (283)$$

где $\lambda = 0,6328$ мкм — длина волны излучения. Поскольку в действительности диаметр $D_{\text{ист}}$ пучка, излучаемого лазером типа ЛГ-56, равен примерно 2 мм, то множитель K_m , учитывающий индекс моды, будет

$$K_m = \frac{D_{\text{ист}}}{D_0} = \frac{2}{0,6} \approx 3,3, \quad (284)$$

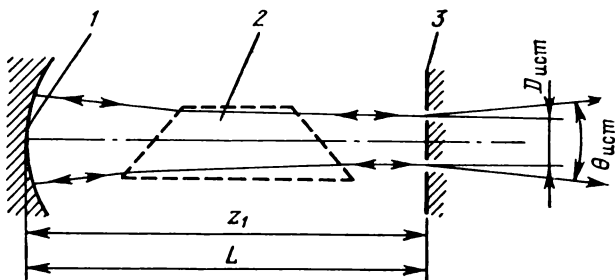


Рис. 60. Оптический резонатор гелий-неонового лазера типа ЛГ-56

а расходимость $\theta_{\text{ист}}$ лучистого потока, излучаемого лазером, будет

$$\theta_{\text{ист}} = \frac{4K_m}{\sqrt{\frac{2\pi R_g}{\lambda}}} = \frac{4 \cdot 3,3}{\sqrt{\frac{2\pi \cdot 0,9 \cdot 10^3}{0,6328 \cdot 10^{-3}}}} \approx 4 \cdot 10^{-3}, \quad (285)$$

или в угловой мере $\theta_{\text{ист}} \approx 14'$ (это соответствует действительному значению расходимости). Приняв световой диаметр рассеивающей линзы коллимирующей телескопической системы равным $3 D_{\text{ист}}$, чтобы исключить влияние дифракции, определим световой диаметр D' объектива (выходной зрачок передающей оптической системы светодальномера)

$$D' = \frac{D_{\text{ист}}}{\Gamma_T} = \frac{2}{0,038} \approx 53 \text{ мм.} \quad (286)$$

Поскольку излучение лазера практически монохроматично, то при выполнении абберационной коррекции телескопической

коллимирующей системы необходимо учитывать только влияние сферической аберрации $\delta U'$ третьего порядка, которую можно не учитывать, если выполняется условие

$$\delta U' \leq \frac{1}{3} \theta_{\text{пер}} = 10''. \quad (287)$$

Помимо исправления сферической аберрации, для равномерного заполнения излучаемым потоком выходного зрачка светодающего элемента должно быть выполнено условие синусов [111].

Условие (287) можно выполнить, если объектив будет двухлинзовым с относительным отверстием не более 1:7, следовательно, фокусное расстояние f'_0 объектива должно быть порядка 370 мм, фокусное расстояние f'_1 отрицательной линзы

$$f'_1 = -f'_0 \Gamma_T = -370 \cdot 0,38 \approx -14 \text{ мм}, \quad (288)$$

а общая оптическая длина l_T телескопической коллимирующей системы

$$l_T = f'_0 + f'_1 = 370 - 14 = 356 \text{ мм}. \quad (289)$$

Трансформированный конфокальный параметр R'_{Σ_1} после прохождения светового потока через отрицательную линзу можно определить по формуле

$$R'_{\Sigma_1} = \frac{R_{\Sigma}}{\left(1 + \frac{S_1}{f'_1}\right)^2 + \left(\frac{R_{\Sigma}}{2f'_1}\right)^2}, \quad (290)$$

где $S_1 \leq 10 f'_1$ — расстояние перетяжки от отрицательной линзы; или, так как

$$\frac{R_{\Sigma}}{2f'_1} \gg 1 + \frac{S_1}{f'_1};$$

$$R'_{\Sigma_1} \approx \frac{4f'^2_1}{R_{\Sigma}} = \frac{4 \cdot 14^2}{900} \approx 0,87 \text{ мм}. \quad (291)$$

Новое положение перетяжки определяется расстоянием S'_1 :

$$S'_1 \approx f'_1 = -14 \text{ мм}. \quad (292)$$

Диаметр $D'_{\text{ист}}$ перетяжки, являющийся диаметром приведенного источника излучения, без учета влияний аберраций объектива и дифракции будет равен

$$D'_{\text{ист}} = D_{\text{ист}} \sqrt{\frac{R'_{\Sigma_1}}{R_{\Sigma}}} = 2 \sqrt{\frac{0,87}{900}} \approx 0,062 \text{ мм}. \quad (293)$$

Трансформированный конфокальный параметр R'_{Σ_2} после прохождения светового потока через объектив равен (при $S_2 \approx f'_0$)

$$R'_{\Sigma_2} = \frac{4f_0'^2}{R'_{\Sigma_1}} = \frac{4 \cdot 370^2}{0,87} \approx 629 \text{ м.} \quad (294)$$

Размер перетяжки D_2' на расстоянии S_2' от объектива можно определить по формуле

$$D_2' = D'_{\text{ист}} \sqrt{\frac{R'_{\Sigma_2}}{R_{\Sigma_1}}} = 0,062 \sqrt{\frac{629\,000}{0,87}} \approx 53 \text{ мм,} \quad (295)$$

т. е.

$$D_2' = D' = \frac{D_{\text{ист}}}{\Gamma_T}.$$

Расстояние S_2' , равное дистанции оформления пучка $S_{0. \text{пер}}$, определяется следующим образом:

$$S_2' = \frac{D_2'}{\theta_{\text{пер}}} \rho' = \frac{D'}{\theta_{\text{ист}} \Gamma_T} \rho' = \frac{53 \rho'}{13' \cdot 0,038} \approx 367 \text{ м,} \quad (296)$$

при этом плоскость наилучшей фокусировки будет отстоять от фокальной плоскости объектива на расстоянии Δ , определяемом выражением

$$\Delta \approx -S_2' \frac{R_{\Sigma_1}'^3}{4f_0'^2} = -\frac{367\,000 \cdot 0,87^2}{4 \cdot 370^2} \approx -0,51 \text{ мм.} \quad (297)$$

Коэффициент пропускания τ_T телескопической коллимирующей системы может быть определен по формуле (201)

$$\tau_T = \tau_c^S \tau_{\text{п}}^{N_{\text{п}}} = 0,98^3 \cdot 0,99^4 \approx 0,9, \quad (298)$$

где $\tau_c \approx 0,98$ — коэффициент пропускания оптического стекла; S_c — длина пути, проходимого световым потоком в оптических стеклах; $\tau_{\text{п}} \approx 0,99$ — коэффициент, учитывающий потери на отражение при преломлении через просветленные поверхности; $N_{\text{п}} = 4$ — число границ воздух — стекло (отрицательная линза и объектив — склеенный дублет).

Выбираем для мозаичного отражателя светодальномера призмный элемент с $D_{\text{эл}} = 50$ мм, так как оптимальными для точного изготовления являются трипельпризмы с высотой $35 \div 50$ мм, и погрешностями Δ_α двугранных прямоугольных углов не более $1''$. Поскольку общий диаметр отражателя $D_{\text{отр}}$ для геодезического светодальномера не должен превышать 400 мм (в противном случае его придется поднимать на сигнал по частям), число призмных элементов принимаем равным 49. Расходимость отраженного светового потока с учетом формул (227) и (226) будет

$$\theta_{\text{отр}} \approx 10 \Delta_\alpha = 10''. \quad (299)$$

Коэффициент пропускания трипельпризмы $\tau_{\text{отр}} \approx 0,8$ (призма работает на полном внутреннем отражении).

Схема приемной оптической системы проектируемого геодезического светодальномера типа СБ-6 представлена на рис. 59, только вместо демодулятора 2 в фокальной плоскости объектива 1 поставлена полевая диафрагма, ограничивающая угловое поле 2ω в пределах нескольких минут. Принимаем, в целях ослабления влияния флуктуаций атмосферы на интенсивность

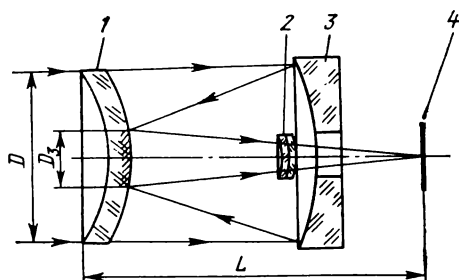


Рис. 61. Оптическая схема зеркально-линзового менискового объектива системы Д. Д. Максудова:

1 — мениск; 2 — фокусирующая (корректирующая) линза; 3 — сферическое зеркало; 4 — фокальная плоскость; L — оптическая длина объектива; D — внешний диаметр входного зрачка; D_3 — внутренний диаметр входного зрачка

принимаемого светового потока и для гарантирования приема достаточной энергии отраженного светового потока при измерении максимальных расстояний, диаметр входного зрачка приемной оптической системы $D=100$ мм. В качестве объектива приемной оптической системы выбираем зеркально-линзовый менисковый объектив системы Д. Д. Максудова (рис. 61) с относительным отверстием 1:12. Поскольку входной зрачок приемной оптической системы будет иметь вид кольца, площадь которого должна быть равной площади круглого входного зрачка с $D=100$ мм и не менее чем в три раза превышать площадь внутренней, не используемой для приема отраженного светового потока зоны, поэтому световой диаметр D_m мениска равен

$$D_m = \frac{D}{\sqrt{\frac{3}{4}}} \approx 115 \text{ мм.} \quad (300)$$

Коэффициент пропускания зеркально-линзового объектива $\tau_o \approx 0,8$.

Полоса пропускания интерференционного светофильтра, который ставится для ослабления влияния фоновой засветки в геодезических светодальномерах типа СБ-6, $\Delta\lambda \approx 20 \text{ \AA}$, при этом коэффициент пропускания для $\lambda=0,6328 \text{ мкм}$, $\tau_\Phi \approx 0,5$.

Коэффициент пропускания линзовых согласующих систем (линза Фабри) $\tau_{л.с} \approx 0,95$.

В качестве приемника излучения можно использовать фотоэлектронный умножитель ФЭУ-38, который обладает следующими основными характеристиками и параметрами: монохроматический пороговый поток для $\lambda = 0,6328$ мкм $\Phi_{\text{э.л. пор}} \approx 1,8 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2} (при единичной полосе пропускания 1 Гц), интегральная чувствительность $S_i = 1,66 \cdot 10^4$ А/Вт, фотокатод типа С-11, темновой ток $i_{\text{т}} \approx 3 \cdot 10^{-8}$ А, напряжение питания 1700 В, диаметр фотокатода 34 мм.

Используя конкретные конструктивные параметры и характеристики элементов оптической схемы светодальномерного комплекта и учитывая итоговые формулы, приведенные в первом примере табл. 13, выполним энергетический поверочный расчет проектируемого геодезического светодальномера типа СБ-6.

Вначале определим максимальное значение принимаемого приемником излучения отраженного потока $\Phi_{\text{э.п. max}}$ при измерении днем в условиях удовлетворительной видимости расстояния $S = 30$ км. Для обеспечения необходимой точности при определении группового показателя преломления атмосферы с учетом влияния метеорологических факторов целесообразно, как отмечалось ранее, дневные измерения расстояний, превышающих 10 км, начинать через 2—3 ч после восхода солнца и заканчивать за 2—3 ч до захода. С учетом этой рекомендации, а также принимая во внимание, что измерение длится не более 1 ч (с одного сигнала измеряют обычно не более трех расстояний), можно констатировать, что расстояния свыше 10 км измеряются обычно в утренние и вечерние часы, когда яркость фона значительно слабее, чем в полуденное время, и несколько выше прозрачность атмосферы.

Итак, максимальное значение принимаемого потока $\Phi_{\text{э.п. max}}$ при измерении проектируемым светодальномером типа СБ-6 расстояния $S = 30$ км в утренние и вечерние часы

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{э.п. max}} &= \Phi_{\text{э.ист}} \tau_a^{2S} \tau_m \tau_t \tau_{\text{отр}} \tau_0 \tau_{\text{ф}} \tau_{\text{л.с}} \frac{[(2-m) + 0,5m] D'^2 N D_{\text{эл}}^2 D^2}{4(1+\gamma) \theta_{\text{ист}}^2 \theta_{\text{отр}}^2 D_{\text{ист}}^2 S^4} = \\ &= 0,002 \cdot 0,86^{2 \cdot 30} \cdot 0,65 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,95 \times \\ &\times \frac{[(2-0,9) + 0,5 \cdot 0,9] 53^2 \cdot 49 \cdot 50^2 \cdot 100^2}{4(1+0,08) (13 \times 60'')^2 (10'')^2 \cdot 2^2 \cdot 30^4 \cdot 10^{24}} (\rho'')^4 \approx 0,59 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, \quad (301) \end{aligned}$$

где $\Phi_{\text{э.ист}} = 0,002$ Вт — мощность потока, излучаемого лазером типа ЛГ-56; $\tau_a = 0,86$ — коэффициент прозрачности атмосферы в утренние и вечерние часы (в полуденные часы $\tau_a = 0,83$); $\tau_m = 0,65$ — коэффициент пропускания кристаллического модулятора Поккельса; $\tau_t = 0,9$ — коэффициент пропускания телескопической коллимирующей системы; $\tau_{\text{отр}} = 0,8$ — коэффициент пропускания трипельпризменного элемента отражателя; $\tau_0 = 0,8$ — коэффициент пропускания зеркально-линзового

объектива приемной оптической системы, $\tau_{\phi}=0,5$ — коэффициент пропускания интерференционного светофильтра; $\tau_{л.с}=0,95$ — коэффициент пропускания линзовой согласующей системы; $m=0,9$ — глубина модуляции; $D'=53$ мм — диаметр выходного зрачка телескопической коллимирующей системы; $N=49$ — число трипельпризм мозаичного отражателя; $D_{з.л}=50$ мм — диаметр входного (и выходного) зрачка трипельпризмы; $D=100$ мм — диаметр входного зрачка приемной оптической системы; $\gamma=0,08$ — коэффициент нелинейных искажений, вносимых модулятором; $\theta_{ист}=13'$ — расходимость пучка лучей, излучаемого лазером типа ЛГ-56; $\theta_{отр}'=10''$ — расходимость пучка лучей, отраженных трипельпризмой; $D_{ист}=2$ мм — диаметр излучаемого лазером типа ЛГ-56 пучка лучей.

Поток $\Phi_{э.ф}$ от фона — светлых облаков, освещенных утренним и вечерним солнцем, можно определить, используя формулу (248)

$$\Phi_{э.ф} = R_{\lambda\phi} \Delta_{\lambda} \tau_{\phi} \tau_{л.с} \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{2\omega}{\rho} \right)^2 = \\ = 0,65 \cdot 10^{-2} \cdot 20 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,95 \frac{\pi \cdot 10^2}{2} \left(\frac{2'}{\rho'} \right)^2 \approx 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}, \quad (302)$$

где $R_{\lambda\phi} = 0,65 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{ ср } \text{Å}}$ — спектральная плотность энергетической яркости фона (в полуденные часы $R_{\lambda\phi} = 0,65 \times 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{ ср } \text{Å}}$); 20 Å — спектральная полоса пропускания интерференционного светофильтра; $2\omega=2'$ — угловое поле приемной оптической системы.

Поскольку, как показывают результаты вычислений [см. формулы (301) и (302)], в утренние и вечерние часы поток от фона будет во много раз меньше отраженного потока при измерении расстояний около 30 км, то легко опознать отраженный поток и осуществить взаимное ориентирование светодальнометра и отражателя*.

Наличие существенного фоновое и значительного отраженного потоков ухудшит пороговую чувствительность фотоэлектронного умножителя, значение которой, учитывая влияние этих потоков, можно определить по формуле (93),

$$\Phi'_{эл \text{ пор}} = \Phi_{э \text{ лпор}} \sqrt{1 + \frac{(\Phi_{э.ф} + \Phi_{э.п \text{ max}}) S_t}{i_T}} = \\ = 1,8 \cdot 10^{-14} \sqrt{1 + \frac{(1,3 \cdot 10^{-12} + 0,59 \cdot 10^{-10}) \cdot 1,66 \cdot 10^4}{3 \cdot 10^{-8}}} \approx 1 \cdot 10^{-13} \text{ Вт}, \quad (303)$$

* При удовлетворительных условиях видимости в полуденные часы максимальное расстояние визуальной видимости не более 20 км.

где $\Phi_{\lambda, \text{пор}} = 1,8 \cdot 10^{-14}$ Вт — монохроматический пороговый поток ФЭУ-38 (для $\lambda = 0,6328$ мкм, при единичной полосе пропускания 1 Гц); $Si = 1,66 \cdot 10^4$ А/Вт — интегральная чувствительность ФЭУ-38; $i_t = 3 \cdot 10^{-8}$ А — темновой ток ФЭУ-38.

Помимо условий, необходимых для уверенного опознания отраженного потока, для нормального функционирования фазового светодаляномера, в котором разность фаз измеряется компенсационным способом, необходимо, чтобы динамический диапазон отраженного потока, несущий информацию об измеряемой разности фаз, удовлетворял условию (196)

$$\Phi_{\text{э.пн}} \geq \frac{\Phi'_{\text{элпор}}}{K_k} = \frac{1 \cdot 10^{-13}}{0,006} \approx 1,7 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}, \quad (304)$$

где $K_k = 0,006$ — необходимая для реализации расчетной точности при индикации определенной разности фаз контрастная чувствительность ФЭУ-38, определяемая по формуле (277).

Динамический диапазон отраженного светового потока при измерении расстояния $S = 30$ км будет равен с учетом итоговой формулы первого примера (см. табл. 13)

$$\Phi_{\text{э.пн}} = \frac{m\Phi_{\text{э.п макс}}}{[(2 - m) + 0,5m]} = \frac{0,9 \cdot 0,59 \cdot 10^{-10}}{[(2 - 0,9) + 0,5 \cdot 0,9]} \approx 3,4 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}. \quad (305)$$

Следовательно, при измерении расстояний до 30 км в утренние и вечерние часы проектируемый светодаляномер типа СБ-6 будет нормально функционировать, обеспечивая требуемую точность.

Используя формулу (301), определяем теперь максимальное значение принимаемого светового потока при измерении ночью расстояния $S = 50$ км

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{э.п макс}} &= 0,002 \cdot 0,93^{2 \cdot 50} \cdot 0,65 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,95 \times \\ &\times \frac{[(2 - 0,9) + 0,5 \cdot 0,9] 53^2 \cdot 49 \cdot 50^2 \cdot 100^2 (\rho'')^4}{4 (1 + 0,08) (13 \cdot 60'')^2 (10'')^2 \cdot 2^2 \cdot 50^4 \cdot 10^{24}} \approx 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}, \end{aligned} \quad (306)$$

где $\tau_a = 0,93$ — коэффициент пропускания атмосферы в ночных условиях (соответствует условиям хорошей видимости).

Поскольку максимальное значение отраженного потока, принимаемого приемником излучения светодаляномера при измерении расстояния $S = 50$ км в ночное время, при практическом отсутствии влияния фона, примерно равно максимальному значению отраженного потока при измерении расстояния $S = 30$ км в утренние и вечерние часы, проектируемый светодаляномер типа СБ-6, даже с некоторым запасом, будет нормально функционировать, обеспечивая требуемую точность. Этот энергетический запас позволяет измерять расстояния до 50 км при несколько меньшем, чем при хорошей видимости, коэффициенте пропускания атмосферы.

Светодальномер высокоточный типа СМ-02, согласно требованиям ГОСТ 19223—73, предназначен для измерения расстояний при выполнении инженерно-геодезических и маркшейдерских работ от 2 до 300 м со средней квадратической погрешностью не более 2 мм.

При проектировании геодезического светодальномера этого типа целесообразно использовать схему фазового светодальномера, в котором для определения числа целых фазовых цик-

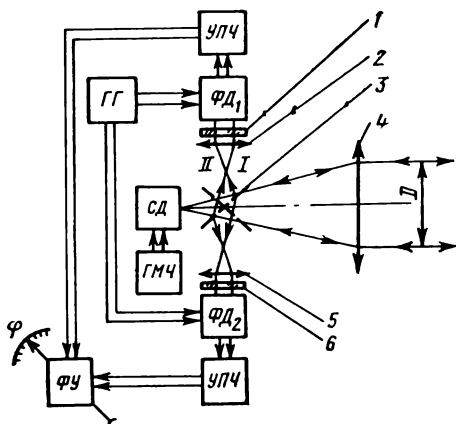


Рис. 62. Схема светодальнометра высокоточного типа СМ-02:

1 — нейтральный светофильтр («серый клин»); 2 и 5 — линзовые согласующие системы; 3 — двустороннее полупрозрачное поворотное зеркало (занимает два фиксированных положения *I* и *II*); 4 — объектив приемной и передающей оптических систем; 6 — интерференционный светофильтр; *СД* — светодиод, *ФД*₁ и *ФД*₂ — фотодиоды; *ГМЧ* — генератор модулирующей частоты, *УПЧ* — усилитель промежуточной частоты; *ФУ* — фазосмержительное устройство; *ГГ* — гетеродинный генератор

лов осуществляют модуляцию на нескольких фиксированных частотах; автоколлимационную оптическую схему приемопередатчика; светодиод в качестве источника излучения и модулятора интенсивности светового потока; кремниевый фотодиод в качестве приемника излучения; одноэлементный трипельпризменный отражатель. Измерение разности фаз целесообразно выполнять непосредственным способом при помощи серийно изготавливаемого радиотехнической промышленностью низкочастотного фазоизмерительного устройства, которое действует на промежуточной частоте, получаемой в результате преобразования модулирующей частоты способом гетеродинирования непосредственно в приемниках излучения. Функциональная схема проектируемого светодальномера представлена на рис. 62. Она отличается от схемы фазового светодальномера (см. рис. 11) тем, что поворотом полупрозрачного зеркала 3 из положения I в положение II и взаимной заменой фильтров 1 и 6 (см. рис. 62) можно взаимно поменять функции фотодиодов ΦD_1 и ΦD_2 . Такая поочередная взаимная замена функций приемников излучения и, следовательно, соответствующих электрических цепей позволяет исключить влияние нескольких систематических погрешностей на результат измерений.

Выполним расчет на точность проектируемого геодезического светодальномера типа СМ-02. Поскольку светодальномер должен обеспечивать во всем диапазоне измеряемых расстояний погрешность не более 2 мм, следовательно, при максимальном измеряемом расстоянии $S_{\max}=300$ м, условное расстояние $S_y \geq 3 S_{\max}=900$ м, а погрешность измерения этого расстояния

$$m_{S_y} = \frac{2}{0,7} \approx 2,8 \text{ мм}, \quad (307)$$

или, используя зависимость (266), получаем

$$\frac{m_f}{f} = \frac{m_{n_{\text{гр}}}}{n_{\text{гр}}} = \frac{0,5m_{S_y}}{S_y} \approx \frac{1,4}{900\,000} = \frac{1}{643\,000}, \quad (308)$$

$$m_{\text{ор}} = m_0 = 0,5m_{S_y} = 1,4 \text{ мм}.$$

При измерении светодальномером расстояний не более 300 м и учете атмосферных факторов лишь в точке стояния светодальномера требуемую точность определения группового показателя преломления атмосферы можно гарантировать. Также можно гарантировать требуемую точность задания частот модуляции, если использовать для этого вакуумные термостатированные кварцевые рабочие эталоны частоты.

В этом светодальномере суммарное влияние всех погрешностей ориентирования будет определяться в основном погрешностью постоянной поправки светодальномера

$$m_{\text{ор}} \approx m_{\delta} = 1,4 \text{ мм}. \quad (309)$$

При измерении разности фаз непосредственным способом погрешность m_{ϕ} измерения разности фаз зависит лишь от погрешностей фазоизмерительного устройства. Точность современных серийно выпускаемых радиотехнической промышленностью низкочастотных фазоизмерительных устройств несколько ниже, чем точность фазовращателей, и примерно равна $0,4 \div 0,6^\circ$, следовательно, значение основной модулирующей частоты f , определяемое по формуле (57), будет

$$f \geq \frac{m_{\phi} v}{4\pi m_0} = \frac{0,5^\circ \cdot 3 \cdot 10^{11}}{4 \cdot 180^\circ \cdot 1,4} \approx 148,8 \text{ МГц}. \quad (310)$$

Принимаем значение основной модулирующей частоты $f=150$ МГц. Максимальное значение коэффициента многозначности, определяемое по формуле (32), будет

$$K_{\lambda} = \frac{0,2\pi}{m_{\phi}} = \frac{0,2 \cdot 180^\circ}{0,5^\circ} = 72. \quad (311)$$

Приняв коэффициент многозначности $K_{\lambda}=10$, число вспомогательных частот можно определить по формуле (48)

$$n \geq \lg \left(S_{\max} \frac{2f}{v} \right) = \lg \left(0,3 \frac{2 \cdot 15 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^5} \right) \approx 2,47, \quad (312)$$

где $S_{\max}=0,3$ км — максимальное расстояние, измеряемое светодальномером.

Принимая $n=3$ (если принять $n=2$, нужно будет заранее знать измеряемое расстояние с погрешностью не более 50 м) и учитывая формулы (27), (32) и (275), определяем значения вспомогательных частот модуляции:

$$\left. \begin{aligned} f_1^* &= f \left(1 - \frac{1}{K_\lambda} \right) = 150 \left(1 - \frac{1}{10} \right) = 135 \text{ МГц}, \\ f_2^* - f &\left(1 - \frac{1}{K_\lambda^2} \right) = 150 \left(1 - \frac{1}{10^2} \right) = 148,5 \text{ МГц}, \\ f_3^* &= f \left(1 - \frac{1}{K_\lambda^3} \right) = 150 \left(1 - \frac{1}{10^3} \right) = 149,85 \text{ МГц}. \end{aligned} \right\} \quad (313)$$

Схема передающей оптической системы проектируемого светодальномера типа СМ-02 со светодиодом в качестве источника излучения представлена на рис. 62. Применяемые в геодезических светодальномерах светодиоды имеют следующие технические характеристики [6, 39, 77]: среднее значение эффективной длины волны излучения $\lambda_{\text{эф}}=0,91$ мкм, полуширина спектрального диапазона $\Delta\lambda \leq 0,03$ мкм, энергетическая яркость $L_{\text{э.ист}} \leq 50 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$, площадь излучающей площадки $p-n$ перехода $S_{\text{ист}} \approx 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ (стороны прямоугольной площадки: $a=0,002$ мм, $b=0,1$ мм), телесный угол, в котором происходит излучение, $\theta_{\text{с.ист}} \approx \pi$. Общий поток $\Phi_{\text{э.ист}}$, излучаемый светодиодом, может быть определен по формуле (202)

$$\Phi_{\text{э.ист}} = \pi L_{\text{э.ист}} S_{\text{ист}} = \pi \cdot 50 \cdot 0,2 \cdot 10^{-5} \approx 0,3 \text{ мВт}. \quad (314)$$

Учитывая, что значение максимальных расстояний, измеряемых при помощи проектируемого светодальномера, весьма невелико ($S_{\max}=0,3$ км), и желая иметь небольшие габаритные размеры светодальномера, априорно принимаем фокусное расстояние объектива оптической системы приемопередатчика $f' = 80$ мм. В качестве объектива оптической системы целесообразно использовать простой двухлинзовый объектив, обеспечивающий удовлетворительную абберационную коррекцию. Влиянием остаточной сферической абберации $\delta U'$ можно пренебречь, если она удовлетворяет условию

$$\delta U' \leq \frac{b}{3f'} \rho'', \quad (315)$$

где b — большая сторона прямоугольной излучающей площадки светодиода. Следовательно, допустимое значение сферической абберации

$$\delta U' \leq \frac{0,1\rho''}{3 \cdot 80} \approx 86''. \quad (316)$$

Такое значение остаточной сферической абберации можно обеспечить при диаметре входного зрачка объектива $D = 30$ мм (или относительном отверстии объектива не более $1:2,7$ [118]). Коэффициент эффективности передающей оптической системы светодальномера, определяемый по формуле (210),

$$K_{\text{пер}} = 0,45\tau_0 \frac{(1+m)mD^2}{\theta_{\text{ист}} f'^2} = 0,45 \cdot 0,9 \frac{(1+0,7)0,7 \cdot 30^2}{\pi \cdot 80^2} \approx 0,027, \quad (317)$$

где 0,45 — коэффициент, учитывающий потери при прохождении светового потока через полупрозрачное зеркало; $\tau_0 \approx 0,9$ — коэффициент пропускания двухлинзового склеенного объектива; $m = 0,7$ — глубина внутренней модуляции интенсивности излучаемого светодальномером потока; $\theta_{\text{ист}} \approx \pi$ — расходимость потока, излучаемого светодальномером, ср.

Приняв входной (выходной) зрачок трипельпризмы-отражателя $D_{\text{эл}} = 30$ мм, можно по формуле (223) определить коэффициент эффективности этого отражателя

$$K_{\text{отр}} = \tau_{\text{отр}} \frac{D_{\text{эл}}^2 f' \rho''}{b \cdot \delta U' S^2} = 0,9 \frac{30^2 \cdot 80 \cdot \rho''}{0,1 \cdot 86'' \cdot 0,3^2 \cdot 10^{12}} \approx 0,017, \quad (318)$$

где $\tau_{\text{отр}} \approx 0,9$ — коэффициент пропускания трипельпризмы; $S = 0,3$ км — максимальное расстояние, измеряемое светодальномером.

Чтобы дистанция $S_{0.\text{отр}}$ оформления отраженного потока была не менее 0,3 км, необходимо гарантировать при изготовлении трипельпризмы погрешность $\Delta\alpha$ двугранных прямоугольных углов, определяемую по формуле

$$\Delta\alpha \leq \frac{D_{\text{эл}}}{10S} \rho'' = \frac{30\rho''}{10 \cdot 0,3 \cdot 10^6} \approx 2'', \quad (319)$$

что технологически выполнимо.

Учитывая, что при $\Delta\alpha \leq 2''$ $\theta_{\text{отр}} S \leq D_0$, по формуле (240) определяем коэффициент эффективности приемной оптической системы светодальномера (см. рис. 62)

$$K_{\text{пр}} = 0,45\tau_0\tau_{\text{ф}}\tau_{\text{л.с}} = 0,45 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \approx 0,26, \quad (320)$$

где 0,45 — коэффициент, учитывающий потери при прохождении светового потока через полупрозрачное зеркало; $\tau_{\text{ф}} = 0,7$ — коэффициент пропускания интерференционного светофильтра при спектральной полосе пропускания $\Delta\lambda \approx 300 \text{ \AA}$; $\tau_{\text{л.с}} = 0,9$ — коэффициент пропускания линзовой согласующей системы.

Динамический диапазон принимаемого потока, поступающего в фотодиод, с учетом вычисленных коэффициентов эффективности передающей и приемной оптических систем светодаль-

номера и отражателя (317), (318) и (320), может быть определен по формуле (197)

$$\Phi_{\text{э.пи}} = \tau_a^{2S} K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{отр}} \cdot K_{\text{пр}} \cdot \Phi_{\text{э.ист}} = 0,89^{2 \cdot 0,3} \cdot 0,027 \cdot 0,017 \cdot 0,26 \times \\ \times 0,3 \cdot 10^{-3} \approx 28 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}, \quad (321)$$

где $\tau_a \approx 0,89$ — коэффициент пропускания атмосферы для $\lambda_{\text{эф}} = 0,91$ мкм в условиях удовлетворительной видимости.

Следует отметить, что, поскольку глубина модуляции $m \neq 1$, максимальное значение принимаемого потока $\Phi_{\text{э.п. макс}}$ будет несколько больше динамического диапазона.

Поток от фона, поступающий в фотодиод и определяемый по формуле (248), будет

$$\Phi_{\text{э.ф}} = R_{\lambda\text{ф}} \cdot 0,45 \Delta_{\lambda} \tau_0 \tau_{\text{ф}} \tau_{\text{л.с}} \frac{\pi D^3}{4} \left(\frac{2\omega}{\rho'} \right)^2 = \\ = 1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 0,45 \cdot 300 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \frac{\pi 3^2}{4} \left(\frac{5'}{\rho'} \right)^2 \approx 1,7 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}, \quad (322)$$

где $R_{\lambda\text{ф}} \approx 1,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{ср. } \text{Å}}$ — спектральная плотность энер-

гетической яркости фона для $\lambda = 0,91$ мкм (светлых облаков, освещенных полуденным солнцем); 0,45 — коэффициент, учитывающий потери при прохождении потока через полупрозрачное зеркало; $2\omega \approx 5'$ — угловое поле приемной оптической системы светодальномера; $\Delta_{\lambda} = 300 \text{ Å}$ — спектральная полоса пропускания интерференционного светового фильтра.

Как подтверждают результаты вычислений (322) и (321), поток от фона во много раз слабее принимаемого потока при измерении расстояний до 0,3 км, поэтому легко будет опознать отраженный поток.

В качестве приемника излучения в проектируемом светодальномере типа СМ-02 можно использовать кремниевый фотодиод ФД «Порог» [80], имеющий следующие основные технические характеристики: монохроматический пороговый поток для $\lambda_{\text{эф}} = 0,91$ мкм $\Phi_{\text{э.п. пор}} = 5 \cdot 10^{-13} \text{ Вт}$ (при единичной полосе пропускания 1 Гц), интегральная чувствительность $S_i \approx \approx 3/4 \text{ А/Вт}$, темновой ток $i_{\text{т}} \approx 1 \cdot 10^{-7} \text{ А}$, площадь чувствительной зоны $S_{\text{пр}} \approx 10 \text{ мм}^2$, инерционность $\Delta t \approx 10^{-6} \text{ с}$. Несмотря на существенную инерционность, фотодиод вполне приемлем для приема модулированного с частотой 150 МГц отраженного потока, так как одновременно с приемом осуществляется преобразование частоты способом гетеродинирования, и промежуточная частота, на которой работает фазоизмерительное устройство, не превышает 100 кГц.

Помимо условий, необходимых для уверенного опознания отраженного потока, для нормального функционирования фазового светодальномера, в котором разность фаз измеряется

непосредственно, надо, чтобы динамический диапазон $\Phi_{э. \text{пн}}$ принимаемого потока удовлетворял условию (260)

$$\Phi_{э. \text{пн}} \geq 10\Phi'_{элор}. \quad (323)$$

Поскольку значение динамического диапазона принимаемого потока, поступающего в фотодиод, вычисленное по формуле (321), весьма существенно превышает значение порогового потока, проектируемый светодальномер будет нормально функционировать при измерении расстояний, в несколько раз превышающих 0,3 км.

Несмотря на благоприятные энергетические условия, когда принимаемый поток существенно превышает поток от фона и пороговый поток, дальнейшее уменьшение диаметров входных зрачков приемопередатчика светодальномера и отражателя нецелесообразно, так как это практически не изменит габаритов и массы светодальномера и отражателя, но приведет к соответствующему уменьшению принимаемого светового потока. При автоколлимационной оптической схеме приемопередатчика для одновременного уменьшения принимаемого потока и рассеянного светового потока целесообразно уменьшать поток, излучаемый светодиодом, сохраняя постоянным процентное соотношение между излучаемым и принимаемым потоками, путем снижения плотности тока, протекающего через зону $p-n$ перехода (одновременно улучшается фазовость модулированного потока).

Как уже отмечалось во введении, высокоточный геодезический светодальномер типа СМ-02 должен иметь технические возможности, существенно отличающиеся от требований ГОСТ 19223—73: диапазон измеряемых расстояний от нескольких метров до 1 км, допустимая погрешность измерения минимальных расстояний 0,1 мм, а максимальных расстояний не более 1 : 500 000.

При проектировании высокоточного геодезического светодальномера этого типа, для гарантирования надежного определения числа целых фазовых циклов при измерении расстояний в заданном диапазоне, необходимо вести измерение на нескольких фиксированных частотах модуляции. Для исключения влияния фазовой неидентичности в поперечном сечении модулированного потока при измерении минимальных расстояний, а также для использования при приеме энергетического максимума принимаемого потока целесообразно применить коаксиальную оптическую схему приемопередатчика светодальномера. Для обеспечения требуемой точности необходима сверхвысокочастотная модуляция потока излучения, так как в настоящее время для существенного уменьшения погрешности результата прежде всего увеличивают частоту модуляции [68, 74, 92, 125]. На столь высоких частотах невозможно из-за

инерционности модулятора осуществить глубину модуляции $m > 70\%$ с нелинейными искажениями $\gamma < 10\%$, поэтому в качестве модулятора и демодулятора рекомендуется использовать идентичные элементы (или один и тот же элемент), осуществлять модуляцию светового потока по поляризации и индикацию определенной разности фаз балансным компенсационным способом. Именно это позволит практически полностью исключить влияние нелинейных искажений и увеличить глубину модуляции. Кроме того, при индикации определенной разности фаз балансным компенсационным способом приемник излучения может быть весьма инерционным (для осуществления балансного компенсационного способа индикации определенной разности фаз вместо компенсационного способа экстремума можно, например, использовать нулевой способ Ф. П. Носкова).

В качестве модуляторов, работающих на сверхвысоких частотах, в настоящее время применяют кристаллические модуляторы Поккельса, помещенные в объемный резонатор. Принцип действия таких модуляторов основан на использовании линейного электрооптического эффекта при воздействии на кристалл переменного электрического поля стоячей или бегущей волны [84]. При этом вне зависимости от вида модулирующей волны возможна модуляция с согласованием скоростей оптической и модулирующей волн, а также и без такого согласования. Более перспективны модуляторы второго типа, их создают, используя объемный резонатор 2, в максимуме электрического поля которого расположен кристалл 1 таким образом, что оптическая ось кристалла, направление электрического поля и направление распространения светового потока совпадают (см. рис. 44). Недостатком резонаторных модуляторов является их узкополосность, затрудняющая переход с одной фиксированной частоты модуляции на другую без перестройки резонатора. При переходе резонансную частоту изменяют при помощи специальных поршневых компенсаторов 3.

Более широкополосная модуляция может быть реализована при помещении кристалла в поле бегущей модулирующей волны. Например, в модуляторе ДП-665М, построенном по этому принципу, глубина модуляции составила не менее 20% при мощности питания около 1 Вт в полосе частот не менее 600 МГц при средней частоте модуляции 22 ГГц [92].

Введение модулятора непосредственно в оптический резонатор лазера — источника излучения дает возможность при определенных условиях малыми управляющими напряжениями обеспечить значительную глубину модуляции и большую полосу частот модуляции. Следует отметить, при этом примерно в 10 раз уменьшится излучаемый поток и резко возрастут требования, предъявляемые к качеству и обработке электрооптических кристаллов, вводимых в резонатор лазера, поэтому

внутрирезонаторный способ модуляции пока широкого практического применения не получил [84].

Из рассмотренных примеров видно, что для осуществления сверхвысокочастотной модуляции на близких фиксированных частотах целесообразно использовать резонаторный модулятор.

Итак, выбрав в качестве модулятора-демодулятора кристалл КДР, помещенный в объемный резонатор, источника излучения — гелий-неоновый газовый лазер типа ЛГ-56, прием-

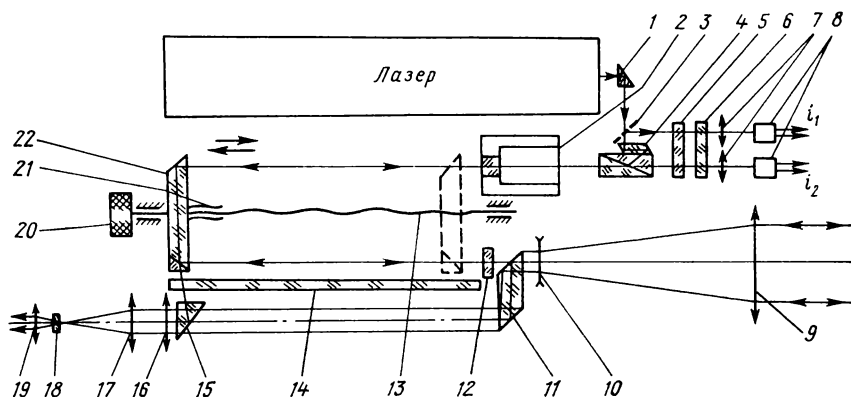


Рис. 63. Схема высокоточного геодезического светодальномера с СВЧ модуляцией для линейных измерений в инженерной геодезии:

1 и 15 — поворотные призмы; 2 — объемный резонатор с кристаллом модулятором-демодулятором; 3 — полупрозрачное зеркало; 4 — биполяризатор; 5 — интерференционный светофильтр; 6 — нейтральный фильтр («серый клин»); 7 — конденсоры; 8 — фотозлектронные умножители; 9 — объектив телескопической коллимирующей системы; 10 — рассеивающая линза телескопической коллимирующей системы; 11 — призмный переключатель; 12 — четвертьволновая пластинка; 13 — ходовой винт; 14 — прозрачная шкала оптической линии задержки; 15 — объектив отсчетного устройства; 16 — объектив визирного устройства; 17 — сетка; 18 — окуляр; 19 — маховичок ходового винта; 20 — гайка-корпус призмного блока; 21 — подвижный призмный блок

ника излучения — фотозлектронный умножитель ФЭУ-38 и используя для индикации определенной разности фаз балансный компенсационный способ, можно построить оптическую схему приемопередатчика проектируемого светодальномера по совмещенному автоколлимационному принципу с разделением излучаемого и принимаемого световых потоков по плоскостям поляризации (рис. 63).

Излучаемый лазером световой поток, диаметр которого не превышает 2 мм, а расходимость — $13'$, призмой 1 направляется в призмный биполяризатор 4, который изготовлен из одинарной призмы Франка — Риттера, дополненной стеклянной призмочкой с двумя зеркальными отражениями, образующей выходную грань для обыкновенного луча. Целесообразно для снижения уровня рассеянного света, помимо биполяризатора 4, между ним и лазером, а также между ним и фотозлектрон-

ным множителем 8 поставить два поляроида, плоскости поляризации которых параллельны плоскостям поляризации соответствующих каналов биполяризатора и составляют между собой угол 90° .

Излучаемый светодальномером модулированный световой поток направляется на отражатель, установленный на противоположном конце измеряемого расстояния. В качестве отражателя целесообразно использовать трипельпризму.

Излучаемый световой поток проходит по одному из каналов биполяризатора 4 (см. рис. 63), а принимаемый, отраженный от трипельпризмы, проходит по обоим каналам биполяризатора 4 благодаря тому, что поток дважды, в прямом и обратном ходах, проходит через четвертьволновую пластинку 12. Эта пластинка представляет собой слой слюды, которая является двухосным кристаллом определенной толщины и создает постоянную разность хода между обыкновенным и необыкновенным лучами равную $\lambda/4$.

Кристалл модулятор — демодулятор 2 рекомендуется использовать в параллельном пучке лучей, так как при непараллельности лучей и оптической оси кристалла возникает разность хода, и плоскополяризованный свет становится эллиптически поляризованным. Однако выходящий из лазера световой поток, расходимость которого не превышает $13'$, при толщине кристалла вдоль оптической оси порядка 20 мм можно считать практически параллельным (расходимость не должна превышать $30'$).

Для изменения пути, проходимого световым потоком в оптической линии задержки, которая заменяет фазовращатель, вдоль измеряемого расстояния перемещают призмный блок 22 (см. рис. 63). Это блок, состоящий из двух склеенных призм, место склейки посеребрено, имеет коэффициент пропускания менее 1% (часть светового потока, излучаемого лазером, используется для подсветки прозрачной шкалы 14 оптической линии задержки). Оправа призмного блока 22 жестко связана с гайкой 21 и оправой блока, состоящего из поворотной призмы 15 и объектива 16 отсчетного устройства. Объектив 16 установлен так, что фокальная плоскость его совпадает с плоскостью делений шкалы 14 оптической линии задержки. При вращении маховичка 20 ходового винта 13 призмный блок 22 и блок 15—16 перемещаются по направляющим вдоль шкалы оптической линии задержки. Величина перемещения определяется путем взятия отсчета по шкале 14.

Во время измерения расстояния призмный блок 11 отведен в сторону, а при ориентировании светодальномера относительно отражателя он введен, но выведен из оптической схемы блок 15—16. Следовательно, визирное устройство светодальномера по существу состоит из двух телескопических систем с общим увеличением Γ

$$\Gamma = \Gamma_T \Gamma_0, \quad (324)$$

где Γ_T — увеличение телескопической коллимирующей системы; Γ_0 — увеличение окулярной телескопической системы.

Для быстрого отыскания отражателя и точного наведения на него светодальномера общее увеличение должно быть не менее $15\times$.

Увеличение отсчетного устройства светодальномера определяется выражением

$$\bar{\Gamma} = \frac{f'_{17} \cdot 250}{f'_{16} \cdot f'_{19}}, \quad (325)$$

где f'_{17} — фокусное расстояние объектива 17; f'_{16} — фокусное расстояние объектива 16; 250 мм — расстояние наилучшего зрения для невооруженного глаза; f'_{19} — фокусное расстояние окуляра.

Проектируемый светодальномер, согласно исходному техническому заданию, предназначен для измерения расстояний от 2 до 1000 м со средней квадратической погрешностью не более $\pm (0,1 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} S)$. Поскольку максимальные измеряемые светодальномером расстояния в 500 раз больше минимальных, при измерении их погрешность результата будет определяться выражением

$$\frac{m_S}{S} = 0,7 \frac{m_{S_y}}{S_y} = \frac{1}{500\,000}, \quad (326)$$

а при измерении минимальных расстояний

$$m_S = 0,7 m_{S_y} = 0,1 \text{ мм}, \quad (327)$$

где S_y — условное расстояние, при измерении которого обеспечивается примерно равное влияние погрешностей основных структурных звеньев светодальномера и внешней среды; m_{S_y} — погрешность измерения условного расстояния светодальномером.

Решая в обратной последовательности приведенные выше зависимости, находим $m_{S_y} = \pm 0,14 \text{ мм}$ и $S_y = 70 \text{ м}$. Следовательно, при измерении расстояний короче $\frac{1}{3} S_y = 23 \text{ м}$ погрешность будет постоянной и равной $\pm 0,1 \text{ мм}$, а при измерении расстояний более $3S_y \approx 210 \text{ м}$ относительная погрешность будет постоянной и равной $2 \cdot 10^{-6}$.

Для обеспечения столь малого влияния погрешностей отдельных звеньев целесообразно выполнять следующее: вести измерение в благоприятных метеорологических условиях, для определения числа целых фазовых циклов использовать модуляцию на нескольких фиксированных частотах, измерять разности фаз компенсационным способом непосредственно при по-

мощи оптической линии задержки, использовать автоколлимационную оптическую схему передающего и приемного оптических трактов, центрировать светодальномер и отражатель при помощи высокоточного оптического центрира или специального жесткого центрира. При этом влияние какой-либо составляющей погрешности можно считать пренебрегаемо малым и не учитывать его, если оно не превышает

$$0,2m_{s_y} \approx 0,03 \text{ мм или } 0,2 \frac{m_{s_y}}{S_y} \approx 2,5 \cdot 10^{-7}.$$

При отсутствии фазовращателя погрешность измерения разности фаз m_ϕ будет определяться в основном погрешностью m_{ϕ_0} индикации определенной разности фаз.

Учитывая, что применение лазера при измерении расстояний, не превышающих 1 км, обеспечивает условия для реализации минимальной контрастной чувствительности приемника излучения, по формуле (195) можно определить погрешность индикации определенной разности фаз балансным компенсационным способом — нулевым способом, предложенным Ф. П. Носковым,

$$m_{\phi_0} = 57^\circ \frac{K_k \sqrt{2}}{k} = \frac{57^\circ \cdot 0,0015 \cdot \sqrt{2}}{1,2} \approx 0,1^\circ, \quad (328)$$

где $K_k \approx 0,001—0,002$ — минимальная контрастная чувствительность ФЭУ; $k=1,2$ — коэффициент, зависящий от выбора напряжений U_0 и U_m с учетом зависимостей (177) и (178); $\sqrt{2}$ — коэффициент, учитывающий увеличение погрешности индикации определенной разности фаз нулевым способом, предложенным Ф. П. Носковым.

Значение основной частоты модуляции при $m_0=0,5$ $m_{s_y}=0,07$ мм определяем по формуле (57)

$$f = \frac{m_{\phi_0} v}{4\pi m_0} = \frac{0,1^\circ \cdot 3 \cdot 10^{11}}{4 \cdot 180^\circ \cdot 0,07} \approx 595 \text{ МГц}, \quad (329)$$

где v — групповая скорость распространения светового потока. В целях упрощения обработки результата измерения целесообразно принять значение основной частоты $f=600$ МГц.

Максимальное значение коэффициента многозначности, определяемое по формуле (32),

$$K_\lambda = \frac{0,2\pi}{m_{\phi_0}} = \frac{0,2 \cdot 180^\circ}{0,1^\circ} = 360. \quad (330)$$

Выбрав коэффициент многозначности $K_\lambda=100$, определим по формуле (48) число вспомогательных частот модуляции, необходимых для однозначного определения числа целых фазо-

вых циклов при измерении максимального расстояния $S_{\max} = 1$ км,

$$n \geq \log_{K_\lambda} \left(S_{\max} \frac{2f}{v} \right) = \log_{100} \left(1 \frac{2 \cdot 6,0 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^5} \right) \approx 1,6. \quad (331)$$

Приняв $n=2$, по формулам (275) определим значения вспомогательных частот

$$\left. \begin{aligned} f_1^* &= f \frac{(K_\lambda - 1)}{K_\lambda} = 594,0 \text{ МГц}, \\ f_2^* &= f \frac{(K_\lambda + 1)(K_\lambda - 1)}{K_\lambda^2} = 599,94 \text{ МГц}. \end{aligned} \right\} \quad (332)$$

Необходимую длину L шкалы 12 (см. рис. 63) оптической линии задержки вычислим по формуле

$$L \geq \frac{v}{2 \cdot 2 \cdot f_1^*} = \frac{3 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 2 \cdot 594 \cdot 10^6} \approx 125 \text{ мм}, \quad (333)$$

где 2 — первый коэффициент в знаменателе, учитывает, что световой поток дважды проходит в оптической линии задержки в прямом и обратном ходах; 2 — второй коэффициент в знаменателе, учитывает двукратное благодаря изломанности хода прохождения светового потока в оптической линии задержки вдоль шкалы 12.

Изменяя последовательно фиксированные частоты модулирующего напряжения, для каждой из них фиксируют отсчеты l , l_1^* и l_2^* по шкале оптической линии задержки, соответствующие среднему из четырех нулевых значений разности фото-токов i_1 и i_2 (см. рис. 62). При этом величина измеряемого расстояния S может быть представлена системой уравнений (40). Решая эти уравнения, последовательно определяют значения разности чисел $N - N_1^*$ по формуле (46), числа N по формуле (47) и измеряемого расстояния S , используя первое уравнение системы (40).

Применение лазера в качестве источника излучения позволяет, не проводя энергетический поверочный расчет, утверждать, что в условиях удовлетворительной видимости и дневной солнечной засветки светодальномер будет нормально функционировать, так как измерять расстояния до 1 км в этом случае можно даже без телескопической коллимирующей системы [74]. Кроме того, при диаметрах выходного зрачка телескопической коллимирующей системы и светового отверстия отражателя порядка 60 мм можно обеспечить практически постоянное значение принимаемого отраженного потока во всем диапазоне измеряемых расстояний (т.е. при переходе от измерения минимальных расстояний к максимальным он будет умень-

шаться всего в несколько раз), при этом постоянство принимаемого сигнала и отношения сигнал/шум создаст оптимальные условия во время измерений.

Однако применение лазерного источника излучения типа ЛГ-56 определяет значение потребляемой светодальномером электрической мощности, которая в проектируемом приборе не может быть менее 60 Вт (из них примерно 40 Вт потребляется источником излучения).

При использовании в качестве источника излучения газоразрядной ксеноновой лампы, работающей в импульсном режиме, как это сделано в серийно выпускаемом фирмой «Керн» светодальномере МЕ-300 («Мекометр»), потребляемая прибором электрическая мощность ~ 12 Вт (т.е. почти вся мощность, порядка 10 Вт, расходуется генератором модулирующего напряжения) [54].

Еще более перспективным источником излучения для светодальномеров, предназначенных для измерения расстояний до нескольких километров, являются полупроводниковые излучатели — светодиоды, обеспечивающие внутреннюю модуляцию на частотах до 1,5 ГГц, и полупроводниковые лазеры, обеспечивающие внутреннюю модуляцию на частотах до 10 ГГц [92]. Но в этом случае возникают определенные технические трудности, связанные с осуществлением демодуляции (фазового детектирования) непосредственно в приемнике излучения. В настоящее время находится в стадии освоения способ гетеродинного приема модулированного оптического излучения при помощи фотоэлектронных умножителей на частотах модуляции до 2 ГГц.

Использование лазера типа ЛГ-56 в качестве источника излучения определяет в основном и габариты приемопередатчика светодальномера вдоль измеряемого расстояния (см. рис. 63). При этом следует отметить, что комплект светодальномера будет состоять из двух основных блоков, связанных кабелем, источника питания — аккумуляторной батареи и приемопередатчика. Два других размера приемопередатчика светодальномера, учитывая многократную изломанность оптической оси его и, следовательно, возможность шарнирного уплотнения в плоскости, перпендикулярной к измеряемому расстоянию, могут не превышать 80—100 мм.

§ 29. СВЕТОДАЛЬНОМЕР ТОЧНЫЙ ТИПА СМ-2

Светодальномер точный типа СМ-2, используемый при проложении ходов городской полигонометрии и создании геодезических сетей местного значения, предназначен для измерения расстояний от 2 м до 2 км с абсолютной погрешностью при измерении минимальных расстояний не более 1 см и с относительной погрешностью при измерении максимальных рас-

стояний не более 1 : 30 000. Этот светодальномер имеет широкое применение при геодезических работах, поэтому его конструкция и методика работы с ним должны быть предельно простыми, экономичными и надежными. Рекомендуются в качестве источника излучения и модулятора использовать светодиод, а в качестве приемника излучения и смесителя — кремниевый фотодиод. Это позволит, помимо повышения экономичности и портативности, улучшить помехозащищенность и уверенно вести измерения в дневных условиях.

При проектировании геодезического светодальномера типа СМ-2 также целесообразно использовать схему фазового светодальномера, в котором для определения числа целых фазовых циклов осуществляют модуляцию на нескольких фиксированных частотах; коаксиальную оптическую схему приемопередатчика; мозаичный трипельпризменный отражатель; непосредственный способ измерения разности фаз при помощи серийно изготовленного радиотехнической промышленностью фазоизмерительного устройства, которое работает на промежуточной частоте, получаемой в результате преобразования частоты модуляции способом гетеродинирования. Технические характеристики и конструктивные параметры светодиода, фотодиода, полупрозрачного зеркала, интерференционного светофильтра и линзовой согласующей системы те же, что были применены для проектирования светодальномера высокоточного типа СМ-02.

Функциональная схема проектируемого светодальномера СМ-2 (рис. 64) отличается от схемы фазового светодальномера, изображенной на рис. 12, тем, что компенсационный способ измерения разности фаз заменен непосредственным способом и добавлена линия «оптического замыкания».

Выполним расчет на точность светодальномера типа СМ-2, для которого $S_y = 300$ м, так как при измерении этого расстояния погрешность равна 10 мм, а относительная погрешность 1 : 30 000. Следовательно, при измерении расстояний менее $1/3 S_y = 100$ м погрешность будет определяться в основном влиянием погрешностей ориентирования и отсчитывания (63):

$$m_s = \sqrt{m_{op}^2 + m_o^2} = 0,7m_{s_y} = 7 \text{ мм}, \quad m_{op} = m_o = 0,5m_{s_y} = 5 \text{ мм}, \quad (334)$$

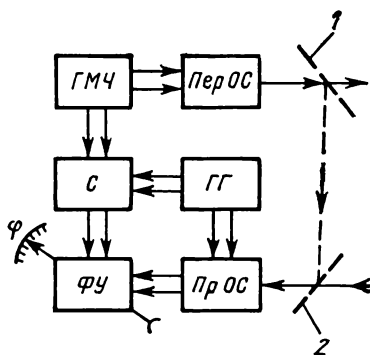


Рис. 64. Функциональная схема точного светодальномера типа СМ-2:

1 и 2 — полупрозрачные зеркала

а при измерении расстояний более $3S_{\text{ус.л}}=900$ м относительная погрешность будет определяться погрешностями частоты и группового показателя преломления атмосферы (62):

$$\frac{m_S}{S} = \sqrt{\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_{n_{\text{гр}}}}{n_{\text{гр}}}\right)^2} = \frac{0,7m_{S_y}}{S_y} \frac{1}{43\,000}, \quad (335)$$

$$\frac{m_f}{f} = \frac{m_{n_{\text{гр}}}}{n_{\text{гр}}} = \frac{0,5m_{S_y}}{S_y} = \frac{1}{60\,000}.$$

Столь невысокие требования к точности задания значения основной модулирующей частоты и определения группового показателя преломления атмосферы позволяют сравнительно легко обеспечить пренебрегаемо малое влияние частотной погрешности, например при стабилизации фиксированных частот модуляции кварцевыми резонаторами, и метеорологических факторов, если учитывать только температуру и давление, определяя их на точке стояния светодальномера. Введение поправок за влияние внешних условий рекомендуется проводить автоматически или при помощи специальных номограмм.

Если при использовании нескольких фиксированных частот модуляции применить для измерения разности фаз то же фазоизмерительное устройство, которое было применено в высокоточном светодальномере типа СМ-02, гарантирующее погрешность измерения разности фаз $m_\varphi=0,5^\circ$, значение основной модулирующей частоты будет

$$f = \frac{m_\varphi v}{4\pi m_0} = \frac{0,5^\circ \cdot 3 \cdot 10^{11}}{4 \cdot 180^\circ \cdot 7} \approx 29,8 \text{ МГц.} \quad (336)$$

Принимаем значение основной частоты модуляции $f=30$ МГц.

Необходимое число вспомогательных частот при выбранном коэффициенте многозначности $K_\lambda=10$ будет

$$n \geq \lg \left(S_{\text{max}} \frac{2f}{v} \right) = \lg \left(2 \frac{2 \cdot 30 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \right) \approx 2,6, \quad (337)$$

где $S_{\text{max}}=2$ км — максимальное расстояние, измеряемое светодальномером.

Принимая $n=3$ и учитывая формулу (313), определяем значения вспомогательных частот модуляции

$$\left. \begin{aligned} f_1^* &= f \left(1 - \frac{1}{K_\lambda} \right) = 30 \left(1 - \frac{1}{10} \right) = 27 \text{ МГц,} \\ f_2^* &= f \left(1 - \frac{1}{K_\lambda^2} \right) = 30 \left(1 - \frac{1}{10^2} \right) = 29,7 \text{ МГц,} \\ f_3^* &= f \left(1 - \frac{1}{K_\lambda^3} \right) = 30 \left(1 - \frac{1}{10^3} \right) = 29,97 \text{ МГц.} \end{aligned} \right\} \quad (338)$$

Схема передающей оптической системы проектируемого точного светодальномера типа СМ-2 отличается от схемы передающей оптической системы светодальномера, изображенного на рис. 53, тем, что в ней в связи с существенным увеличением дальности действия светодальномера для более эффективного использования излучаемого светодиодом потока применена специальная конденсорная система (рис. 65), расчет которой приведен ниже.

В целях повышения квантового выхода и, прежде всего, для уменьшения расходимости излучаемого светодиодом потока целесообразно в непосредственной близости от излучающей площадки светодиода 2 устанавливать апланатический шаровой конденсор (см. рис. 65). Расстояние S_1 из технологических соображений принимают примерно равным 5 мм. Конденсор изготавливают из оптического стекла со значи-

тельным показателем преломления, например из стекла типа ТФ с показателем преломления $n \approx 1,7$. Радиус кривизны сферической поверхности конденсора

$$r_1 = \frac{nS_1}{n' + n} = \frac{1,7 \cdot 5}{1 + 1,7} \approx 3,15 \text{ мм}, \quad (339)$$

где $n' \approx 1$ — показатель преломления воздуха.

Расстояние S'_1 до мнимого изображения излучающей площадки светодиода можно определить по формуле

$$S'_1 = \frac{n}{n'} S_1 = \frac{1,7}{1} (-5) = -8,5 \text{ мм}. \quad (340)$$

Поскольку $\alpha_1 = \frac{1}{2} \theta_{\text{ист}} \approx 90^\circ$ ($\theta_{\text{ист}}$ — расходимость потока, излучаемого светодиодом), следовательно, угол охвата (см. рис. 65)

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{n'}{n} = \arcsin \frac{1}{1,7} \approx 36^\circ. \quad (341)$$

Итак, применение шарового конденсора без учета энергетических потерь в нем повышает эффективность передающей оптической системы светодальномера примерно в 36 раз, т.е. за счет повышения квантового выхода: $2n^2 = 2 \cdot 1,7^2 \approx 5,8$ раза, и за счет уменьшения расходимости:

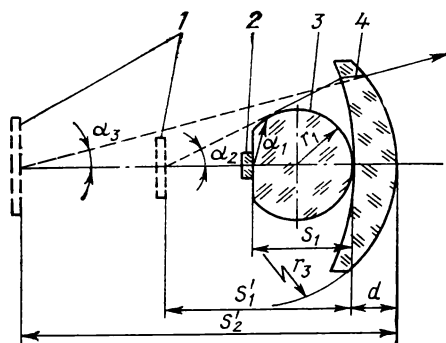


Рис. 65. Оптическая конденсорная система для светодиода:

1 — мнимые изображения светодиода; 2 — светодиод; 3 — апланатический шаровой конденсор; 4 — менисковый апланатический конденсор

$$\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2 = \left(\frac{90^\circ}{36^\circ}\right)^2 \approx 6,2 \text{ раза.} \quad (342)$$

При этом следует учитывать, что размеры приведенной свечящейся площадки $p-n$ перехода будут увеличены в β_k раз,

$$\beta_k = n^2 = 1,7^2 \approx 2,9^x. \quad (343)$$

Но и после прохождения шарового апланатического конденсора расходимость пучка лучей будет значительной, и практически невозможно полностью использовать пучок, так как для этого необходим объектив с относительным отверстием не менее $1:0,7$. Если помимо шарового конденсора применить еще менисковый апланатический конденсор 4 (см. рис. 65), установленный вплотную к первому и изготовленный также из стекла типа ТФ, можно существенно уменьшить расходимость потока.

Допустим, что толщина менискового конденсора $d=3$ мм, радиус кривизны первой сферической поверхности $r_2 \approx S'_1 = -8,5$ мм, радиус кривизны следующей сферической поверхности

$$r_3 = \frac{n(S'_1 - d)}{n' + n} = \frac{1,7(-8,5 - 3)}{1 + 1,7} \approx -7,2 \text{ мм}, \quad (344)$$

а расходимость пучка лучей при выходе

$$2\alpha_3 = 2\arcsin\left(\frac{n'}{n} \sin \alpha_2\right) = 2 \arcsin\left(\frac{1}{1,7} \sin 36^\circ\right) \approx 20^\circ. \quad (345)$$

Общее увеличение сложной конденсорной системы, изображенной на рис. 65,

$$\beta_k = n^3 = 1,7^3 \approx 4,9^x, \quad (346)$$

а расстояние S'_2 до мнимого изображения излучающей площадки светодиода

$$S'_2 = n(S'_1 + d) = 1,7(-8,5 - 3) \approx 19,6 \text{ мм}. \quad (347)$$

Итак, для обеспечения полного использования лучистого потока, излучаемого светодиодом, необходим объектив с относительным отверстием не менее $1:1,5$, т.е. углом охвата не менее 20° .

Если в проектируемом светодиоде типа СМ-2 использовать в качестве объектива оптической системы приемопередатчика простой двухлинзовый объектив с фокусным расстоянием $f'=250$ мм, выбранным из габаритных соображений, диаметр выходного (входного) зрачка светодиода можно определить из условия удовлетворительной абберационной коррекции объектива [см. формулу (315)]

$$\delta U' \leq \frac{1}{3} \beta_k \frac{b}{f'} \rho'' = \frac{1,5 \cdot 0,1 \rho''}{3 \cdot 250} \approx 133''. \quad (348)$$

Такое значение остаточной сферической аберрации можно обеспечить при диаметре входного зрачка объектива $D \approx 100$ мм (или при относительном отверстии объектива 1 : 2,5).

С учетом расстояния S'_2 до мнимого изображения излучающей площадки светодиода (см. рис. 65) размеры передающей оптической системы светодиода будут несколько меньше фокусного расстояния объектива.

Коэффициент эффективности передающей оптической системы с учетом формул (210) и (317) будет

$$K_{\text{пр}} = 0,45\tau_o\tau_k \frac{(1+m)m\beta_k^2 D^2}{\pi f'^2} = \\ = 0,45 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \frac{(1+0,7) 0,7 \cdot 4,9^2 100^2}{\pi 250^2} \approx 0,4, \quad (349)$$

где $\tau_k \approx 0,8$ — коэффициент пропускания конденсорной системы.

Приняв входной (выходной) зрачок трипельпризмы $D_{\text{эл}} = 50$ мм и число элементов мозаичного отражателя $N=6$, расположенных в один или два ряда, можно на основании формул (223) и (318) определить коэффициент эффективности отражателя

$$K_{\text{отр}} = \tau_{\text{отр}} \frac{\rho'' \cdot f' \cdot N \cdot D_{\text{эл}}^2}{8U' \cdot b \cdot \beta_k \cdot S^2} = \frac{0,8 \cdot 250 \cdot 6 \cdot 50^2 \rho''}{133'' \cdot 0,14 \cdot 9 \cdot 2^2 \cdot 10^{12}} \approx 0,0000046, \quad (350)$$

где $\tau_{\text{отр}} \approx 0,8$ — коэффициент пропускания трипельпризмы; $S = 2$ км — максимальное измеряемое расстояние.

Учитывая, что погрешность изготовления двугранных прямоугольных углов трипельпризм отражателя не превышает $1''$, следовательно, $\theta_{\text{отр}} \leq 10''$ и $\theta_{\text{отр}} S \leq D$, можно с учетом формул (240) и (320) определить коэффициент приемной оптической системы светодиода

$$K_{\text{пр}} = 0,45\tau_o\tau_{\phi}\tau_{\text{л.с}} = 0,45 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \approx 0,255. \quad (351)$$

Динамический диапазон принимаемого потока с учетом численных коэффициентов эффективности передающей и приемной оптических систем светодиода и отражателя (361), (362) и (363), а также с учетом потока, излучаемого светодиодом (314), может быть определен по формуле (197)

$$\Phi_{\text{э.ли}} = \tau_a^2 S K_{\text{пр}} K_{\text{отр}} K_{\text{пр}} \Phi_{\text{э.ист}} = \\ = 0,89^2 \cdot 2 \cdot 0,4 \cdot 0,0000046 \cdot 0,255 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \approx 9 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}, \quad (352)$$

где $\tau_a \approx 0,89$ — коэффициент пропускания атмосферы для $\lambda_{\text{эф}} = 0,91$ мкм в условиях удовлетворительной видимости.

Динамический диапазон принимаемого потока в проектируемом светодиоде типа СМ-2 будет примерно в триста раз слабее динамического диапазона, принимаемого фотодиодом в

светодальномере типа СМ-02 (321), поэтому для ослабления влияния потока от фона необходимо выполнить более тщательную пространственную и спектральную селекцию принимаемого потока. В этом случае поток от фона, поступающий в фотодиод и определяемый по формулам (248) и (322), будет

$$\Phi_{\text{эф}} = R_{\lambda\phi} 0,45 \tau_o \Delta_{\lambda} \tau_{\phi} \tau_{\text{л.с}} \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{2\omega}{\rho'} \right)^2 =$$

$$= 1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 0,45 \cdot 0,9300 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \frac{\pi 10^2}{4} \left(\frac{2'}{\rho'} \right)^2 \approx 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}, \quad (353)$$

где $2\omega = 2'$ — угловое поле приемной оптической системы светодальногомера (угловое поле должно удовлетворять условию $2\omega > \theta_{\text{пер}}$); $\Delta_{\lambda} = 300 \text{ \AA}$ — спектральная полоса пропускания интерференционного светофильтра (при $\tau_{\phi} = 0,7$).

В действительности поток от фона будет несколько меньше значения, определенного по формуле (353), так как часть углового поля занята изображением отражателя.

Максимальное значение принимаемого потока $\Phi_{\text{э.п. макс}}$ будет в $1:t$ раз больше динамического диапазона $\Phi_{\text{э.ши}}$ (где $t = 0,7$ — глубина модуляции). Кроме того, принимаемый поток модулирован, следовательно, опознание его при наличии несколько меньшего потока от фона будет уверенным и четким.

Значение динамического диапазона принимаемого потока, поступающего в фотодиод, вычисленное по формуле (352), примерно в 100 раз превышает значение монохроматического порогового потока ($\Phi_{\text{э.л. пор}} \approx 5 \cdot 10^{-13} \text{ Вт}$). А для надежного и быстрого измерения необходимо не менее чем десятикратное превышение [см. формулу (260)], поэтому здесь гарантированы все необходимые условия для измерения светодальныммером максимальных расстояний.

Как отмечалось ранее [см. формулу (349)], использование внутренней модуляции позволяет увеличить коэффициент эффективности $K_{\text{пер}}$ передающей оптической системы светодальногомера в $(1+m)$ раз, где m — глубина модуляции. Дальнейшее повышение коэффициента эффективности за счет соответствующего увеличения динамического диапазона плотности тока, проходящего через зону $p-n$ перехода, возможно при введении дополнительной внутренней импульсной модуляции интенсивности излучаемого светодиодом потока, при этом светодальныйномер становится комбинированным [см. формулу (138)],

$$K_{\text{пер}} = 0,45 \tau_o \tau_{\kappa} \frac{(1+m) m \beta_{\kappa}^2 D T_{\kappa}}{\pi f' \tau_{\kappa}}, \quad (354)$$

где T_{κ} — период повторения импульсов излучения; τ_{κ} — длительность импульсов излучения.

Приведенная зависимость (354) справедлива при условии, если максимальное мгновенное значение плотности тока не

превышает предельного значения плотности тока, определяемого насыщением или разрушением зоны $p-n$ перехода.

Из сравнения зависимостей (349) и (354) видно, что введение дополнительной внутренней импульсной модуляции увеличивает коэффициент эффективности передающей оптической системы в K раз,

$$K = \frac{T_{\text{и}}}{\tau_{\text{и}}}. \quad (355)$$

Рекомендации, связанные с выбором конкретных значений длительности $\tau_{\text{и}}$ импульсов излучения и периода $T_{\text{и}}$ повторения их, приведены в § 13.

Дополнительное увеличение эффективности передающей оптической системы светодающего расширяет диапазон действия прибора. В тех случаях, когда нет необходимости увеличивать дальность действия светодающего, введение дополнительной внутренней импульсной модуляции интенсивности в светодиодах позволяет уменьшить среднеинтегральное за период повторения импульсов значение плотности тока. Это влечет за собой улучшение фазовости модулированного потока и, следовательно, повышение точности особенно при измерении минимальных расстояний.

Требования, предъявляемые к техническому геодезическому светодающему типа СМ-5, который используют преимущественно при проложении теодолитных ходов повышенной точности для измерения расстояний от 5 до 500 м с погрешностью не более 5 см, существенно легче требований, предъявляемых к геодезическому светодающему типа СМ-2. Функциональные и оптические схемы этих светодающих идентичны, поэтому здесь не будет приведен расчет светодающего типа СМ-5. Значительно больший интерес представляют особенности расчета и проектирования импульсного светодающего для спутниковой геодезии и светодающего-рефрактометра.

§ 30. ИМПУЛЬСНЫЙ СВЕТОДАЮЩИЙ ДЛЯ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ

При решении геодезических задач с использованием искусственных спутников Земли (ИСЗ) производят одновременное измерение расстояний до ИСЗ, как правило, с четырех станций слежения, расположенных на Земле и на значительном удалении друг от друга (до 3 тыс. км и более). Высота орбиты подавляющего большинства запущенных к настоящему времени геодезических ИСЗ (например, «Анна», «Эхо» и «Пагеос») не более 5000 км. Учитывая необходимость измерения наклонных расстояний (желательно, чтобы зенитное расстояние было $60-85^\circ$), дальность действия проектируемого светодающего

должна быть порядка 10 000 км, а погрешность измерения не более 1 м.

При проектировании светодальномера для спутниковой геодезии следует учесть ряд дополнительных особенностей и трудностей, не свойственных обычным геодезическим светодальномерам.

Проектируемый светодальномер является неотъемлемой частью сложной и совершенной станции слежения за ИСЗ, при помощи которой выполняют целый комплекс измерений. Поэтому целесообразно, например, в качестве объектива приемной оптической системы светодальномера использовать главный телескоп станции, диаметр входного зрачка может достигать 640 мм [37]. Наведение (гидирование) главного телескопа станции и всех блоков, жестко связанных с ним, осуществляется автоматически, при этом погрешность наведения $m_n \geq 1'$ [137].

Специально для повышения эффективности использования излучаемого светодальномером пучка лучей может производиться дополнительное более точное автоматическое наведение с погрешностью $m_n \geq 5''$, основанное на результатах обработки при помощи электронно-вычислительной машины (ЭВМ) данных точного ориентирования станции слежения по звездам и осуществляемое при помощи специальных подвижных оптических компенсаторов, которые устанавливаются между источником излучения — лазером и оптической передающей системой светодальномера [137].

Также при помощи ЭВМ, входящей в комплект станции слежения, автоматически каждую секунду выполняется обработка светодальномерных измерений, вносятся соответствующие поправки, затем результат измерений фиксируется в кодированном виде на перфоленте или на магнитофонной пленке.

Для обеспечения необходимой синхронизации измерений, выполняемых различными станциями слежения, каждая может снабжаться вместо кварцевых атомными часами, стабильность которых не хуже 10^{-9} [137]. Период колебаний этих весьма точных часов используется в качестве рабочей меры при измерении расстояний проектируемым светодальномером.

Измерение расстояний до ИСЗ ведется обычно в локационном режиме, когда отражателем является наружная диффузионно рассеивающая поверхность геодезического ИСЗ.

Измерение расстояния выполняется быстро, и его нельзя повторить. Следовательно, нет возможности методикой измерения исключить влияние некоторых систематических погрешностей и уменьшить влияние случайных погрешностей. Однако поскольку приближенные параметры орбиты ИСЗ известны заранее, грубые промахи исключены. Кроме того, траектория движения ИСЗ плавная и непрерывная, поэтому эти дополнительные обстоятельства позволяют при последующей обра-

ботке результатов измерений уменьшить влияние случайных погрешностей последовательного ряда измерений.

При прохождении света через атмосферу оказывает существенное влияние наличие даже легкой облачности.

Помимо обеспечения требуемой точности, как уже отмечалось, при измерении расстояний до ИСЗ с разных станций слежения необходимо гарантировать синхронность этих измерений. Допустимая асинхронность Δt может быть определена по формуле

$$\Delta t \leq \frac{0,1 m_s}{v_c} = \frac{0,1 \cdot 1}{7400} \approx 1,35 \cdot 10^{-5} \text{ с}, \quad (356)$$

где $m_s = 1$ м — допустимая погрешность измерения расстояний; 0,1 — коэффициент, учитывающий пренебрегаемо малое влияние составляющей погрешности (в данном случае из-за асинхронизации отдельных измерений); $v_c = 7400$ м/с — скорость движения ИСЗ.

Оптимальной схемой для разработки светодальномера, удовлетворяющего требованиям спутниковой геодезии, является схема импульсного светодальномера. Функциональная схема импульсного светодальномера со счетчиком временных калиброванных импульсов представлена на рис. 6 (возможны и другие схемные решения). Величина измеряемого расстояния в этом случае определяется выражением

$$S = \frac{c}{2f} N + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad (357)$$

где c — скорость света в вакууме; f — частота повторения временных калиброванных импульсов; δ_1 — постоянная поправка светодальномера; δ_2 — поправка за искажение формы стоп-импульса; δ_3 — поправка за влияние атмосферы.

Влияние погрешностей определения поправок δ_1 , δ_2 и δ_3 можно не учитывать, если погрешности не превышают $0,1 m_s = 0,1$ м.

Постоянная поправка δ_1 светодальномера определяется по результатам калибровок светодальномера с использованием линии оптического замыкания и эталонного базиса, выполняемых до и после сеанса измерения расстояний до ИСЗ.

Поправка δ_2 за искажение формы стоп-импульса определяется и учитывается автоматически непосредственно во время измерений расстояний при помощи соответствующих радиотехнических устройств.

Поправка δ_3 за влияние атмосферы учитывает значение среднеинтегрального группового показателя преломления при двукратном прохождении светового импульса в атмосфере (помимо космического пространства). Для определения этой поправки создают математическую модель атмосферы, учитывая физико-географические и метеорологические условия в районе

станции слежения. Как показали результаты исследований, выполненных американскими учеными [137], абсолютная погрешность определения поправки этим способом даже при измерении наклонных расстояний может не превышать 3 см.

Например, можно аппроксимировать закон изменения показателя преломления атмосферы в зависимости от высоты экспоненциальной зависимостью, тогда поправка за влияние атмосферы может быть вычислена по формуле [79]

$$\delta_3 = \int_0^H \frac{(n_{\text{гp}} - 1)}{\sin \alpha} e^{aH} dH, \quad (358)$$

где H — высота ИСЗ над поверхностью Земли; $n_{\text{гp}}$ — групповой показатель преломления атмосферы, определяемый на станции слежения; α — угол наклона измеряемого расстояния; e — основание натуральных логарифмов; a — коэффициент, учитывающий изменение показателя преломления атмосферы в зависимости от высоты.

При измерении расстояний импульсным светодальномером стремятся обеспечить пренебрегаемо малое влияние погрешностей: 1) пространственного ориентирования (геометрической редукции); 2) учета метеорологических факторов и атмосферной рефракции; 3) рабочей меры (погрешности частоты генератора калиброванных временных импульсов). Следовательно, допустимое значение длительности старт- и стоп-импульсов, определяющей доминирующую инструментальную погрешность — погрешность фиксации измеряемого интервала времени, можно вычислить по формуле (71)

$$\tau_{\text{и}} \leq \frac{5m_s \sqrt{2}}{c} = \frac{5 \cdot 1 \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot 10^8} \approx 23 \text{ нс}, \quad (359)$$

где $m_s = 1$ м — допустимая погрешность измерения расстояний; $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме; 5 — коэффициент, учитывающий, что

$$m_{\tau_{\text{и}}} \approx 0,2\tau_{\text{и}}.$$

В качестве источника излучения проектируемого импульсного светодальномера, например, можно использовать твердотельный лазер на рубине ОГМ-20, работающий в режиме монопериодного излучения (с модулятором добротности). Он имеет следующие основные конструктивные параметры и характеристики: длина волны излучения $\lambda = 0,6943$ мкм; энергия излучаемого импульса $E_{\text{и}} = 0,4$ Дж, длительность излучаемого импульса $\tau_{\text{и}} = 20$ нс, частота следования импульсов измерения (следовательно, возможная частота измерения расстояний) 1 Гц, расходимость излучаемого светового потока $\theta_{\text{ист}} = 2'$, потребляемая лазером электрическая мощность 20 МВт (могут

быть использованы лазеры, излучающие импульсы большей интенсивности [37]).

Частоту f временных калиброванных импульсов, или необходимое быстродействие счетчика, можно определить с учетом формулы (72)

$$f \geq \frac{m_{\Delta N} c}{\sqrt{2} m_s} = \frac{0,5 \cdot 3 \cdot 10^8}{\sqrt{2} \cdot 1} \approx 106 \text{ МГц}, \quad (360)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме; $m_s = 1$ м — допустимая погрешность измерения; $m_{\Delta N} = 0,5$ — погрешность счетчика временных калиброванных импульсов.

Для удобства обработки результата измерения принимаем частоту $f = 100$ МГц. Современные электронные счетчики обеспечивают счет временных калиброванных импульсов, чередующихся с такой частотой.

В проектируемом импульсном светодальномере целесообразно использовать биаксиальную оптическую схему приемопередатчика с линией «оптического замыкания», позволяющей осуществлять внутреннюю калибровку светодальномера.

Для обеспечения идентичности путей прохождения электрических сигналов, соответствующих старт- и стоп-импульсам, а также для сравнения формы и амплитуды этих импульсов весьма незначительная часть излучаемого светодальномером импульса при помощи линии «оптического замыкания» поступает в отдельный фотоэлектрический приемник (например, специальный фотодиод), а отраженный импульс через приемную оптическую систему светодальномера поступает в фотоэлектронный умножитель. Сравнение формы и амплитуды старт- и стоп-импульсов, а также нахождение их энергетических «центров тяжести» осуществляется автоматически при помощи специальных радиотехнических устройств.

Необходимое увеличение телескопической коллимирующей системы, являющейся передающей оптической системой всякого лазерного светодальномера (см. рис. 52), определяется выбором значения расходимости $\theta_{\text{пер}}$ светового потока, излучаемого светодальномером. Оно должно удовлетворять условию

$$\theta_{\text{пер}} \geq 2m_n, \quad (361)$$

где m_n — погрешность наведения передающей оптической системы светодальномера на ИСЗ.

Наведение (гидрирование) главного телескопа и всего, что жестко связано с ним, на ИСЗ осуществляется автоматически, при этом погрешность наведения $m_n \geq 1'$. Следовательно, учитывая условие (361), можно обойтись без применения телескопической коллимирующей системы для формирования светового потока, излучаемого светодальномером, т. е. $\theta_{\text{пер}} = \theta_{\text{ист}} = 2'$.

Но из-за слишком большой расходимости $\theta_{\text{пер}}$ излучаемого пучка по сравнению с угловыми размерами ИСЗ значительная часть лучей пройдет мимо ИСЗ. Поэтому для повышения эффективности использования излучаемого светодальномером пучка лучей производится дополнительное более точное наведение (с погрешностью $m_n \geq 5''$) оси излучаемого пучка лучей на ИСЗ. Увеличение Γ_T необходимой в данном случае телескопической коллимирующей системы определяем по формуле (218)

$$\Gamma_T = \frac{\theta_{\text{пер}}}{\theta_{\text{ист}}} = \frac{2m_n}{\theta_{\text{ист}}} = \frac{2 \cdot 5''}{2 \cdot 60''} \approx 0,08^x, \quad (362)$$

где $m_n \approx 5''$ — погрешность ориентирования оси излучаемого светодальномером пучка лучей относительно ИСЗ (в действительности, как правило, погрешность ориентирования в несколько раз больше $5''$).

Энергия светового импульса, отраженного от ИСЗ и попадающего в приемник излучения, с учетом влияния виньетирования при отражении, определяемого по формуле (232), может быть вычислена по итоговой формуле, приведенной в восьмом примере табл. 13:

$$\begin{aligned} E_{\text{пп}} &= E_{\text{и}} \tau_a^{2S} \tau_T \tau_K \tau_{\text{оп}} \tau_{\text{ф}} \tau_{\text{л.с}} \frac{\rho D_{\text{ИСЗ}}^2 D^2}{4 \theta_{\text{пер}}^2 S^4} = \\ &= 0,4 \cdot 0,975^{2 \cdot 20} \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \frac{0,9 \cdot 40\,000^2 \cdot 640^2 (\rho'')^2}{4 (10'')^2 10^{40}} \approx \\ &\approx 0,16 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}, \end{aligned} \quad (363)$$

где $\tau_a \approx 0,975$ — среднее интегральное значение коэффициента пропускания атмосферы (вычисленное по формуле Рокара (394) и соответствующее условиям хорошей визуальной видимости); $S_a \approx 20$ км — вертикальная толщина атмосферы (при зенитных расстояниях $60-85^\circ$); $\tau_T = 0,8$ — коэффициент пропускания телескопической коллимирующей системы; $\tau_K = 0,9$ — коэффициент пропускания подвижного оптического компенсатора; $\tau_{\text{оп}} = 0,8$ — коэффициент пропускания главного телескопа; $\tau_{\text{ф}} = 0,5$ — коэффициент пропускания интерференционного светофильтра, обеспечивающего спектральную полосу пропускания $\Delta_\lambda \approx 15 \text{ \AA}$; $\tau_{\text{л.с}} = 0,9$ — коэффициент пропускания линзовой согласующей системы; $\rho = 0,9$ — коэффициент диффузионно рассеивающего отражения от поверхности ИСЗ, которая покрыта напыленным алюминием; $D_{\text{ИСЗ}} = 40\,000$ мм — диаметр ИСЗ (на пример диаметр ИСЗ «Эхо»); $D = 640$ мм — максимальный диаметр входного зрачка [137]; $S = 10\,000$ км — измеряемое расстояние.

Учитывая незначительную энергию отраженного светового импульса, в проектируемом светодальномере необходимо для обеспечения условий нормального функционирования прибора

не только ночью, но и днем использовать, помимо пространственной (угловое поле равно удвоенной погрешности наведения главного телескопа на ИСЗ) и спектральной селекций (спектральная полоса пропускания интерференционного светофильтра не более 15 Å), временную селекцию. Последнюю осуществляют при помощи специального синхронизирующего устройства, включающего ФЭУ на несколько микросекунд, в течение которых ведется прием отраженного светового импульса.

В качестве приемника излучения в проектируемом импульсном светодальномере целесообразно использовать, например, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-77 [8] с многощелочным фотокатодом типа С-11, который при приеме светового потока с $\lambda = 0,6943$ мкм имеет квантовую эффективность от 2 до 5% (ФЭУ-77 имеет следующие основные конструктивные параметры и характеристики: максимальная длительность анодных импульсов 5 нс, чувствительность фотокатода $S_{\phi} = 4$ мА/Вт, интегральная чувствительность $S_i = 100$ А/лм, при приеме светового потока с $\lambda = 0,6943$ мкм монохроматический пороговый поток $\Phi_{\lambda \text{ пор}} = 4 \cdot 10^{-13}$ лм/Гц^{1/2}, диаметр фотокатода 5 мм, напряжение питания 1400 В).

При осуществлении лазерной локации Луны приемная система действовала удовлетворительно, когда отраженный световой импульс выбивал лишь один фотоэлектрон [26]. Поскольку расстояния до ИСЗ значительно меньше, а также для более упрощенного опознавания отраженного импульса и уверенного определения его энергетического центра в импульсных светодальномерах спутниковой геодезии для дневных и ночных измерений устанавливают такой пороговый уровень принимаемого импульса, который соответствует 5 фотоэлектронам [137].

Итак, для гарантирования удовлетворительной работы проектируемого импульсного светодальномера энергия принимаемого ФЭУ отраженного импульса должна быть не менее порогового значения $E_{\text{и. пор}}$, определяемого по формуле

$$E_{\text{и. пор}} = \frac{n_0 h c}{\lambda \eta} = \frac{5 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{14}}{0,6943 \cdot 0,05} \approx 0,28 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}, \quad (364)$$

где $n_0 \geq 5$ — пороговое число фотоэлектронов; $h = 6,62 \times 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^{14}$ мкм/с — скорость света в вакууме; $\lambda = 0,6943$ мкм — длина волны лазерного излучения; $\eta \leq 5\%$ — квантовая эффективность многощелочного фотокатода.

Энергия $E_{\text{и. п}}$ принимаемого ФЭУ-77 отраженного светового импульса, вычисленная по формуле (363), даже при условии обеспечения максимальной точности ориентирования оси излучаемого светодальномером пучка лучей относительно ИСЗ и при максимальных размерах ИСЗ во много раз меньше порогового значения $E_{\text{и. пор}}$, определяемого по формуле (364) и гарантирующего удовлетворительную работу светодальномера,

поэтому максимальное измеряемое светодальномером расстояние $S_{\max}$ будет значительно меньше расстояния $S=10\,000$ км:

$$S_{\max} \approx \frac{S}{\sqrt[4]{\frac{E_{\text{и.пор}}}{E_{\text{и.п}}}}} = \frac{10\,000}{\sqrt[4]{\frac{0,28 \cdot 10^{-16}}{0,16 \cdot 10^{-20}}}} \approx 870 \text{ км.} \quad (365)$$

Наиболее перспективным направлением в увеличении дальности действия светодальномера до 10 000 км и более является использование специальных ИСЗ, поверхность которых представляет собой мозаичный трипельпризменный отражатель (увеличение энергии световых импульсов, излучаемых лазером, расширение входного зрачка приемной оптической системы светодальномера и повышение квантовой эффективности фотокатода ФЭУ менее эффективно). Например, если использовать специальный ИСЗ сферической формы, диаметр сферы 0,6 м, с 426 трипельпризмами, равномерно расположенными по наружной поверхности, запуск такого ИСЗ предполагается осуществить в ближайшее время [137], то дальность действия проектируемого светодальномера возрастет в K раз:

$$K \approx \sqrt{\frac{\sqrt{\pi} D'_{\text{ИСЗ}}}{\theta_{\text{отр}} D_{\text{ИСЗ}}}} = \sqrt{\frac{\sqrt{\pi} \cdot 0,6 \cdot \rho''}{10'' \cdot 40}} \approx 23, \quad (366)$$

где $\sqrt{\pi}$ — расходимость пучка лучей при диффузионно рассеивающем отражении (плоский угол); $D'_{\text{ИСЗ}} = 0,6$ м — диаметр мозаичного трипельпризменного ИСЗ; $\theta_{\text{отр}} \approx 10''$ — расходимость пучка лучей при отражении от трипельпризмы; $D_{\text{ИСЗ}} = 40$ м — максимальный диаметр ИСЗ при измерении расстояния локационным способом.

Учитывая результаты вычислений (365) и (366), можно определить, что переход от локационного способа измерения к измерению расстояний с использованием трипельпризменных отражателей позволяет увеличить дальность действия импульсного светодальномера до 20 000 км.

В заключение следует отметить, что несмотря на ряд указанных выше технических трудностей, связанных с созданием и использованием спроектированного импульсного лазерного светодальномера, в будущем благодаря существенному повышению инструментальной разрешающей способности до 5—10 см (за счет использования более кратковременных импульсов с $\tau_{\text{и}} \leq 1$ нс) подобные светодальномеры найдут широкое применение при решении различных задач спутниковой геодезии [137]. При этом замена рубинового твердотельного лазера лазером на неодиме позволит сохранить энергию излучаемых кратковременных импульсов примерно на прежнем уровне.

§ 31. СВЕТОДАЛЬНОМЕР-РЕФРАКТОМЕТР

Светодальномер-рефрактометр предназначен для линейных измерений, связанных с созданием первоклассной (и более точной) государственной геодезической сети. Он должен обеспечить возможность измерения расстояний от 20 до 50 км с погрешностью, не превышающей $2 \cdot 10^{-7}$.

Повышение точности современных геодезических светодальномеров типа СБ-6 связано с решением одной из основных проблем светодальномерной техники — более точного учета влияния метеорологических факторов на скорость распространения светового потока. Объективным способом учета влияния атмосферы на скорость распространения светового потока является определение среднеинтегрального значения показателя преломления воздуха при помощи дисперсионного рефрактометра, основанного на использовании дисперсии света в атмосфере. При использовании двух волн излучения λ_1 и λ_2 среднеинтегральное значение группового показателя преломления атмосферы определяется по формуле (121).

Поскольку, согласно техническому заданию, дальность действия системы светодальномер — рефрактометр должна достигать 50 км, то для обеспечения необходимого уровня принимаемого потока, несущего измерительную информацию, следует в качестве источников излучения использовать лазеры, высокая спектральная интенсивность которых определяет также целесообразность использования их в качестве источника излучения для рефрактометра.

При столь значительной дальности действия прибора в качестве приемника излучения предпочтительно использовать фотоэлектронный умножитель. Следует при этом помнить, что наиболее существенные потери световой энергии происходят в атмосфере, следовательно, значение минимальной длины волны излучения будет определяться границей пропускания атмосферы $\sim 0,4$ мкм, а значение максимальной длины волны излучения — границей спектральной чувствительности ФЭУ $\sim 1,1$ мкм (фотокатод типа С-1).

В качестве источника излучения для светодальномера-рефрактометра обычно используют газовые лазеры, работающие в непрерывном режиме излучения и излучающие поток не менее нескольких милливатт. В выбранном спектральном диапазоне от 0,4 до 1,1 мкм создают излучение с минимальной длиной волны $\lambda = 0,4416$ мкм лазеры на смеси гелия и паров кадмия. Затем можно получать излучение на шести различных волнах в диапазоне от 0,458 до 0,518 мкм, если использовать в качестве источника излучения газовый лазер на ионизированном аргоне. Серийно выпускаемый отечественной промышленностью лазер на ионизированном аргоне ЛГ-106 весьма громоздкий (более 1 м длиной), при непрерывном излучении по-

требляет более 3 кВт электрической мощности и требует водяного охлаждения. Наконец, наиболее распространенные газовые гелий-неоновые лазеры работают на двух основных волнах излучения — 0,6328 и 1,153 мкм. Излучение с длиной волны 1,153 мкм не только почти не воспринимается фотокатодом ФЭУ, но и может, как показывает анализ тонкой структуры поглощения атмосферы, существенно ослабляться при прохождении в атмосфере.

Итак, в качестве источников излучения в проектируемом светодоляномере-рефрактометре целесообразно использовать

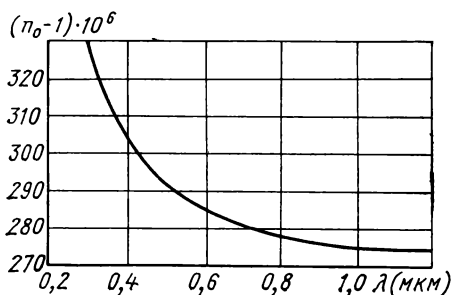


Рис. 66. Изменение показателя преломления сухого воздуха в стандартных условиях в зависимости от длины волны

гелий-кадмиевый лазер (ЛГ-63) с длиной волны излучения $\lambda_1 = 0,4416$ мкм и гелий-неоновый лазер (ЛГ-56) с длиной волны излучения $\lambda_2 = 0,6328$ мкм, при этом разность показателей преломления $\Delta n_0 \approx 13 \cdot 10^{-6}$ (рис. 66).

Лазер ЛГ-63 имеет следующие основные конструктивные характеристики и параметры: расходимость излучаемого потока $\theta_{\text{ист.1}} = 2'$, диаметр излучаемого пучка лучей $D_{\text{ист.1}} = 2$ мм,

мощность излучаемого потока $\Phi_{\text{ист.1}} = 8$ мВт, потребляемая электрическая мощность 200 Вт, длина лазера 500 мм.

Лазер ЛГ-56 имеет следующие основные конструктивные характеристики и параметры: расходимость излучаемого потока $\theta_{\text{ист.2}} = 13'$, диаметр излучаемого пучка лучей $D_{\text{ист.2}} = 2$ мм, мощность излучаемого потока $\Phi_{\text{ист.2}} = 2$ мВт, потребляемая электрическая мощность 50 Вт, длина лазера 350 мм.

Учитывая существенное различие длин волн излучения λ_1 и λ_2 , следует выбрать наиболее подходящий для каждой из них фотоэлектронный умножитель. Это позволит частично скомпенсировать неодинаковые потери при прохождении волн в атмосфере, а применение узкополосных интерференционных светофильтров или дихроичных зеркал четко разделить их при приеме.

Наибольшей интегральной чувствительностью благодаря значительной квантовой эффективности, достигающей 22%, обладают сурьмяно-цезиевые фотокатоды типа С-6, но они чувствительны в сравнительно узком диапазоне спектра (0,3—0,6 мкм) с максимальной чувствительностью для потока с $\lambda \approx 0,4$ мкм (например, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-46). В качестве приемника излучения с $\lambda_2 = 0,6328$ мкм целесооб-

разно использовать фотоэлектронный умножитель ФЭУ-38 с многощелочным фотокатодом типа С-11.

Учитывая доминирующее влияние погрешности определения среднеинтегрального значения показателя преломления атмосферы при помощи рефрактометра, допустимое значение этой погрешности будет

$$\frac{m_n}{n} \leq \frac{m_s}{S \sqrt{2}} = \frac{2}{10^7 \sqrt{2}} \approx 1,4 \cdot 10^{-7}, \quad (367)$$

где $m_s/S = 2 \cdot 10^{-7}$ — допустимая погрешность измерения расстояния светодальномер-рефрактометром; $\sqrt{2}$ — коэффициент, учитывающий остаточное влияние всех остальных неучтенных погрешностей.

Допустим, что при измерении минимальных расстояний ($S_{\min} = 20$ км) обеспечивается пренебрегаемо малое влияние погрешности m_e определения среднего значения влажности воздуха (это условие возможно выполнить при благоприятных условиях измерений и при определении значений влажности воздуха на обоих концах измеряемого расстояния), тогда формула (122) несколько упростится:

$$\frac{m_n}{n} \approx \frac{(n_0 - 1) m_{\Delta S}}{\Delta_{n_0} S_{\min}} \quad (368)$$

или допустимая погрешность измерения разности оптических путей будет

$$m_{\Delta S} \leq \frac{m_n S_{\min} \Delta_{n_0}}{n (n_0 - 1)} = \frac{1,4 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 13 \cdot 10^{-6}}{10^7 \cdot 284 \cdot 10^{-6}} \approx 0,13 \text{ мм}, \quad (369)$$

где $(n_0 - 1) = 284 \cdot 10^{-6}$ — показатель преломления сухого стандартного воздуха для светового потока с $\lambda = 0,6328$ мкм (см. рис. 66).

Следует отметить, что при измерении максимальных расстояний ($S_{\max} = 50$ км) погрешность определения среднеинтегрального значения показателя преломления атмосферы практически не изменится, так как возрастет погрешность определения среднего значения влажности и ее необходимо будет учитывать. Следовательно, во всем диапазоне измеряемых расстояний проектируемый светодальномер-рефрактометр будет обеспечивать требуемую точность измерений.

Два варианта функционально-оптической схемы светодальномера-рефрактометра были рассмотрены ранее (см. рис. 31 и 32). В этих схемах для повышения точности измерения разности фаз применен компенсационный способ измерения с оптической линией задержки и с плавным изменением частоты модуляции в некотором диапазоне соответственно. Погрешность измерения разности фаз определялась в основном погрешностью индикации определенной разности фаз парафазно-ба-

лансным способом. При использовании в качестве приемников излучения ФЭУ и при гарантировании условий, необходимых для реализации минимальных значений контрастной чувствительности ФЭУ, погрешность индикации определенной разности фаз парафазно-балансным или балансным компенсационным способом не будет превышать $0,1^\circ$.

Учитывая формулу (127), можно определить значение частоты модуляции

$$f = \frac{vm_{\varphi_0}}{\sqrt{2} \pi m_{\Delta S}} = \frac{3 \cdot 10^{11} \cdot 0,1^\circ}{\sqrt{2} \cdot 180^\circ \cdot 0,13} \approx 909 \text{ МГц}, \quad (370)$$

где $m_{\varphi_0} = 0,1^\circ$ — погрешность индикации определенной разности фаз.

Принимаем значение основной частоты модуляции $f = 900 \text{ МГц}$.

Для практической реализации столь значительной частоты модуляции и демодуляции светового потока рекомендуется использовать кристаллические модуляторы Поккельса, помещенные в объемный резонатор (см. рис. 44).

Учитывая формулу (190) и то, что глубина модуляции и демодуляции $m = m_d \approx 0,9$, определяем значение необходимой (для гарантирования требуемой точности при индикации определенной разности фаз) контрастной чувствительности ФЭУ

$$\begin{aligned} K_K &\leq \frac{m_{\varphi_0} m m_d^3}{\rho^\circ [(2-m)(2-m_d) + 0,5 m m_d]} = \\ &= \frac{0,1^\circ \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 3}{\rho^\circ [(2-0,9)^2 + 0,5 \cdot 0,9^2]} \approx 0,00266. \end{aligned} \quad (371)$$

Для гарантирования той же точности при индикации определенной разности фаз балансным компенсационным способом (328) контрастная чувствительность ФЭУ $K_K \leq 0,0005$.

Для реализации первого варианта функциональной схемы светодальномера-рефрактометра, работающего на фиксированных частотах модуляции, необходимо определить число и значение вспомогательных фиксированных частот модуляции.

Максимальное значение коэффициента многозначности, определяемое по формуле (32), в этом случае будет

$$K_\lambda = \frac{0,2\pi}{m_{\varphi_0}} = \frac{0,2\pi \cdot 180^\circ}{0,1^\circ} = 360. \quad (372)$$

Выбрав коэффициент многозначности $K_\lambda = 100$, число вспомогательных частот модуляции можно определить по формуле (48)

$$n \geq \log_{K_\lambda} \left(S_{\max} \frac{2f}{v} \right) = \log_{100} \left(50 \frac{2 \cdot 900 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^5} \right) \approx 2,48. \quad (373)$$

Приняв $n=3$ и учитывая формулы (338), определим значения вспомогательных частот модуляции

$$\left. \begin{aligned} f_1^* &= f \left(1 - \frac{1}{K_\lambda} \right) = 900 \left(1 - \frac{1}{100} \right) = 891 \text{ МГц}, \\ f_2^* &= f \left(1 - \frac{1}{K_\lambda^2} \right) = 900 \left(1 - \frac{1}{100^2} \right) = 899,91 \text{ МГц}, \\ f_3^* &= f \left(1 - \frac{1}{K_\lambda^3} \right) = 900 \left(1 - \frac{1}{100^3} \right) = 899,9991 \text{ МГц}. \end{aligned} \right\} \quad (374)$$

Необходимая длина $l_{\max}$ шкалы оптической линии задержки (см. рис. 31) может быть определена по формуле

$$l_{\max} \geq \frac{v}{2f_1^*} = \frac{3 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 891 \cdot 10^6} \approx 168 \text{ мм}, \quad (375)$$

где 2 — коэффициент, учитывающий двукратное прохождение светового потока в оптической линии задержки.

Для реализации второго варианта функциональной схемы светодальномера-рефрактометра, когда для нахождения числа целых фазовых циклов плавно изменяется частота модуляции, необходимо по формуле (26) определить значение диапазона изменения частоты

$$\Delta f = \frac{1,5v}{S_{\min}} = \frac{1,5 \cdot 3 \cdot 10^5}{20} = 22,5 \text{ кГц}. \quad (376)$$

Поскольку диапазон изменения частот модуляции составляет примерно 0,0025% от значения частоты модуляции, такое изменение частоты можно легко осуществить путем изменения частоты модулирующего напряжения без изменения частоты собственного резонанса объемного резонатора.

Допустимое значение погрешности определения изменения частоты модуляции можно найти по формуле (137)

$$m_{\Delta f} \leq \frac{m_{\Delta S} f}{2S_{\max}} = \frac{0,13 \cdot 900 \cdot 10^6}{2 \cdot 50 \cdot 10^6} \approx 1,2 \text{ Гц}, \quad (377)$$

или относительная допустимая погрешность измерения частоты равна $1,9 \cdot 10^{-3}$, что технически легко выполнимо.

Передающая телескопическая коллимирующая система светодальномера-рефрактометра может иметь те же конструктивные параметры, что и система рассмотренного ранее светодальномера высокоточного типа СБ-6: увеличение $\Gamma_T = 0,038^x$ и световой диаметр объектива $D' = 53 \text{ мм}$.

Приемная телескопическая коллимирующая система светодальномера-рефрактометра для обеспечения необходимого уровня принимаемых потоков и для уменьшения влияния турбулентности атмосферы должна иметь световой диаметр объекти-

ва $D \geq 100$ мм. Диаметр сечения сформированного этой системой пучка лучей, определяемый оптимальными размерами освещенных участков на фотокатодах ФЭУ-46 и ФЭУ-38, должен быть порядка 3 мм.

Аберрационные коррекции приемной и передающей телескопических коллимирующих систем светодальномера-рефрактометра должны быть выполнены для двух волн $\lambda_1 = 0,4416$ мкм и $\lambda_2 = 0,6328$ мкм, при этом следует предусмотреть возможность использования приемной телескопической системы в визуальном наводящем устройстве для ориентирования светодальномера-рефрактометра относительно отражателя.

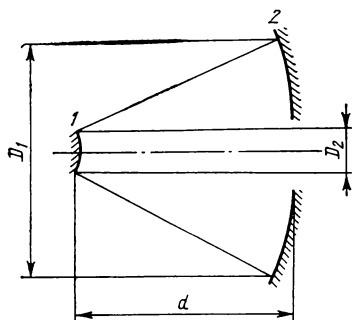


Рис. 67. Зеркальная телескопическая система Мерсенна:

1 — малое зеркало; 2 — основное зеркало

ном наводящем устройстве для ориентирования светодальномера-рефрактометра относительно отражателя.

В качестве одного из возможных вариантов проектирования телескопических коллимирующих систем можно использовать зеркальную телескопическую систему Мерсенна, обычно состоящую из двух параболических зеркал (рис. 67). Эта система благодаря отсутствию преломляющих сред не имеет хроматических аберраций и может быть достаточно хорошо откорректирована в отно-

шении сферической аберрации, комы и астигматизма. Основным недостатком системы Мерсенна — кольцевая форма зрачка, но так как в нашем случае диаметр малого зеркала 1 (см. рис. 67) во много раз меньше диаметра основного зеркала 2, этот недостаток практически не сказывается.

Рассмотрим некоторые особенности расчета и проектирования зеркальной телескопической системы Мерсенна, например, при использовании ее в качестве приемной телескопической системы светодальномера-рефрактометра. Требования к аберрационной коррекции приемной оптической системы дальномера-рефрактометра, как правило, несколько мягче, чем для передающей оптической системы. При использовании приемной оптической системы светодальномера-рефрактометра в визуальном наводящем устройстве требования к аберрационной коррекции те же, что и для зрительных труб геодезических приборов.

Расстояние d между основным и малым зеркалами, из габаритных соображений, принимаем равным 150 мм (см. рис. 67). Световой диаметр D_1 основного зеркала практически равен диаметру входного зрачка приемной оптической системы (так как отношение диаметра малого зеркала к диаметру основного зеркала не превышает $1/10$), следовательно, $D_1 = 100$ мм, а диаметр отверстия $D_2 = 3$ мм, однако диаметр мало-

го зеркала с учетом углового поля визуального канала наведения будет несколько больше.

В качестве исходных параметров определим соответственно радиусы кривизны основного и малого сферических зеркал:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{-2d\Gamma_T}{\Gamma_T - 1} = \frac{-2 \cdot 150 \cdot 33}{(33 - 1)} \approx -309,4 \text{ мм}, \\ r_2 &= \frac{r_1}{\Gamma_T} = \frac{-309,4}{33} \approx -9,4 \text{ мм}, \end{aligned} \right\} \quad (378)$$

где

$$\Gamma_T = \frac{D_1}{D_2} = \frac{100}{3} \approx 33^x$$

— угловое увеличение телескопической системы.

Для последующего сравнения приведем значения сферических aberrаций в угловой мере телескопической системы Мерсенна со сферическими зеркалами, которые для действительных лучей на высотах $h_1=0,5$; $D_1=50$ мм и $h_2=0,7$; $D_2=35$ мм соответственно, равны

$$\left. \begin{aligned} \delta S'_{h_1} &= 8^\circ 02' 34'', \\ \delta S'_{h_2} &= 2^\circ 43' 02''. \end{aligned} \right\} \quad (379)$$

Конечно, такие значения aberrаций недопустимы для приемной оптической системы дальномера-рефрактометра.

При замене сферических зеркал параболическими уравнение меридиональной кривой параболической поверхности основного зеркала будет определяться выражением

$$y_1^2 = 2r_1 x_1 = \frac{4d\Gamma_T}{\Gamma_T - 1} x_1 \approx -618,6 x_1, \quad (380)$$

а уравнение меридиональной кривой параболической поверхности малого зеркала

$$y_2^2 = 2r_2 x_2 = \frac{4d}{\Gamma_T - 1} x_2 \approx -18,6 x_2, \quad (381)$$

где y_1, y_2 — ординаты плоских систем координат зеркал, перпендикулярные к оптической оси телескопической системы; x_1, x_2 — абсциссы плоских систем координат зеркал, совпадающие с оптической осью телескопической системы. При этом начало каждой из систем координат совпадает с вершиной отражающей зеркальной поверхности.

Для определения абсциссы x_1 точки падения действительного луча, идущего на высоте h_1 , на поверхность основного зеркала решаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} y_1^2 &= -618,6 x_1, \\ y_1 &= h_1 = 50 \text{ мм}, \end{aligned} \right\} \quad x_1 = -4,04 \text{ мм}. \quad (382)$$

Затем находим угол i падения этого луча на зеркальную поверхность основного зеркала

$$i = \arctg \left(-\frac{y_1}{r_1} \right) \approx 9^\circ 11'.$$

Угол отраженного луча с оптической осью системы будет

$$U'_1 = -2i = -18^\circ 22'.$$

Расстояние S'_1 от вершины отражающей поверхности до точки пересечения отраженного луча с оптической осью

$$S'_1 = \frac{y_1}{\operatorname{tg} U'_1} + x_1 \approx -154,6 \text{ мм},$$

или расстояние S_2 между точкой пересечения и вершиной отражающей поверхности малого зеркала будет

$$S_2 = S'_1 - d = -4,6 \text{ мм}.$$

Уравнение луча, падающего на зеркальную поверхность малого параболического зеркала, может быть представлено следующим образом:

$$y = (S_2 - x_2) \operatorname{tg} U'_1 = (4,6 + x_2) \operatorname{tg} 18^\circ 22'. \quad (383)$$

Для определения абсциссы x_2 точки падения луча на поверхность малого зеркала решаем систему уравнений

$$\begin{aligned} y_2^2 &= -18,6x_2, \\ y_2 &= (4,6 + x_2) \operatorname{tg} 18^\circ 22' = h_2 = 1,5 \text{ мм}, \\ x_2 &\approx 0,12 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (384)$$

Затем определяем угол i'_2 падения этого луча на зеркальную поверхность малого зеркала

$$i'_2 = U'_1 - \arctg \frac{y_2}{r_2} \approx 9^\circ 10' 58'',$$

а угол отраженного луча с оптической осью системы будет

$$U'_2 = -i'_2 + \arctg \frac{y_2}{r_2} \approx -5''.$$

Значение угла U'_2 для телескопической системы полностью характеризует сферическую aberrацию в угловой мере для действительного луча с $h_1 = 50$ мм, т. е.

$$\delta S'_{h_1} = U'_2 = -5''. \quad (385)$$

Определенное аналогичным образом значение сферической aberrации для действительного луча с $h_2 = 0,7 h_1$ равно

$$\delta S'_{h_2} \approx +4''. \quad (386)$$

Сравнение полученных значений сферических aberrаций при использовании параболических зеркальных поверхностей в телескопической системе Мерсенна со значениями aberrаций для случая использования сферических поверхностей [см. формулу (379)] указывает на практически идеальную aberrационную коррекцию при замене сферических зеркальных поверхностей параболическими.

Возможно корректирование сферической aberrации путем асферизации основного зеркала. Условие исправления сферической aberrации характеризуется нулевым значением первой суммы Зейделя. Например, асферическое основное зеркало при коэффициенте деформации $b = -0,970$, уравнение меридиональной кривой поверхности которого

$$x_1 = \frac{y_1^2}{2r_1} + (1 + b_1) \frac{y_1^4}{8r_1^3} \approx -0,001617y_1^2 + 1,2676 \cdot 10^{-10}y_1^4, \quad (387)$$

обеспечивает вполне допустимые значения остаточных сферических aberrаций.

Также возможна коррекция сферической aberrации путем асферизации поверхностей основного и малого зеркал. Значения коэффициентов деформации b_1 и b_2 определяем из условия равенства нулю первой и второй сумм Зейделя. Например, асферические основное и малое зеркала телескопической системы Мерсенна, коэффициенты деформации $b_1 = -1,01$ и $b_2 = -1,34$, обеспечивают вполне допустимые значения остаточных сферических aberrаций.

Методы изготовления асферических поверхностей основан, как правило, на изменении исходной сферической формы поверхности путем съема и нанесения необходимого слоя материала в той или иной зоне исходной поверхности.

Для нормального функционирования светодальномера-рефрактометра при измерении максимального расстояния ($S_{\max} = 50$ км) необходим достаточный для реализации заданной точности индикации определенной разности фаз уровень динамического диапазона принимаемого светового потока

$$\Phi_{\text{э.п.и}} \geq \frac{\Phi_{\text{элпор}}}{K_k}, \quad (388)$$

где $\Phi_{\text{элпор}}$ — монохроматическая пороговая чувствительность приемников излучения (ФЭУ-46 и ФЭУ-38); $K_k = 0,00266$ — необходимое значение контрастной чувствительности приемников излучения, определяемое по формуле (371).

Поскольку, как показало проектирование высокоточного светодальномера типа СБ-6, условие (388) можно обеспечить при измерении расстояния $S_{\max} = 50$ км, когда источником излучения является гелий-неоновый лазер ЛГ-56, кроме того, значения коэффициентов — контрастной чувствительности прием-

ников излучения, эффективности передающей и приемной оптических систем и отражателя — не зависят от длины волны излучения, то можно определить минимальное достаточное значение потока $\Phi_{\text{э.ист}_1}$, излучаемого гелий-кадмиевым лазером ЛГ-63,

$$\Phi_{\text{э.ист}_1} = \Phi_{\text{э.ист}_2} \left(\frac{\theta_{\text{ист}_1}}{\theta_{\text{ист}_2}} \right)^2 \frac{\Phi_{\text{эл}_1 \text{пор}}}{\Phi_{\text{эл}_2 \text{пор}}} \left(\frac{\tau_{\text{эл}_2}}{\tau_{\text{эл}_1}} \right)^{2S}. \quad (389)$$

Учитывая, что

$$\Phi_{\text{эл}_1 \text{пор}} = 8 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}, \quad \Phi_{\text{эл}_2 \text{пор}} = 2 \cdot 10^{-14} \text{ Вт},$$

$$\theta_{\text{ист}_2} = 13', \quad \theta_{\text{ист}_1} = 2' \text{ и } S = 50 \text{ км},$$

получаем

$$\Phi_{\text{э.ист}_1} = 0,00094 \left(\frac{\tau_{\text{эл}_2}}{\tau_{\text{эл}_1}} \right)^{100} \Phi_{\text{э.ист}_2}. \quad (390)$$

При проектировании геодезического высокоточного светодальномера типа СБ-6, в котором источником излучения является также гелий-неоновый лазер ЛГ-56, было показано, что измерение расстояний от 20 до 50 км возможно лишь ночью в условиях хорошей и отличной визуальной видимости, которые характеризуются для $\lambda_2 = 0,6328$ мкм коэффициентом пропускания атмосферы $\tau_{\text{эл}_2} \geq 0,93$ (влиянием потока от фона при использовании для осуществления спектральной селекции отраженного потока узкополосных интерференционных светофильтров можно пренебречь).

Коэффициент прозрачности атмосферы для $\lambda_1 = 0,4416$ мкм и условий конкретной визуальной видимости можно определить по известной формуле Рокара [89]

$$(1 - \tau_{\text{эл}_1}) = (1 - \tau_{\text{эл}_0}) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)^{2,5}, \quad (391)$$

или для условий хорошей визуальной видимости, когда при

$$\lambda_0 = 0,556 \text{ мкм}, \quad \tau_{\text{эл}_0} = 0,92:$$

$$\tau_{\text{эл}_1} = 1 + (\tau_{\text{эл}_0} - 1) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)^{2,5} = 1 + (0,92 - 1) \left(\frac{0,556}{0,4416} \right)^{2,5} \approx 0,86. \quad (392)$$

Подставив значения коэффициентов прозрачности атмосферы, соответствующих условиям хорошей визуальной видимости, в формулу (390), определим значение потока, излучаемого на $\lambda_1 = 0,4416$ мкм, необходимого для нормального функционирования светодальномера-рефрактометра:

$$\Phi_{\text{э.ист}_1} = 0,00094 \left(\frac{\tau_{\text{эл}_2}}{\tau_{\text{эл}_1}} \right)^{100} \Phi_{\text{э.ист}_2} = 0,00094 \left(\frac{0,93}{0,86} \right)^{100} \cdot 2 \approx 3,8 \text{ мВт}, \quad (393)$$

где $\Phi_{\text{э.ист}_2} = 2 \text{ мВт}$ — поток, излучаемый лазером ЛГ-56. Сле-

довательно, излучаемый гелий-кадмиевым лазером ЛГ-63 поток ($\Phi_{\text{э.ист.1}} = 8$ мВт) достаточен для обеспечения условий, необходимых для нормального функционирования прибора.

Конечно, рассмотренный пример проектирования светодальномера-рефрактометра не дает исчерпывающих ответов на все вопросы, связанные с решением такой сложной научно-технической проблемы. Например, требует глубокой проработки с постановкой специальных исследований вопрос исключения влияния колебаний геодезических сигналов, на которые необходимо устанавливать светодальномер-рефрактометр и отражатель при измерении расстояний от 20 до 50 км, на процесс измерения. Одним из возможных путей решения этой задачи приборным путем при работе рефрактометра является разделение принимаемых потоков излучения при помощи дихроичных зеркал (см. рис. 31) до оптической линии задержки и использование для каждого из них отдельной оптической линии задержки, изменение длин которых осуществляется синхронно и автоматически.

В примере по ряду соображений, которые уже упоминались, не рассматривалась схема, когда рефрактометр совмещен с пассивным отражателем светодальномера. Не рассматривалась схема светодальномера-рефрактометра с активным отражателем, так как оптимальная реализация этой схемы связана с использованием трансформирования частот способом гетеродинирования, что практически исключает использование оптической линии задержки или плавного изменения частоты модуляции в некотором диапазоне. Также не приводилась схема лазерного рефрактометра с частотной модуляцией несущей и оптическим гетеродинированием, осуществление которой сопряжено с существенными техническими трудностями.

1. *Адрианова И. И., Вафиади В. Г., Попов Ю. В.* Фазовая светодальномерия и модуляция оптического излучения.— *Оптико-механическая промышленность*, 1970, № 4, с. 49—61.
2. *Алексеев А. М.* Определение параметров светофильтров для приемных устройств с фотоэлементами с внешним фотоэффектом.— *Оптико-механическая промышленность*, 1962, № 6, с. 38—39.
3. *Байбородин Ю. В.* Введение в лазерную технику. Киев, Техника, 1977.
4. *Байбородин Ю. В., Гаража С. А.* Электрооптический эффект в кристаллах и его применение в приборостроении. М., Машиностроение, 1967.
5. *Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П.* Теория оптических систем. М., Машиностроение, 1973.
6. *Берг А., Дин П.* Светодиоды. М., Мир, 1973.
7. *Бергер Д.* Применение лазерной техники в геодезии и геофизике. М., Недра, 1977.
8. *Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель А. Н.* Вакуумные фотоэлектронные приборы. М., Энергия, 1976.
9. *Богданович О. В., Дарзбек С. А., Елисеев П. Г.* Полупроводниковые лазеры. М., Наука, 1976.
10. *Большаков В. Д., Михеечев В. С.* Результаты проложения полигонометрических ходов при помощи светодальномера ДС-2.— *Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка*, 1961, вып. 4, с. 28—39.
11. *Большаков В. Д., Михеечев В. С., Демушкин А. И.* Результаты испытаний топографического светодальномера СТ-61.— *«Геодезия и картография»*, 1962, № 5, с. 17—21.
12. *Большаков В. Д., Демушкин А. И., Михеечев В. С.* Производственные испытания светодальномера СТ-61 в 1962 г.— *Геодезия и картография*, 1964, № 3, с. 17—23.
13. *Большаков В. Д., Демушкин А. И., Михеечев В. С.* Разработка и внедрение в производство высокоточного светодальномера СТ-62. Удостоверение о регистрации № 48809 с приоритетом от 13 VIII 1964.
14. *Большаков В. Д., Демушкин А. И., Ключин Е. Б. А. с. 172508 [СССР].* Электрооптический способ определения расстояний. Кл. 42С, 18, (01С).— Заявл. 10.03.64; в Б. И. 1966, № 3. Оpubл. 4.03.66.
15. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М., Наука, 1970.
16. *Бородулин Г. И.* Обзор современной светодальномерной аппаратуры.— *Геодезия и картография*, 1970, № 7, с. 16—28.
17. *Бункин Ф. В., Гочелашвили К. С.* Размытие светового пучка в турбулентной среде.— М., АН СССР. Физ. ин-т им. П. Н. Лебедева. Лаборатория колебаний, 1969.
18. *Васильев В. П.* К вопросу о сравнительной оценке светодальномерной и радиодальномерной аппаратуры.— *Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка*, 1959, вып. 1, с. 85—90.
19. *Вафиади В. Г., Ханов Б. Ю.* О методике расчета активных фотоэлектрических систем.— *Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка*, 1966, вып. 5, с. 105—112.
20. *Вафиади В. Г., Попов Ю. В.* Скорость света и ее значение в науке и технике. Минск, Высшая школа, 1970.
21. *Величко В. А., Васильев В. П., Голосов В. В.* Измерение расстояния светодальномером и определение скорости распространения света.— *Геодезия и картография*, 1956, № 1, с. 10—24.
22. *Верещака А. И., Попов Ю. В., Смирнов В. П.* Фазовый светодальномер

- с ОКГ на CO_2 .— Оптико-механическая промышленность, 1973, № 1, с. 63—64.
23. Власов В. Г., Лазнева Э. В. Метод гетеродинного приема излучения, амплитудно-модулированного в диапазоне 5—50 МГц, с помощью фотодиода. — Оптико-механическая промышленность, 1968, № 10, с. 5—8.
 24. Власов В. Г., Попов Ю. В., Утенков Б. М. Оптимизация работы ФЭУ в режиме гетеродинного детектирования с внешним электродом. — Оптико-механическая промышленность, 1969, № 9, с. 59—60.
 25. Волосов Д. С., Цивкин М. В. Теория и расчет светотехнических систем. М., Искусство, 1960.
 26. Волохатюк В. А., Кочетков В. М., Красовский Р. Р. Вопросы оптической локации. М., Советское радио, 1971.
 27. Вугман С. И., Яко И. О., Ивенин Н. А. Галогенные лампы накаливания. — Светотехника, 1970, № 1, с. 25—27.
 28. Гаврилов В. А. Видимость в атмосфере. М., Гидрометеорологическое изд-во, 1966.
 29. Генике А. А., Ларин Б. А., Назаров В. М. Геодезические фазовые дальнометры. М., Недра, 1974.
 30. Глотов В. Г., Киеня И. М., Михеечев В. С. Электрооптический дистанционный преобразователь для измерения и осциллографирования напряжений на элементах, находящихся под большим потенциалом. — Измерительная техника, 1971, № 8, с. 67—70.
 31. Голубев А. Н. О лазерном дальнометре с фазовой модуляцией излучения. — Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1976, вып. 1, с. 115—119.
 32. Голубев А. Н. Отношение сигнал—фон и спектральная селекция сигнала в лазерных светодальнометрах. — Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1967, вып. 6, с. 51—59.
 33. Гуди Р. М. Атмосферная радиация. М., Мир, 1966.
 34. Де Мариа. Получение пикосекундных импульсов при помощи лазера с синхронизацией мод. — Электроника (рус. перевод). Т. 41, 1968, № 19, с. 21—33.
 35. Дерягин В. Н., Марасин Л. Е. Исследование распределения моментов начала генерации импульсов по активной поверхности неохлаждаемых полупроводниковых излучателей на основе GaAs. — Оптико-механическая промышленность, 1971, № 5, с. 12—14.
 36. Дерягин В. Н., Марасин Л. Е., Попов Ю. В. Малогабаритный импульсно-фазовый светодальнометр ГДФИ-3 с цифровым выходом на основе полупроводникового квантового генератора. — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 3, с. 23—27.
 37. Елисеев С. В. Геодезические инструменты и приборы. М., Недра, 1973.
 38. Забелин А. А., Рябова Н. В. Получение интерференции с большой разностью хода при использовании в качестве источника света газового ОКГ. — Оптико-механическая промышленность, 1968, № 4, с. 9—12.
 39. Зарагарьянц Н. Н., Попов Ю. В., Утенков Б. И. Амплитудно-частотные характеристики полупроводниковых источников излучения. — Оптико-механическая промышленность, 1970, № 2, с. 10—13.
 40. Земсков Г. Г., Савельев В. А. Средства измерения линейных размеров с использованием ОКГ. М., Машиностроение, 1977.
 41. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М., Советское радио, 1970.
 42. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М., Советское радио, 1977.
 43. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. М., Недра, 1966.
 44. Инструкция по полигонометрии и трилатерации и краткое методическое указание по крупномасштабной инженерно-геологической съемке для гидроэнергетического строительства И-37-66. М.—Л., Энергия, 1966.

45. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1 : 5000, 1 : 2000, 1 : 1000, 1 : 500. М., Недра, 1973.
46. Инструкция по топографо-геодезическим работам при инженерных изысканиях промышленного, сельского, городского и поселкового строительства СН 212—73. М., Стройиздат, 1974.
47. Иордан В., Эггерт О., Кнейссл М. Руководство по геодезии. Т. 6. М., Недра, 1971.
48. Ищенко Е. Ф., Климков Ю. М. Оптические квантовые генераторы. М., Советское радио, 1968.
49. Карякин Н. Л. Световые приборы прожекторного и проекторного типов. М., Высшая школа, 1966.
50. Климков Ю. М. Основные параметры оптических квантовых генераторов с точки зрения их использования при измерении расстояния.—Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, вып. 3, с. 33—40.
51. Ковалев В. П. Измерение разности фаз.—Приборы и техника эксперимента. 1958, № 2, с. 3—12.
52. Коломийцев Ю. В. Интерферометры. Л., Машиностроение, 1976.
53. Кондрашков А. В. О величине скорости распространения света и ее значение в геодезии.—Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1974, № 3, с. 27—34.
54. Кондрашков А. В. Электрооптические и радиогеодезические измерения. М., Недра, 1972.
55. Лазанов П. Е., Назаров В. М., Беляев О. И. Высокоточный светодальномер «Кварц».—Геодезия и картография, 1967, № 11, с. 76—78.
56. Лазарев Л. П. Инфракрасные и световые приборы самонаведения и наведения летательных аппаратов. М., Машиностроение, 1976.
57. Ларин Б. А. Элементы общей теории геодезических фазовых светодальномеров.—Труды ЦНИИГАиК, 1963, вып. 154, с. 3—34.
58. Лебедев А. А., Балаков В. В., Вафиади В. Г. Световой дальномер для геодезических измерений. Доклады АН СССР, т. 106, 1956, № 13, с. 458—461.
59. Максutow Д. Д. Астрономическая оптика. Гостехтеориздат, 1946.
60. Мандельштам Л. И., Папалекси Н. Д. Способ определения расстояния между пунктами при помощи электромагнитных волн. А. с. № 27638 [СССР], 1930.
61. Маршак И. С. Импульсные источники света. М., Энергоиздат, 1963.
62. Масленников А. С., Рогозин Н. И., Савельев А. В. Новые зарубежные свето- и радиодальномеры.—Геодезия и картография, 1977, № 12, с. 62—66.
63. Михеечев В. С. Модуляторы светового потока для современных светодальномерных дальномеров.—Труды Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, 1957, вып. 24, с. 69—32.
64. Михеечев В. С. Измерение коротких расстояний светодальномером СВВ-1.—Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1959, вып. 4, с. 53—57.
65. Михеечев В. С. О повышении точности измерения коротких расстояний малым светодальномером ДСТ-2.—Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1960, вып. 4, с. 107—115.
66. Михеечев В. С. О систематической фазовой ошибке светодальномера ДС-2.—Труды Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, 1962, вып. 50, с. 39—46.
67. Михеечев В. С. Определение основных параметров генератора фазового светодальномера с плавным изменением частоты модуляции.—Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1963, вып. 5, с. 125—129.
68. Михеечев В. С. Повышение точности малых светодальномеров.—Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1965, вып. 5, с. 111—119.
69. Михеечев В. С. Схема фазового гетеродинного светодальномера.—Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1971, вып. 2, с. 107—113.
70. Михеечев В. С. К вопросу расчета на точность при проектировании фазового светодальномера.—Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1971, вып. 6, с. 111—115.

71. Михеечев В. С. Практикум по курсу «Геодезические приборы». М., Недра, 1974.
72. Михеечев В. С. О влиянии некоторых параметров модулятора геодезического светодальномера.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1975, вып. 2, с. 143—150.
73. Михеечев В. С. Энергетический расчет при проектировании геодезического светодальномера. Материалы семинара: Применение оптико-электронных приборов в контрольно-измерительной технике. М., Моск. Дом научно-технич. пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского. 1976, с. 69—71.
74. Мовсесян Р. А., Мартиросян А. А., Амбарцумян Ф. Б. Высокоточный светодальномер ВСД-600.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1973, вып. 5, с. 131—137.
75. Модуляция излучения гелий-неонового лазера с помощью кристаллов ниобата лития / Дианова В. А., Мовсесян Р. А., Парыгин В. Н. и др. Геодезия и картография, 1972, № 1, с. 32—36.
76. Назаров В. М. Оптические квантовые генераторы и перспектива применения их в светодальномерах.— Геодезия и картография, 1967, № 8, с. 10—21.
77. Неверов Л. А. Новый фазовый инфракрасный дальномер КДГ-3 («Квант»).— Геодезия и картография, 1969, № 9, с. 28—32.
78. Носков Ф. П. Нулевой метод измерения расстояний светодальномером СВВ-1.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1968, вып. 3, с. 55—63.
79. Основы спутниковой геодезии. М., Недра, 1974.
80. Павлов А. В., Черников А. И. Приемники излучения автоматических оптико-электронных приборов. М., Энергия, 1972.
81. Панаян В. А., Мовсесян Р. А. Экспериментальные исследования дифракционного СВЧ модулятора света для электрооптического дальномера.— Геодезия и картография, 1975, № 8, с. 35—38.
82. Пик Л. И. Исследование действия призменного отражателя.— Геодезия и картография, 1965, № 10, с. 29—34.
83. Поляризационный модулятор света / Адрианова И. И., Попов Ю. В., Соколова Р. С. и др.— Оптико-механическая промышленность, 1968, № 10, с. 40—42.
84. Попов Ю. В., Адрианова И. И. Модуляторы света для фазовых светодальномеров.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1959, вып. 1, с. 49—75.
85. Попов Ю. В. Геодезические световые дальномеры Государственного оптического института с интерференционным и дифракционным модуляторами света.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1957, вып. 2, с. 55—72.
86. Попов Ю. В., Утенков Б. И. Методы управления режимом работы фотоэлектронных умножителей.— Оптико-механическая промышленность, № 2, 1976, с. 65—71.
87. Прилепин М. Т., Голубев А. Н., Коношенко Л. М. Рефрактометр для определения среднего показателя преломления воздуха при светодальномерных измерениях.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1968, вып. 2, с. 62—67.
88. Прилепин М. Т., Голубев А. Н. О построении лазерного дальномера с частотной модуляцией, несущей и оптическим гетеродинамированием.— Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1972, вып. 5, с. 123—127.
89. Прилепин М. Т., Голубев А. Н. Оптические квантовые генераторы в геодезических измерениях. М., Недра, 1972. 168 с.
90. Прилепин М. Т. Определение показателя преломления воздуха при измерении расстояний светодальномерами.— Геодезия и картография, 1957, № 3, с. 20—30.
91. Применение лазеров. М., Мир, 1974.
92. Принцип построения фазовых светолокационных дальномеров со сверхвысокочастотной модуляцией излучения / Адрианова И. И., Вафияди В. Г., Волконский В. В. и др.— Оптико-механическая промышленность, 1968, № 12, с. 55—62.

93. Проворов К. Л., Носков Ф. П. Радиогодезия. М., Недра, 1973.
94. Ратынский М. В. К вопросу определения показателя преломления воздуха при измерении расстояний электрооптическими светодальномерами. — Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1962, вып. 2, с. 77—91.
95. Ратынский М. В. К теории электрооптических дальномеров с визуальной регистрацией светового потока. — Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1965, вып. 2, с. 89—97.
96. Ребрин Ю. К. Управление оптическим лучом в пространстве. М., Советское радио, 1977.
97. Ритынь Н. Э. Оптические свойства угольных отражателей. — Оптико-механическая промышленность, 1957, № 4, с. 1—5.
98. Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий. Физматгиз, 1958.
99. Росс М. Лазерные приемники. М., Мир, 1969.
100. Рохлин Г. Н. Газоразрядные источники света. М., Энергия, 1966.
101. Русев Б., Димитров Д. Върху развитието и усъвършенствуването на геодезическите светдалекомери. — Геод., картограф., земустр., 1976, № 5, с. 17—21 (болг.).
102. Сборник статей, посвященный 80-летию со дня рождения академика А. А. Лебедева. Л., Машиностроение, 1973.
103. Смирнов В. А. Введение в оптическую радиоэлектронику. М., Советское радио, 1973.
104. Современные зарубежные светодальномеры: Обзор № 27/ОНТИ ЦНИИГАиК. М., 1976.
105. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. М., Высшая школа, 1974.
106. Судаков С. Г. Дальнейшее развитие схемы и программы построения государственной геодезической сети СССР. — Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1960, вып. 1, с. 17—19.
107. Тагер П. Г. Ячейка Керра. М., Искусство, 1937.
108. Тагерчи В. М. Анализ работы импульсно-фазового светодальномера. — Изв. вузов, Приборостроение, 1975, № 3, с. 98—102.
109. Тудоровский А. Н. Теория оптических приборов. Ч. II. М.—Л., изд-во АН СССР, 1952.
110. Фазовые способы измерения расстояний в геодезии / Величко В. А., Генике А. А., Лобачев В. М. и др. М., Воениздат, 1963.
111. Фельдман Г. А. Расчет и выбор оптических элементов геодезических светодальномеров (оптимизация параметров). М., Недра, 1973.
112. Фельдман Г. А. Современное состояние светодальномерной техники: Обзор № 12/ОНТИ ЦНИИГАиК. М., 1971.
113. Фрум К., Эссен Л. Скорость света и радиоволн. М., Мир, 1973.
114. Фурман Ш. А. Современные диэлектрические узкополосные пропускающие интерференционные фильтры. — Оптико-механическая промышленность, 1968, № 9, с. 50—62.
115. Ханов Б. Ю. О влиянии атмосферного рассеяния на точность светолокационных дальномеров. Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1969, вып. 3, с. 80—86.
116. Хомаза В. Ф., Васильев В. П. А. с. № 233611 [СССР]. Светодальномер со следящей системой и интегрирующим частотомером. Оубл. 25.II.60 в Б. И. № 11.
117. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. М., Гидрометеиздат, 1969.
118. Цуккерман С. Т., Гриндин А. С. Управление машинами при помощи оптического луча. Л., Машиностроение, 1969.
119. Частотная зависимость задержки фазы излучения светодиодов в СВЧ-диапазоне / Ламанов А. Л., Попов Ю. В., Неверов Л. А. и др. Оптико-механическая промышленность, № 9, 1976, с. 17—19.
120. Шерклифф У. Поляризованный свет. М., Мир, 1965.
121. Шилов А. Ф. Фазовые характеристики ФЭУ-28, работающих в режиме

- гетеродинамирования. — Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка, 1969, № 2, с. 147—152.
122. Якушков Ю. Г. Основы теории и расчета оптико-электронных приборов. М., Советское радио, 1971.
 123. Bergstrand E. Measurement of Distance by High Frequency Light Signalling. Arkiv for Matematik, Astronomi och Fisik. V. 29A. N 3, Stockholm, 1943.
 124. Bradsell R. H., Georan-I. A compact two-colour EDM instrument—«Surv. Rev.», 1976, 23, N 179, 214—233.
 125. Froome K. G., Brodsell R. H. Distance measurement by means of a Light ray modulated at a microwave frequency. Journal of Scientific Instrument, vol. 38, December, 1961.
 126. Froome K. D., Russell G. The NPL Geoponder: an experimental optical transponder for electromagnetic distance measurement.—«Surv. Rev.», 1977, 24, No 184, 51—65.
 127. Hauf Miroslav. Současný stav a Tendence vývoje svetelných dálkoměru.—«Geod. a kartogr. obz.», 1977, 23, No 4, 87—92.
 128. Helmut Leitz. Two electronic tacheometers by Zeiss.—«Surv. Revi.» 1970, April, vol. XX, N 156.
 129. Hernandez E. Norman. Analysis of four optical distance measuring configurations using electrooptical polarisation modulators.—«Appl. Opt.», 1972, 11, No 3, 609—619.
 130. Hyde D. L., Vaughan P. A. Lazer altimeter. Marconi Instrum., 1969, vol. 2, No 3.
 131. Kovalevsky J. Results of the «ISAGEX» Campaign. «Space Rez. 15 Phoc. Open Meet Work. Groups Phys. Sci. 17th Plen. Meet. COSPAR, San Paulo, 1947». Berlin, 1975, 3—15.
 132. Laser ranging system with 1 cm resolution/Colden K. E., Kind D. E., Leonard S. L., Ward R. C.—«Appl. Opt.», 1973, July, vol. 12, No 12, 1447—1453.
 133. Miller B. Laser altimeter may aid photo mapping.—Aviat. Week and Space Technol., 1965, No 13, 82.
 134. Micheev V. S. Indication der Phasendifferenz mit Visuellen Lichtenfernungsmessern.—Internat. Conf. Geod. Meassur. Techn. and Instrum. Probl., Budapest, 1966.
 135. Niblack W., Wolf E. Polarization Modulation and Demodulation of Light.—«Appl. Opt.», 1964, vol. 3, No 2.
 136. Romaniello Charles G. EDM 1976. «Surv. and Mapp.», 1977, vol. 37, No 1, 25—30.
 137. Satellite laser ranging work at Godward Space Flight Center/Mc. Gunnigal Thomas E., Carrion Walter J., Caudill Louis Q., Grand Charles R., Johnson Thomas S., Premo Dona A., Spadin Raul L., Winston George C.—«Wescan Profess. Program.», San Francisco, 1975, vol. 19.
 138. Siry J. W., Wonbun F. O. Future applications of laser ranging systems.—«Proc. Symp. Earth's Gravit. Field and Secul. Variat. Posit. Sydney. 1973». Sydney, 1974, 710—715.
 139. Speed of Light from direct frequency and wavelength measurements of the methane stabilized laser/Evenson K. M., Wells J. S., Petersen F. B., Danielson B. L., Day C. W., Barger B. L., Hall J. L.—«Phys. Rev. Lett.», 1972, vol. 29, No 19, 1346—1349.
 140. Wingate Sidney. Electronic range finder (Transitek Corp.) USA, 356—5, (G01 C3/08). No 3900261, заявл. 18.03.74, № 452049, опубли. 19.08.75.

- Аберрации объектива 131, 144
 — телескопической коллимирующей системы 204—207
- Активное вещество лазера 61
- Апертурный угол 130—131
- Атмосфера 74—82
- Базисная сторона 6
- Биполяронид 142
- Бугера закон 74
- Видимость визуальная 76
- Волна бегущая 102
 — световая 57—59
 — стоячая 102
 — ультразвуковая 102—104
 — электромагнитная 56—57
- Входной зрачок приемной оптической системы светодальномера
 — (выходной) зрачок отражателя 143—149
- Выходной зрачок передающей оптической системы светодальномера 128—133
- Гетеродинирование 23—24
- Глаз — приемник светового потока 66—67
- Глубина демодуляции 99
 — модуляции 94—95
- Голицина — Вина закон 59
- Дальность действия светодальномера 198
- Двойное лучепреломление 105
- Демодуляция 99
- Дистанция оформления пучка 132
- Дифракционная картина 103
 — решетка 102—104
- Дифракционный ультразвуковой модулятор 102—104
- Задержка временная 72
- Зейделя сумма 207
- Зрачок глаза 142—143
- Измерение времени 11
 — разности фаз 20—26
 — частоты 23, 37
- Излучение индуцированное 61
 — когерентное 61
 — некогерентное 59—60
 — спонтанное 59—60
- Индикатор определенной разности фаз 22
- Индикация определенной разности фаз балансным компенсационным способом 122—124
 — — — — — компенсационным способом экстремума 118, 121—122
 — — — — — способом максимума 119—120
 — — — — — способом минимума 119—120
 — — — — — парафазно-балансным способом 120—121
- Искажения нелинейные 96—98
- Классификация светодальномеров 11—33
- Керра конденсатор 105—108
 — постоянная 105
 — ячейка 105, 106
- Когерентность временная 57
 — пространственная 57
- Колебания монохроматические 56—57
- Кольрауша формула 81
- Конденсор апланатический менисковый 187—188
 — — шаровой 187—188
- Конфокальный параметр 164
- Коэффициент использования источника излучения 128
 — нелинейных искажений демодулятора 99
 — — — модулятора 97—98

— относительной дневной видимости глаза 59

— отражения поверхности 139

Коэффициент пропускания атмосферы 74—76

— демодулятора 99

— модулятора 93, 112

— оптической системы 150

— светофильтра 145

— телескопической коллимирующей системы 130

— эффективности отражателя 136, 139

— передающей оптической системы светодальномера 129—130

— приемной оптической системы светодальномера 145—146

Лазер газовый 61—64

— полупроводниковый 61—64

— твердотельный 61—64

Ламберта закон 138

Лампа газоразрядная 60

— накаливания 59—60

— электродосветная 61

Майкельсона интерферометр 13

Максутова зеркально-линзовый менисковый объектив 168

Манжена зеркало 135

Мерсенна телескопическая система 204

Модель атмосферы математическая 193

Модуляция амплитудная 94

— внешняя 94

— внутренняя 92

— гармоническая 92—99

— импульсная 191

— интенсивности 92

— по поляризации 114—116

— СВЧ 178—179

— фазовая 17

— частотная 16

Необыкновенный луч 105

Обыкновенный луч 105

Окна пропускания атмосферы 75

Определение показателя преломления атмосферы 80—84

Определение скорости распространения светового потока 80

— определение числа целых фазовых циклов 34—43

Оптическая калибровочная линия 25—26

Оптический путь 86

Освещенность, создаваемая передающей оптической системой 136

— отражателем 145

Относительное отверстие объектива 132

Отражатель активный 28—33

— зеркально-линзовый 135

— мозаичный 134

— пассивный 134

— призмный 135—136

Отражение диффузионно рассеивающее 138—139

Переключатель оптический 47

Планка постоянная 58

Пластика четвертьволновая 110, 142

Плоскость поляризации 106, 116

— фокальная 103, 105

Плотность спектральная 61

— тока 64

Поглощение светового потока в атмосфере 74—75

Погрешность изготовления отражателя 135—137

— индикации определенной разности фаз 120—125

— наведения 133—134, 192

— определения показателя преломления атмосферы 81—82

— определения числа целых фазовых циклов 36

— ориентирования 17

— отсчитывания 48

— рабочей меры 47

— учета метеорологических условий 48

Показатель преломления атмосферы групповой 81

— — — фазовый 80
 Поккельса кристаллический модулятор 108—113
 Поккельса электрооптический эффект 108—109
 Полигонометрия 6—7
 Полоса пропускания спектральная 149
 Поляризация линейная 56
 — круговая 106
 — плоская 105
 — эллиптическая 105
 Поляронд анализатор 109
 — поляризатор 109
 Поправка постоянная светодальномера 45—46
 Приемопередатчик 140—142

Разрешающая способность глаза 134
 Рассеяние светового потока в атмосфере 74—75
 Расходимость светового потока, излучаемого лазером 61
 — — — — светодальномером 131—133
 — — — — светодиодом 187
 — — — — отраженного отражателем 137—138
 Резонатор объемный 110—111
 — оптический 164—165
 Рефрактометр 83
 Рефракция атмосферная 79
 Рокара формула 208

Светодальномер высокоточный типа СБ-6 8, 159—171
 — — — СМ-02 8—9, 172—184
 — импульсный 9—10, 17—20, 191—198
 — интерференционный 13—15
 — комбинированный 26—27
 — основанный на реализации принципа обратной связи 27—28
 — рефрактометр 83—91, 199—209
 — технический типа СМ-5 8—9
 — точный типа СМ-2 8—9, 184—191
 — фазовый 20—26

Свет естественный 115
 — монохроматический 56—57
 — поляризованный 105, 115
 Свет рассеянный 77
 Светодиод 64—66
 Селекция временная 197
 — пространственная 147—148
 — спектральная 148—149
 Сирса и Баррелла коэффициенты 80
 Скорость света в вакууме 80
 — — групповая 81
 — — фазовая 80
 Смеситель 23—24
 Способы измерения разности фаз 20—23
 — индикации определенной разности фаз 120—125
 — определения числа целых фазовых циклов 34—43
 Среда анизотропная 105
 — изотропная 105
Стабильность постоянной поправки светодальномера 45—47
 — частоты 39
 Станция «ведомая» 29—31
 — «ведущая» 29—30
 Старт-импульс 18—19
 Стоп-импульс 18—19
 Схема оптическая мозаичного зеркально-линзового отражателя 134—135
 — — передающей системы светодальномера 126—133
 — — приемопередатчика автоколлимационная 141
 — — — биаксальная 140
 — — — коаксальная 140—142

Тахеометр электронный 9
 Телескопическая коллимирующая система 129
 Теодолитный ход 7
 Температура тела накала 59
 Триангуляция 6—7
 Триггерная ячейка 18
 Трилатерация 7
 Трипельпризма 135—136
 Турбулентция атмосферы 77—79

Угол «охвата» 182, 187
Угловое поле 144
**Увеличение визуальной системы на-
ведения** 134, 180—181
— конденсора 128, 188
— телескопической коллимирую-
щей системы 133—134

Фазовая неоднородность 95—96
Фазовращатель 22—23
Фазовый детектор 24
— цикл 34
Фазонизмерительное устройство 20—
21
Фазорасщепитель 21
Фон 76—77
Фоновой поток 148—149
Фотодиод германиевый 73—74
— кремниевый 73—74, 176
Фотон 58
Фотоэлектронный умножитель 67—73
Фотоэмиссионный приемник 66
Франка — Риттера призма 179

Цуг волн 57

Частота биений 15
— модуляции основная 38
— вспомогательная 38
— несущая 56
— промежуточная 23—24

Число целых фазовых циклов 34

**Чувствительность приемника излуче-
ния интегральная** 67
— — — контрастная 67—69
— — — пороговая
— — — спектральная 67, 70

Ширина спектра колебаний 57
Шумы 67, 70

Эдлена формула 80
Электромагнитная волна 56—57
Электроннолучевая трубка 20
Энергия излучаемого импульса 194
— кванта света 58

Яркость излучения энергетическая
64
— источника излучения 61
— фона 76—77

Предисловие	3
Введение	6
 <i>Глава I. ВЫБОР ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКО-</i>	
ГО СВЕТОДАЛЬНОМЕРА	11
§ 1. Классификация современных светодальномеров . .	11
§ 2. Интерференционные светодальномеры	13
§ 3. Светодальномеры с модуляцией несущих монохрома- тических колебаний	15
§ 4. Импульсные светодальномеры	17
§ 5. Фазовые светодальномеры	20
§ 6. Комбинированные светодальномеры	26
§ 7. Светодальномеры, основанные на реализации прин- ципа обратной связи	27
§ 8. Светодальномеры с активным отражателем . . .	
 <i>Глава II. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТ НА ТОЧНОСТЬ ГЕОДЕ-</i>	
ЗИЧЕСКИХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ	34
§ 9. Геодезические фазовые светодальномеры с плавным изменением частоты модуляции	34
§ 10. Геодезические фазовые светодальномеры, работаю- щие на фиксированных частотах модуляции . .	38
§ 11. Расчет на точность фазовых геодезических свето- дальномеров	44
§ 12. Расчет на точность импульсных светодальномеров .	51
§ 13. Расчет на точность комбинированных светодально- меров	54

<i>Глава III.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА И СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА, ИЗЛУЧАЕМОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОМ	56
---	----

§ 14. Источники излучения, применяемые в геодезических светодальномерах	56
§ 15. Приемники излучения, применяемые в геодезических светодальномерах	66
§ 16. Атмосфера и ее влияние на светодальномерные измерения	74
§ 17. Определение скорости распространения светового потока при измерении расстояния геодезическим светодальномером	79
§ 18. Рефрактометры	83

<i>Глава IV.</i> МОДУЛЯЦИЯ И ДЕМОДУЛЯЦИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА В ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРАХ	92
--	----

§ 19. Теоретический анализ эффективности действия модуляторов и демодуляторов светового потока	92
§ 20. Модуляторы светового потока, применяемые в геодезических светодальномерах	102
§ 21. Модуляция светового потока по поляризации	114
§ 22. Индикация определенной разности фаз излучаемого и принимаемого модулированных световых потоков	119

<i>Глава V.</i> ВЫБОР И РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО СВЕТОДАЛЬНОМЕРА	126
---	-----

§ 23. Расчет и проектирование передающей оптической системы геодезического светодальномера	126
§ 24. Расчет и проектирование отражателя	134
§ 25. Расчет и проектирование приемной оптической системы светодальномера	140
§ 26. Энергетический расчет оптической схемы светодальномерного комплекта	150

<i>Глава VI.</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СВЕ-	
ТОДАЛЬНОМЕРОВ ОСНОВНЫХ ТИПОВ	159
§ 27. Светодальномер высокоточный типа СБ-6	159
§ 28. Светодальномер высокоточный типа СМ-02	172
§ 29. Светодальномер точный типа СМ-2	184
§ 30. Импульсный светодальномер для спутниковой гео-	
дезии	191
§ 31. Светодальномер-рефрактометр	199
Список литературы	210
Предметный указатель	215

ИБ № 3173

Владимир Степанович Михеечев

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ

Редактор издательства *З. Н. Чумаченко*
Переплет художника *А. Е. Чучканова*
Художественный редактор *Е. Л. Юрковская*
Технические редакторы *Л. Я. Голова, В. В. Соколова*
Корректор *М. П. Курылева*

Сдано в набор 03.05.79. Подписано в печать 16.11.79.
Т-20058. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага кн.-журн. Гарнитура литер.
Печать высокая. Печ. л. 14,0. Уч.-изд. л. 14,14. Тираж 3400 экз.
Заказ 357/7612-15. Цена 2 р. 30 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.