

Государственный комитет Российской Федерации
по высшему образованию

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П.Королева

В.И.Мордасов, В.Н.Гришанов

Проектирование лазерных систем
авиационного и космического назначения

(Часть I)

Учебное пособие

С а м а р а 1 9 9 5

УДК 621.378:681.5:528.5

Проектирование лазерных систем авиационного и космического назначения: Учеб. пособие в 2ч. Ч. I / В. И. Мордасов, В. Н. Гришанов; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1995. 121 с. ISBN 5-230-16981-8

Определены задачи и содержание дипломного и курсового проектирования лазерных систем авиационного и космического назначения. Рассмотрены классификация лазерных систем, приемы снижения флуктуаций пространственного положения диаграммы направленности потока излучения промышленных лазеров, центрирование пучка способом определения энергетического центра освещенности. Описаны технические характеристики средств теле- и тепловизионного типа для регистрации параметров лазерного излучения, отражательные характеристики целей и расчет интенсивности излучения при прохождении через искусственные и естественные среды. Описаны измерительные системы для производства аэрокосмических объектов на основе лазерных задатчиков опорных линий и плоскостей с автоматической стабилизацией их пространственных характеристик.

Предназначено для студентов факультета двигателей, выполняющих дипломный и курсовой проекты по специальности "Лазеры", инженеров машиностроительных предприятий, конструкторов авиационной и космической техники, слушателей ФПК. Подготовлено на кафедре АСЭУ.

Табл. 15. Ил. 30.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

Рецензенты: проф., д-р физ.-мат. наук А.Н.Бекренев,
проф., д-р физ.-мат. наук В.В.Котляр

ISBN 5-230-16981-8

© Мордасов В.И., Гришанов В.Н.
© Самарский государственный
аэрокосмический университет,
1995

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- x, y, z - декартовы координаты;
 ρ, θ, z - цилиндрические координаты;
 l, b, s - длина, ширина, толщина, м;
 f - фокусное расстояние объектива, м;
 r - радиус фокусируемого луча, м;
 Δ - погрешности линейных измерений, м;
 F - площадь, m^2 ;
 τ - время протекания процесса, с;
 v - линейная скорость перемещения, м/с;
 ω - угловая скорость, рад/с;
 T - температура нагрева образца, К;
 R - коэффициент отражения материала;
 A_s, ε - терморациационные характеристики покрытий
(A_s - коэффициент поглощения солнечного излучения,
 ε - степень черноты);
 W - мощность непрерывного источника, Вт;
 e - удельная плотность энергии, Дж/ m^2 ;
 q - удельная плотность мощности, Вт/ m^2 ;
 λ - длина волны излучения, м;
 K_c - статический коэффициент усиления;
 K_d - динамический коэффициент усиления;
 ν - частота следования импульсов, Гц.

СПИСОК АББРЕВИАТУР

- КА - космический аппарат;
ГФЧ - головка фоточувствительная;
ОДН - ось диаграммы направленности;
УУС - устройство углового сопровождения;
ЛГ - лазерный гироскоп;
КОКГ - кольцевой оптический квантовый генератор;

- ВХ - выходная характеристика;
- ФЭУ - фотоэлектронный умножитель;
- НЧ - непрерывная частота;
- ЛНЧ - линейная непрерывная часть;
- ВПП - взлетно-посадочная полоса;
- ПНВ - приборы ночного видения;
- ЭОП - электронно-оптические преобразователи;
- УЯВ - усилители яркости видимости.
- УОВ - устройство оптической визуализации.

ВВЕДЕНИЕ

Современные летательные аппараты авиационного и космического назначения оснащены сложными оптическими комплексами навигационного и исследовательского характера. Лазерные дальномеры, прицелы, системы наведения, гироскопы – вот далеко не полный перечень оборудования, основным узлом которого является источник когерентного излучения оптического диапазона. Не менее широкое применение лазерная техника находит и в наземных службах, обеспечивающих безопасность и всепогодность полетов: от простейших лазерных маяков и датчиков прозрачности атмосферы до лицаров оперативной информации о состоянии облачного покрова за десятки километров от аэродрома.

Без лазерных приборов не обходится сборка летательных аппаратов и их узлов. Лазерные визиры, нивелиры и теодолиты, визуализирующие базовые оси и плоскости в пространстве, повышают точность воспроизведения геометрических параметров крупногабаритных объектов, способствуют росту производительности труда монтажников и служб приемки.

Совершенствование элементной базы лазерных систем определяет тенденции расширения номенклатуры серийных и опытных образцов оптической контрольно-измерительной аппаратуры, сфер и способов ее применения. Само понятие лазерной системы подразумевает взаимодействующую совокупность различных элементов. Среди них можно выделить основные, которые присутствуют практически в каждой лазерной системе: передающие и приемные, сканирующие и развязывающие устройства, модуляторы и средства обработки информации.

Цель пособия – дать студентам дневного и вечернего отделений подготовку в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми к инженерам по специальности "Лазеры". Инженер должен иметь подготовку такого уровня, чтобы разрабатывать лазерные системы научного практического назначения с использованием современных достижений лазерной

техники. В данном курсе последовательно решаются следующие задачи: освоение принципов построения лазерных систем; изучение лазерных систем технологического, навигационного, локационного и других назначений; измерение параметров оптических сигналов; проектирование типовых лазерных систем.

В результате освоения курса специалист должен получить следующие знания: о назначении типовых лазерных систем в научно-практических целях; сведениях, необходимых для выбора передающих и приемных устройств, сканаторов, оптических узлов развязки лазерных сигналов; основах методов обработки оптической информации с использованием вычислительных средств; правилах проектирования лазерных систем опытного и серийного вариантов исполнения.

I. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

I.1. Классификация лазерных систем

Под лазерными системами подразумеваются технические системы, дополнительный механизм которых основан на применении лазерного излучения. Технологические системы можно классифицировать по нескольким основным признакам: назначению, энергетическому, виду применяемой амплитудно-частотной фазовой модуляции сигнала.

При классификации по назначению лазерные системы разделяются на технологические, навигационные, локационные, лидары, средства связи и системы в медицине. В табл. I.1 приведены основные лазерные системы и их разновидности, которые в дальнейшем будут рассматриваться более подробно в настоящем пособии.

Технологические лазерные системы широко используются для проведения сборочно-монтажных и строительных работ, а также при измерении крупногабаритных объектов. Здесь используются твердотельные и газовые лазеры, имеющие малую величину расходимости лазерного пучка. Преимущественно здесь используют излучение с длиной волны видимого диапазона, так как значительно упрощаются условия эксплуатации лазерных систем.

Навигационные лазерные системы обеспечивают безопасность полетов, связанную с увеличением точности систем посадки, снижение ограничений по метеусловиям, повышение комфортности работы экипажа в экстремальных условиях. К данным видам лазерных систем следует отнести: гироскопы, датчики горизонта, входные маяки взлетно-посадочных полос.

Лазерные системы

Лидары	Разведка георесурсов	Технологические лазерные системы	Опорно-автономные системы
	Экологический контроль		С комбинацией опорных плоскостей
	Климатический мониторинг		С опорной плоскостью
Локационные системы	Слежение за объектом	Лазерные системы в медицине	С опорной линией
	Получение изображения объектов		Диагностические системы
	Измерение координат целей		Терапевтические системы
Навигационные системы	Системы посадки	Средства лазерной связи	Хирургические системы
	Датчики горизонта		Цифровые средства связи
	Лазерные гироскопы		Аналоговые средства связи

Локационные лазерные системы применяют при обнаружении и определении местоположения различных объектов при помощи электромагнитных волн оптического диапазона, излучаемых лазерами. Поскольку лазерное излучение отличается от температурного узконаправленностью, монохроматичностью, имеющей большую мощность и высокую спектральную скорость, то все это делает оптическую локацию конкурентноспособной в сравнении с радиолокацией.

Лидары используются для климатического мониторинга, экологического контроля и разведки георесурсов. С целью повышения информативности лазерных методов на практике используются флуоресцентные вещества и излучатели с перестраиваемой длиной волны.

Лазерные средства связи в передающих устройствах включают: лазер, вырабатывающий высокочастотную несущую; модулятор, обеспечивающий наложение передаваемой информации на световую несущую; оптическую систему, необходимую для фокусирования излучения в узкий пучок, что обеспечивает большую дальность и высокую помехозащищенность. В то же время приемное устройство включает в себя входную оптическую систему, демодулятор и усилитель сигнала. Когерентность и монохроматичность лазерного излучения позволяет модулировать и детектировать луч таким образом, что используется вся ширина оптического диапазона. Оптический участок спектра гораздо шире и вместительней, чем радиоволновой.

Лазерные системы в медицине широко применяются для проведения хирургических операций, терапевтических процедур и оснащения диагностических центров. Их назначение заключается в точной дозировке энерговклада лазерного излучения в зоне воздействия, а также для транспортировки излучения в заданную область.

Классификация лазерных систем по энергетическому признаку применима ко всем видам систем. В настоящее время диапазон мощности используемых излучателей включает границы от единиц мВт (полупроводниковые лазеры) до единиц кВт (газовые быстропрокачные лазеры).

Классификация лазерных систем по виду применяемой амплитудно-частотной фазовой модуляции сигнала может быть использована к локационным навигационным, лидарным системам и средствам лазерной связи.

1.2. Генерация и детектирование лазерных сигналов

При решении задач метрологического характера, связанных с получением количественных результатов с помощью оптикоэлектронных приборов, для уменьшения погрешности измерений требуется исследование временных характеристик используемых приборов. Если при измерении используются лазеры, то они различаются по метрологическому рангу: рабочие и эталонные. Эталонные лазеры обладают высокой стабильностью выходных параметров и высокой надежностью, но в силу своей уникальности чрезвычайно дороги и дефицитны. Рабочие лазеры, напротив, просты и надежны в эксплуатации и получили широкое распространение, так как выпускаются серийно. В то же время требования к стабильности выходного параметра здесь сравнительно невысоки, кроме того, в силу особенностей изготовления они могут иметь значительные расхождения даже у лазеров одной модели. В силу этого при использовании лазеров рабочей группы для проведения измерений возникает необходимость точного знания нормируемых

параметров и их изменения с течением времени, чтобы иметь возможность вносить соответствующие поправки в результаты измерений.

В экспериментах чаще всего применяются газовые непрерывные лазеры, которые имеют метрологические преимущества перед другими типами благодаря малой угловой расходимости излучения, широкому диапазону генерируемых длин волн, легко реализуемому однододовому и частотному режиму генерации. Эти особенности позволяют нормировать следующие характеристики излучения: длину волны, среднюю мощность, спектральную плотность мощности, определенное положение пучка в пространстве. Излучение газовых лазеров эффективно поддается внешним преобразованиям с помощью управляющих и формирующих устройств.

Временная флуктуация измерялась у лазеров ЛП79-2, ЛП-126, ИЛПН-708, которые можно отнести к рабочей группе метрологических лазеров. (Лазер ИЛПН-708 можно применять в метрологических целях с ослабителем ввиду его значительной мощности излучения, $W \sim 30$ Вт).

Калибровка средств измерения. Для измерения энергетических параметров лазеров в настоящее время применяются фотоэлектрический, калориметрический и понцеромоторный методы, причем первые два получили наиболее широкое применение. Фотоэлектрические приемники характеризуются высокой чувствительностью, превосходящей чувствительность калориметрических приемников, линейностью световых характеристик для большей части приемников, малой инерционностью. Недостатками являются большая селективность и трудность калибровки для проведения абсолютных измерений.

В отличие от фотоэлектрических, тепловые приемники могут применяться практически в любой области спектра, для любых длин волн, однако в области спектра с длинами волн меньше $\lambda = 10^{-6}$ мкм чувствительность тепловых приемников меньше, чем фотоэлектрических. Чувствительность тепловых приемников не меняется по спектру, так как излучение любой длины волны может быть переведено в тепловую энергию с коэффициентом преобразования близким к 100%. Они также характеризуются высокой линейностью и возможностью проводить абсолютные измерения; так как возможна их абсолютная градуировка. Недостатками являются низкая чувствительность по сравнению с фотоэлектрическими приемниками и большая постоянная времени. Несмотря на большой рабочий спектральный диапазон, у некоторых калориметрических измерительных средств нормируют отдельные фиксированные рабочие длины волн. Особенно часто это длины волн $\lambda = (0,63; 1,06; 10,6) \cdot 10^{-6}$ м лазерного излучения. Не являются исключением и приборы для измерения мощности ОСИСМ-А и ИМО-2Н, также калиброванные на этих длинах волн. Измеритель мощности фотоэлект-

рического типа ОМЗ-65 откалиброван в диапазоне длин волн $\lambda = (0,8... \dots 1) \cdot 10^{-6}$ м. Наибольшую точность измерений обеспечивает ваттметр ОСИСМ-А, поэтому по нему были откалиброваны другие два измерителя.

Измеритель мощности ОСИСМ-А состоит из ослабителя, приемника излучения и цифрового вольтметра, имеет следующие характеристики:

спектральный диапазон $\lambda = 0,4...12$ мкм,

диапазон измерений мощности $W = 2...1000$ мВт (с основной погрешностью 2%),

диапазон измерений мощности $W = 1...100$ Вт (с основной погрешностью 2,5%),

погрешность ослабителя мощности 1,5%,

постоянная времени $\tau = 40$ с.

Ваттметр ИМО-2Н, предназначенный для измерения средней мощности лазерного излучения $W = 3 \cdot 10^{-4} \dots 100$ Вт в диапазоне длин волн $\lambda = 0,4...10,6$ мкм с пределом основной погрешности 5% при измерении мощности $W = 3 \cdot 10^{-4} \dots 1$ Вт был откалиброван следующим образом. По оси лазерного излучения последовательно устанавливались ослабитель и приемник мощности измерителя ОСИСМ-А. Произведенный замер мощности излучения при этом показал флуктуацию мощности, не превышающую ~3%. Затем та же мощность лазерного излучения, прошедшая через ослабитель ваттметра ОСИСМ-А, была измерена с помощью ИМО-2Н. Поскольку в обоих замерах был использован один и тот же ослабитель, то можно считать, что его погрешность не влияет на результаты измерений. Калибровка произведена на длинах волн $\lambda = 0,63; 1,15; 3,39$ и $10,6$ мкм, причем ослабитель был использован только на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм. Результаты измерений приведены в табл. 1.2. Из табл. 1.2 видно, что с увеличением длины волны излучения расхождение измерений растет, причем при $\lambda = 0,63$ мкм оно находится в пределах погрешностей измерения приборов. Конструкция измерителя мощности ИМО-2Н позволяет внести соответствующую поправку при проведении его внутренней калибровки.

Калибровка ваттметра ОМЗ-65 отличается от описанной выше и заключается в следующем: с помощью ОСИСМ-А производится замер мощности W_0 , затем устанавливается пластина 2, отводящая часть мощности W_2 на ОМЗ-65, при этом ОСИСМ-А замеряет мощность W_1 , прошедшую через пластину в прямом направлении. Таким образом, $W_2 = W_0 - W_1$ при условии, что потери на поглощение в пластине малы по сравнению с измеряемой мощностью. Ваттметр ОМЗ-65 имеет следующие паспортные характеристики:

длина волны калибровки $\lambda = 0,8...1,0$ мкм,

диапазон измеряемых мощностей $W = 10^{-10} \dots 10^{-2}$ Вт,

Т а б л и ц а 1.2

Результаты измерений мощности

Длина волны, мкм	Измеренная мощность, Вт, ОСИСМ-А	Измеренная мощность, Вт, ИМО-2Н	Расхождение $\Delta = \frac{W-W'}{W} \cdot 100\%$
0,63	$6,42 \cdot 10^{-3}$	$6,00 \cdot 10^{-3}$	6,5
1,15	$11,64 \cdot 10^{-3}$	$9,90 \cdot 10^{-3}$	14,9
3,39	$9,70 \cdot 10^{-3}$	$8,23 \cdot 10^{-3}$	15,2
10,6	32,56	26,40	18,9

предел допускаемого значения основной погрешности измерения мощности на длине волны калибровки в диапазоне $W = 10^{-9} \dots 10^{-3}$ Вт.

Как было указано ранее, прибор имеет внутреннюю калибровку в диапазоне $\lambda = 0,8 \dots 1,0$ мкм, по этой причине показания прибора вне этого диапазона не дают абсолютных значений и носят относительный характер, например, в случае замера флуктуации мощности или проведения относительных измерений. С учетом этого обстоятельства по величине мощности W_2 произведена калибровка одного прибора ОМЗ-65 для проведения абсолютных измерений на длине волны $\lambda = 1,15$ мкм, а другого на $\lambda = 0,63$ мкм.

Измерение флуктуаций мощности. Спектр флуктуаций мощности излучения непрерывных газовых лазеров довольно широк и перекрывает диапазон $F = 0 \dots 10^4$ Гц. Этот диапазон можно разбить условно на четыре поддиагона (табл. 1.3) в зависимости от причин, вызывающих флуктуации.

Т а б л и ц а 1.3

Диапазоны флуктуаций мощности

Частотный диапазон, Гц	Возмущающие факторы
0...0,5	Тепловые изменения геометрии резонатора, старение зеркал и активного элемента, загрязнение и запыление оптических поверхностей
0,5...50	Внешние вибро- и акустические воздействия (область резонансных частот механических конструкций лазеров)
50...10000	Технологические шумы, связанные с пульсациями источников питания
Свыше 10000	Разрядные шумы

Наибольшая относительная нестабильность имеет место в диапазоне 0...0,5 Гц. Это происходит, во-первых, из-за увеличения эффективного размера поля и роста дифракционных потерь вследствие угловой разъюстировки зеркал резонатора и, во-вторых, тепловые изменения базы резонатора могут стать причиной смещения частоты генерации относительно контура усиления активной среды. Это смещение, в свою очередь, приводит к изменению мощности генерации. Широко применяемые средства измерения мощности калориметрического типа позволяют измерять флуктуации мощности лишь первого частотного поддиапазона ввиду большой постоянной времени, например, измеритель мощности ОСИСМ-А имеет постоянную времени $\tau = 20$ с. С помощью этого прибора произведены замеры флуктуаций мощности лазеров ЛГ-126, ЛГ-79,2, ИЛГН-708. Измеритель мощности состоит из трех частей: ослабителя, приемника излучения и цифрового вольтметра. Так как излучение лазера ИЛГН-708 невидимое, установка ослабителя и приемника по оси лазерного излучения проводилась с помощью вспомогательного встроивочного лазера, излучение которого направлялось на переднее зеркало ИЛГН-708 нормально к его поверхности. Момент запуска лазера соответствовал началу отсчета времени $\tau = 0$, затем показания прибора снимались через $\Delta\tau = 300$ с. Аналогично произведены замеры флуктуаций мощности для лазеров ЛГ-79,2 и ЛГ-126. При этом применять встроивочный лазер нет необходимости. Кроме того, флуктуации мощности лазеров ЛГ-79,2 и ЛГ-126 на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм были замерены ваттметром ОМЗ-65, имеющим время установления показаний не более $\tau = 5$ с. Методика измерений отличается от описанной выше, а отличия заключаются в следующем; ввиду того, что верхний предел измерения ограничен величиной $W = 10$ мВт, с помощью плоскопараллельной пластины в фотоприемник отводилась часть лазерного излучения. Измеренные значения максимальной мощности лазеров являлись не ниже паспортных, составляющих $N = 10$; 10 и 5 мВт на длинах волн $\lambda = 0,63$; 1,15; 3,39 мкм соответственно. Значение максимальной мощности лазера ЛГ-79,2, измеренное ваттметром ОСИСМ-А, составило $N = 7,67$ мВт, что ниже паспортной величины $W = 10$ мВт. Временное изменение мощности излучения лазера ИЛГН-708 показывает, что в течение первых тридцати минут после его включения мощность плавно возрастает, затем стабилизируется, при этом флуктуации мощности не превышают 2,9% от среднего значения. Такое поведение можно объяснить протеканием плазмохимических реакций в газовой смеси, состав которой в первые $\tau = 30$ мин работы претерпевает изменения, затем стабилизируется. Поскольку лазер имеет водяное охлаждение, он имеет более стабильный тепловой режим, чем лазеры с конвективным охлаждением, и с точки зрения стабильности мощности водяное охлаждение предпочтительнее.

Мощность излучения лазера ЛГ-79,2 монотонно падает в первые $\tau = 1,8 \cdot 10^3$ с после включения, затем стабилизируется и после $\tau = 3 \dots 3,6 \cdot 10^5$ с работы вновь падает. Изменение мощности на различных длинах волн лазера ЛГ-126 имеют отличительный характер: при $\lambda = 0,63$ мкм флуктуация мощности происходит по синусоиде с периодом порядка $\tau = 2,4 \cdot 10^3$ с, на длине волны $\lambda = 1,15$ мкм мощность монотонно уменьшается, приближаясь к величине порядка 10 мВт, и на длине волны $\lambda = 3,39$ мкм флуктуации мощности минимальны. Флуктуация мощности по времени для длины волны излучения $\lambda = 0,63$ мкм получена с помощью ваттметров ОМЗ-65 и ОСИСМ-А. Характер изменения величины мощности для лазера ЛГ-126 позволяет сделать вывод, что закономерности флуктуаций мощности имеют постоянный характер, определяемый лишь особенностями конструкции лазера.

С помощью кремниевого фотодиода ФД-24К и осциллографа С1-55 была произведена оценка высокочастотных флуктуаций мощности лазера ЛГ-126 на длине волны 0,63 мкм. Средний уровень сигнала составил $V = 0,3$ В, максимальная амплитуда флуктуаций находилась в пределах $5 \cdot 10^{-3}$ мВ, что составляет менее 2% от среднего уровня сигнала. При этом наибольшие флуктуации мощности наблюдаются у лазера ЛГ-126, не имеющего каких-либо устройств стабилизации мощности. Лазер ЛГ-79,2, имеющий стабилизированный блок питания и ИЛГЛ-708, имеющий водяное охлаждение, имеют существенно меньшие флуктуации мощности. Для эффективного улучшения стабильности мощности следует оптимизировать конструкцию резонатора и термостабилизировать отдельные его узлы (для уменьшения полговременной нестабильности), обеспечить вибро- и акустозащиту, стабилизировать источники питания (для устранения технологических пульсаций), а также оптимизировать режим возбуждения, провести подбор или разработку высококачественных активных элементов (для подавления разрядных шумов). В случае невозможности выполнения указанных мер можно вносить поправку в результаты, проводя непрерывный контроль параметров лазера.

При регистрации распределения плотности мощности в пятне можно установить, что распределение мощности в пятне, как правило, отличается от гауссовского и зависит от многих факторов (от модового состава, температуры активной среды и др.). При решении задач, связанных с обработкой изображения объектов, освещенных лучом ОКГ, эта характеристика имеет решающее значение.

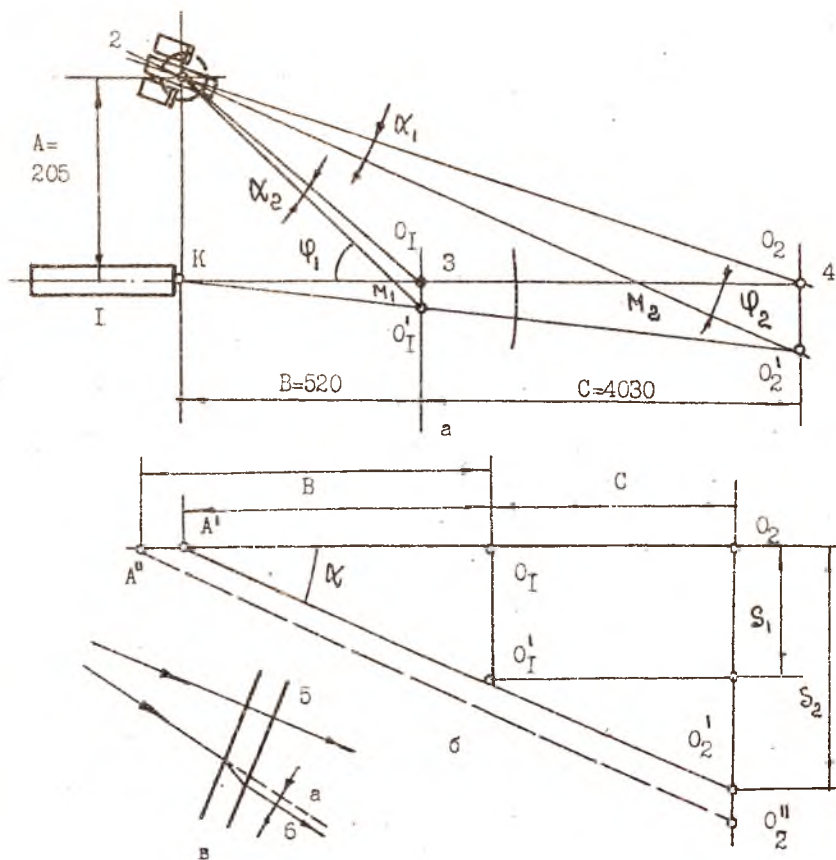
Легче всего регистрировать распределение плотности мощности в пучке лазера видимого диапазона, в данном случае при $\lambda = 0,63$ мкм, применив оптическую схему, состоящую из объектива от микроскопа с фокусным расстоянием 15 мм и диафрагмы диаметром 0,1 мм, установлен-

ной в фокусе объектива. Излучение лазера, в данном случае ЛП-79,2 одномодового, проходя через оптическую систему, падает на белый экран, имеющий координатные оси и отверстие для прохождения излучения в фотоприемник, установленный за экраном.

Замерив интенсивность излучения в точке с известными координатами и зная распределение плотности мощности по пятну, можно рассчитать интенсивность в любой точке пятна. Описанный способ позволяет осуществить фоторегистрацию на обычной фотопленке чувствительностью 64 ед. ГОСТ, и в этом случае распределение плотности мощности определяется степенью почернения фоточувствительного слоя. Фоторегистрация позволяет фиксировать изменения распределения с течением времени. Для лазеров ЛП-79,2, ЛП-126, ИЛПН-708 распределение плотности мощности не претерпевает видимых изменений. Для лазера ЛП-126 с использованием описанных выше объектива и диафрагмы (длина волны $\lambda = 0,63$ мкм). Регистрация распределения плотности мощности в излучении ИК-диапазона затрудняется тем, что излучение невидимо. Поэтому для этой цели используется визуализатор люминесцентный ВЛ-1, работающий в диапазоне плотностей мощности (0,01...0,03) - (0,1...0,3) и (5...7) - (480...500) Вт/см² при максимальной мощности не более 2 кВт. При работе визуализатора непрерывное УФ-излучение от лампы вызывает видимое свечение экрана. Поглощенное люминофором ИК-излучение преобразуется в тепловой рельеф на экране, и таким образом формируется псевдоновая картина распределения плотности мощности исследуемого ИК-излучения.

Значительная мощность излучения лазера ИЛПН-708 дает возможность наблюдать на экране визуализатора распределение плотности мощности в пучке, расширенном с помощью германиевой линзы с фокусным расстоянием 145 мм. Малый диапазон градаций яркости люминесцентных экранов не позволяет произвести численных замеров, как в случае видимого излучения, а также регистрировать распределение плотности мощности в пятне лазера ЛП-126 ввиду его малой мощности и малой чувствительности люминесцентных экранов.

Определение отклонения лазерного пучка от первоначальной оптической оси проводилась на испытательном стенде в соответствии со схемой эксперимента, приведенной на рис. 1.1. Пластины 3 и 4 установлены перпендикулярно начальной оси лазерного луча на различных расстояниях от лазера. С помощью теодолита 2 определяются координаты пятен лазерного луча на пластинах 3 и 4, соответствующие начальному положению луча в пространстве, затем проводятся аналогичные измерения через равные промежутки времени, причем исходному моменту времени



Р и с. 1.1. Оптическая схема (а), отклонение луча от первоначального положения (б) и его параллельный перенос (в): 1 - лазер, 2 - теодолит, 3, 4 - пластинки; 5 - прохождение луча без отклонения; 6 - прохождение луча с отклонением

соответствует начальному положению оси луча в пространстве. Отклоняясь с течением времени от своего начального положения, луч лазера начинает падать на пластину 3 под углом, отличным от 90° , в результате чего прошедший через пластину 3 луч получает некоторое параллельное смещение, зависящее от угла падения, и вносящее погрешность при измерении координат пятна на пластине 4 (рис. 1.1, в).

По этой причине при снятии координат пятна на пластине 4 пластина 3 отодвигается в сторону. Чтобы контролировать неизменное положение пластин 3 и 4 в пространстве, на пластины были нанесены три перекрестия, координаты которых периодически изменялись теодолитом (так как координаты трех точек плоскости определяют ее положение в пространстве, то их координаты можно использовать для машинной обработки результатов эксперимента). Кроме того, в силу особенностей распределения интенсивности в пятне, последнее не имеет четко выраженных краев, в результате чего в измерения вносится погрешность, связанная с неточностью наведения теодолита на центр пятна, в связи с этим каждое измерение снималось девять раз, при этом среднеквадратичное отношение результатов измерения не превышает инструментальную погрешность теодолита. Угловые координаты пятен снимались как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях. Усредненные результаты измерений приведены в табл. I.4.

Как отмечалось ранее, за начало отсчета принято положение оси лазерного луча в момент времени $T = 0$, и этому положению соответствуют нулевые значения вертикальных и горизонтальных углов пятен на пластинах, измеренные теодолитом. Чтобы определить новое положение оси лазерного луча, необходимо рассчитать линейные перемещения центров пятен на пластинах 3 и 4. Линейные перемещения можно выразить через измеренные угловые координаты пятен, и известные линейные размеры, используя методы аналитической геометрии (рис. I.1).

В данном случае в точке L находится теодолит, в точке K — центр переднего зеркала лазера, O_1O_1' — линейное перемещение пятна по первой пластине, O_2O_2' — линейное перемещение пятна по второй пластине, α_1 и α_2 — измеренные углы, KO_2 — начальная ось лазерного луча, KO_2' — отклоненная ось лазерного луча, KO — расстояние от переднего зеркала до первой пластины, O_1O_2 — расстояние между пластинами, KL — расстояние между теодолитом и лазером. В приведенной схеме сделано допущение, что точка разворота от лазерного луча находится на переднем зеркале лазера, хотя в реальном случае она может быть расположена и вне зеркала. Данное допущение можно считать правомерным, поскольку оно имеет место в широко распространенном способе регистрации диаграммы направленности с помощью фотоприемника по дуге окружности, центр которой находится на переднем зеркале.

Рассмотрим $\triangle KLM$, и $\triangle KLO$. В $\triangle KLO$, $\varphi_1' = \arctg A/B$, в $\triangle KLM$, $\varphi_1 = \varphi_1' + \alpha_1 = \arctg A/B + \alpha_1$. В $\triangle KLM$, $LM_1 \cdot \sin \varphi_1 = A$,

отсюда

$$LM_1 = \frac{A}{\sin \varphi_1} = \frac{A}{\sin(\operatorname{arctg} A/B + d_1)}. \quad (I.1)$$

Далее, $LM_1 \cos \varphi_1 = KM_1$. Подставив выражение через известные величины LM_1 и φ_1 в выражение для KM_1 , получим

$$KM_1 = \frac{A}{\sin(\operatorname{arctg} A/B + d_1)} \cos(\operatorname{arctg} \frac{A}{B} + d_1) = A \operatorname{ctg}(\operatorname{arctg} \frac{A}{B} + d_1). \quad (I.2)$$

Поскольку $\triangle KLM_1$ и $O_1O'_1M_1$ подобны, то, выразив $M_1O'_1$ и M_1O_1 через известные величины, получим формулу для определения $O_1O'_1$, т.е. линейного смещения пятна лазера по первой пластине:

$$M_1O_1 = B - KM_1 = B - A \operatorname{ctg}(\operatorname{arctg} A/B + d_1),$$

$$M_1O'_1 \cos \varphi_1 = M_1O_1.$$

отсюда

$$M_1O'_1 = \frac{M_1O_1}{\cos \varphi_1} = \frac{B - A \operatorname{ctg}(\operatorname{arctg} A/B + d_1)}{\cos(\operatorname{arctg} A/B + d_1)}, \quad O_1O'_1 = M_1O'_1 \sin \varphi_1,$$

окончательно получаем

$$S_1 = |O_1O'_1| = [B - A \operatorname{ctg}(\operatorname{arctg} A/B + d_1)] \cdot \operatorname{tg}(\operatorname{arctg} A/B + d_1). \quad (I.3)$$

Аналогично, рассмотрев $\triangle KLM_2$ и $\triangle KLO_2$, $\triangle KLM_2$ и $\triangle M_2O_2O'_2$, получим выражение для определения линейного смещения пятна по второй пластине:

$$S_2 = |O_2O'_2| = [B + C - A \operatorname{ctg}(\operatorname{arctg} \frac{A}{B+C} + d_2)] \cdot \operatorname{tg}(\operatorname{arctg} \frac{A}{B+C} + d_2). \quad (I.4)$$

Из эксперимента $A = 205$ мм, $B = 517$ мм, $C = 4030$ мм. Подставив в выражения (I.3) и (I.4) значения углов из табл. I.4, определим вертикальные и горизонтальные линейные смещения пучка по пластинам 3 и 4. Вычислим угол увода от луча и положение точки вращения оси относительно переднего зеркала, приняв во внимание сделанное ранее допущение, что точка разворота оси находится на переднем зеркале лазера. Из рис. I.1 видно, что угол отклонения от лазерного луча AO'_2 от начального положения AO_2 равен

$$d = \operatorname{arctg} \frac{S_2 - S_1}{C}. \quad (I.5)$$

Положение точки вращения оси относительно переднего зеркала определим из соотношения сторон подобных треугольников AO_1O_2' и AO_2O_1' .

Из соотношения $\frac{S_1}{B} = \frac{S_2}{C+B}$, опуская промежуточные выкладки, получаем

$$N = \frac{S_1 C}{S_2 - S_1} \quad (1.5)$$

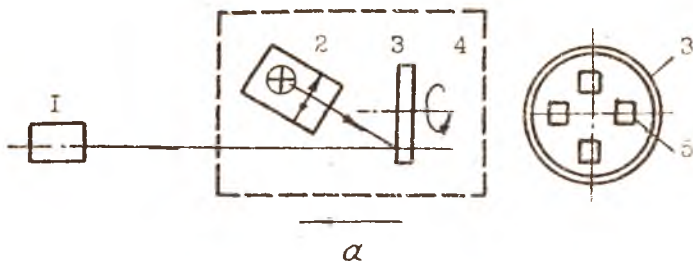
Поскольку точка разворота от луча может и не принадлежать последней, то N представляет собой горизонтальную или вертикальную проекцию точки разворота на ось луча в начальный момент времени в зависимости от того, какие составляющие S_1 и S_2 подставлены в формулу (1.5). Результаты вычислений по (1.5) представлены в табл. 1.5.

Т а б л и ц а 1.5

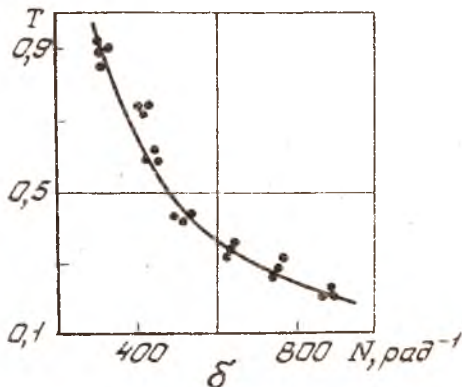
Значение угла α и проекции точки разворота на ось луча

Угол	Время, $t \cdot 10^3$ с					
	0...0,9	1,26...2,16	2,52...3,42	3,78...4,68	5,04...5,94	6,30...7,2
Верт.	0	0°00'12"	0°00'01"	0°00'01"	0°00'03"	0°00'02"
Гор.	0	0°00'17"	0°00'15"	0°00'15"	0°00'19"	0°00'10"
Верт.		0	-4030	5373	-4030	-10667,6
Гор.		639,5	548,9	808,7	1268,7	2203,9

Измерение пространственного разрешения теле- и тепловизионных камер. Измерение разрешающей способности телекамер, когда изображение вводится непосредственно в ЭВМ, проводилось на телекамере "Электроника Д-50" с помощью оптической схемы, представленной на рис. 1.2. Тест-объектами служили фотографии прямоугольных миш абсолютного контраста с периодами $S = 2,44; 1, 87; 1,41; 1,00$ мм. Фотографии освещались равномерным световым пучком видимого диапазона. Путем смены миш, находящейся в револьверном держателе, и поступательного перемещения блока тест-объекта пространственная частота в пространстве предметов могла варьироваться от $N = 340...1800$ рад⁻¹. Результаты обработки изображения миш высвечивались на экране графического монитора в виде гистограммы контраста и его цифрового значения. Зависимость коэффициента передачи контраста (КПК) системы от пространственной частоты (рис. 1.2) имеет вид, характерный для фильтра нижних частот. Уровень шума составляет 0,2, что подтверждает вывод о узком динамическом диапазоне видеоканала.

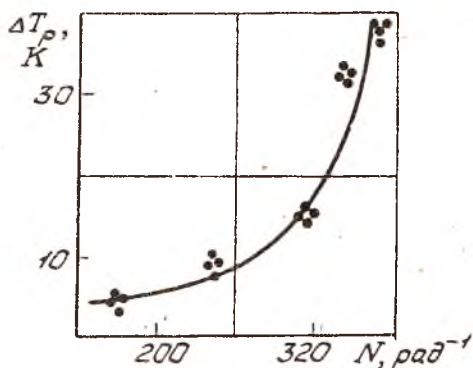


Р и с. 1.2. Оптическая схема измерения разрешающей способности телекамеры "Электроника Л-50" (а) и результаты цифровой обработки мира (б): 1 - телекамера; 2 - диапроектор "Свитязь"; 3 - револьверный держатель мира; 4 - корпус; 5 - мира



Для телекамеры "Электроника-50" зависимость минимально разрешимой разности температур от пространственной частоты, выраженной в обратных угловых единицах последовалась с помощью тест-объекта. Тест-объект представлял собой тепловой резервуар прямоугольной формы из меди, все грани которого, кроме одной, теплоизолировались пенопластом. Одна свободная боковая поверхность зачернялась угольным порошком. Температура жидкости в резервуаре контролировалась термометром. Исследуемая поверхность прикрывалась мирой из фольгированного стеклотекстолита. Период отверстий прямоугольной формы составлял $l = 10$ мм. В эксперименте резервуар, находящийся на расстоянии $l = 4$ м от тепловизора, наполнялся горячей водой и фиксировалась разность между температурой помещения и воды, при которой штрихи мира переставали разрешаться. Затем тепловизор приближался к тест-объекту до появления отчетливого разрешения мира и снова отмечалась разность температур, соответствующая исчезновению разрешения. Измеренная таким

образом зависимость $\Delta T_p(N)$ представлена на рис. 1.3. Полученное в эксперименте значение пространственного разрешения на уровне 10угл.мин соответствует паспортному для тепловизора ТВ-03.

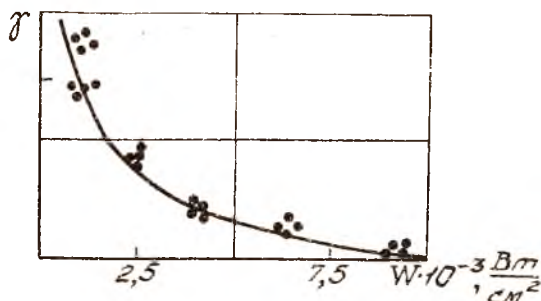


Р и с. 1.3. Изменение коэффициента передачи контраста УОВ телекамерой "Электроника Л-50" от величины N

Динамический диапазон разрешения телекамеры. Опробуем методику измерения динамического диапазона на телекамере "Электроника Л-50" с помощью оптической схемы. Луч света однододового лазера ЛП-79,2 проходит через поляризационный аттенуатор, составленный из двух поляризаторов, расширяется рассеивающей линзой и дополнительно ослабляется нейтральным светофильтром. С помощью поворотного зеркала свет направляется либо на мишень видикона через диафрагму $D = 2,5$ мм, либо на фотоприемник измерителя мощности лазерного излучения с рабочей апертурой также $D = 2,5$ мм. Как телекамера с диафрагмой, так и фотоприемник ОМЗ-65 могут перемещаться вдоль оптической оси.

Настройка схемы производится следующим образом. Вначале телекамера устанавливается на таком расстоянии от рассеивающей линзы, чтобы неоднородность освещения мишени видикона в пределах отверстия диафрагмы не превышала 5% от среднего уровня. Симметрично мишени видикона относительно оси вращения поворотного зеркала 6 устанавливается фотоприемник ОМЗ-65. В результате настроечной процедуры достигается, во-первых, однородность освещения и, во-вторых, одинаковая плотность мощности излучения как на мишени, так и на фотоприемнике ОМЗ-65, т.е. осуществляется возможность абсолютных измерений.

Зависимость фототоклика УОВ от плотности потока мощности излучения носит нелинейный характер и приведена на рис. I.4. Полезный сигнал изменяется от 0,68 до 1 отн. ед. Высокий уровень черного фона обусловлен автоматической регулировкой усиления видеотракта и выбором опорного напряжения АЩН, число градаций освещенности в этом случае получается небольшим и равно 20.



Р и с. I.4. Зависимость величины показателя степени освещенности на фотослое от плотности мощности излучения

Прологарифмировав выражение зависимости сигнального тока видеоконны $\mathcal{I}_c = W^\gamma$:

$$\ln \mathcal{I}_c = \ln k + \gamma \ln W, \quad (I.6)$$

получим

$$\gamma = \frac{\ln \mathcal{I}_c'' - \ln \mathcal{I}_c'}{\ln W'' - \ln W'}, \quad (I.7)$$

где W - освещенность на фотослое, γ - показатель степени, который в широкой области изменения заключен в интервале 0,6...0,7, увеличиваясь до 2,3 при малых интенсивностях светового потока, \mathcal{I}_c'' и \mathcal{I}_c' - сигнальные токи, соответствующие освещенностям мишени W'' и W' соответственно.

Поскольку напряжение сигнала пропорционально для видеоконны сигнальному току, то по экспериментальным данным с вычетом уровня черного фона построена зависимость γ от W (рис. I.4), с помощью которой верхняя граница эффективного преобразования свет-сигнал может быть определена на уровне $(3...5) \cdot 10^{-3}$ Вт/м².

Температурное разрешение тепловизора исследовалось Г.В.Будриной с помощью протяженного источника тепла с заданным градиентом температуры. Источник представлял собой медную зачерненную пластину, теплоизолированную с одной стороны пенопластом, имеющую тепловой контакт с двумя резервуарами с разной температурой. Температура контролировалась термометрами.

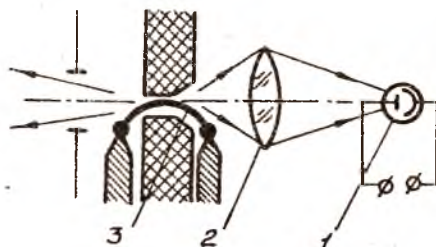
Пластина с резервуарами располагалась на расстоянии $L = 120$ см от тепловизора. Расстояние это выбиралось из условия, чтобы участки пластины с разностью температур $\Delta T = 0,2 \dots 0,3$ К заведомо пространственно разрешались бы тепловизором. Для определения абсолютных координат изотерм на пластину накладывалась маска с прямоугольным окном шириной 5 мм. Минимальное расстояние, на которое возможно приблизить изотермы, составило $S = 1,25$ мм. В предположении постоянного градиента температуры по пластине температурное разрешение тепловизора ТВ-03 в температурном интервале $\Delta T = 20 \dots 70^\circ\text{C}$ оказалось равным $\Delta T = 0,3$ К.

Работоспособность тепловизора в диапазоне температур до 473 К проверялась по изображению нагревательного элемента, температура которого контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. Устойчивое, контрастное изображение нагревательного элемента наблюдалось до температуры $T = 573$ К.

Получение световых импульсов и исследование их спектров испускания. Световые импульсы получают с помощью импульсных источников света типа ИСИ-1, а исследование их спектров осуществляется с помощью спектрометров ИКСС-2 и спектрографа ДФС-452.

Импульсный источник света ИСИ-1 предназначен для получения светового импульса прямоугольной формы яркостью излучения порядка $2 \cdot 10^{11}$ нит и длительностью 20 мкс (рис. 1.5).

Источник предназначен для использования в высокотемпературной пирометрии, при энергетической калибровке оптических приборов, в количественной спектроскопии плазмы.



Р и с. 1.5. Схема импульсного источника света ИСИ-1: 1 - фотоприемник; 2 - коллиматор; 3 - источник излучения

Его технические данные:

1. Источник света работает в режиме одиночных импульсов.
 2. В области от 200 до 800 нм излучает сплошной спектр с небольшим количеством линий поглощения и испускания элементов, входящих в состав электродов и материала стенок капилляра.
 3. Распределение яркости излучения источника в поперечном сечении капилляра разряда для различных длин волн соответствует единому температурному полю.
 4. В области спектра 500...600 нм излучение источника соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре около 40000 К.
 5. Излучателем в источнике служит канал разряда с плотностью тока порядка 10^5 А/см² в открытом с торцов текстолитовом капилляре диаметром 2 мм и длиной 10 мм. Практически используется излучение, выходящее из открытых торцов капилляра по направлению его оси.
 6. В приосевой зоне канала имеется площадка, в пределах которой яркость излучения практически одинакова. К стенке капилляра яркость излучения резко падает.
 7. Параметры электрического импульса:
напряжение – 5000 В,
амплитуда тока – не менее 8000 А,
длительность импульса тока на уровне 0,9 от его амплитуды – 20 мкс,
длительность переднего фронта импульса – 5 мкс,
длительность спада импульса – 15 мкс.
 8. Амплитуда внешнего запускающего импульса положительной полярности не менее 150 В при токе в импульсе 100 мА.
 9. Питание источника осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В $\pm 10\%$, частотой 50 Гц.
 10. Максимальная потребляемая мощность 13 А – не более 600.
- Схема источника состоит из двух функциональных блоков: формирователя импульсов и камеры разряда.

Разрядная камера закреплена на устойчивом рельсе и соединена кабелем с формирователем импульсов. Камера состоит из основания и двух крышек. В закрытом положении крышки камеры фиксируются защелками, предохраняющими их от самопроизвольного открывания во время разряда. В открытом положении крышки удерживаются ограничителями. Внутри замеры закреплены держатели электродов, трансформатор, элементы контура поджига, блокирующие контакты, обеспечивающие снятие напряжения с электродов при открывании крышек.

В середине камеры на вертикальной плате помещается пластина с

капиллярными отверстиями, изготовленная из текстолита. Через капиллярные отверстия пластины происходит разряд искусственной линии между угольными электродами, расположенными с обеих сторон капиллярного канала. Пластины фиксируются на вертикальной плате специальными приемным рычагом.

Через отверстие, закрытое кварцевым стеклом, выводится свет, а в оправу на стенке другой крышки устанавливается проектор при юстировке положения горизонтальной оси капилляра относительно оптической оси приемника света. На место проектора могут быть установлены или заглушка, или фланец для подсоединения камеры к лабораторной системе вытяжной вентиляции.

К разрядной камере крепится подъемное устройство, с помощью которого камера устанавливается на рельсе спектрального прибора и может перемещаться в вертикальном, а также в двух взаимноперпендикулярных горизонтальных направлениях.

Порядок наработки на ИСМ-1 следующий:

1. Закройте на замки камеру разряда.

2. Подсоедините сетевой кабель к сети переменного тока напряжением 220 В частотой 50 Гц.

3. Включите тумблер "СЭТЬ".

4. Вставьте проектор в разрядную камеру.

5. Подключите проектор к гнездам "8 В", расположенным справа на корпусе источника.

6. Сфокусируйте нить лампы проектора на разрядное отверстие.

7. Юстировку отверстия производить перемещением камеры разряда при помощи подъемного устройства. После юстировки проектор выньте из камеры разряда.

8. Вместо проектора вставьте фланец для вытяжной вентиляции или отверстие для проектора закройте заглушкой.

9. Переключатель ряда работ установите в положение "РАБОТА".

10. Включите тумблер "ВЫСОКОЕ". При этом должна загореться сигнальная лампочка, расположенная под этим тумблером.

Искусственная линия начинает заряжаться. О наличии и величине напряжения на линии можно судить по показаниям стрелочного прибора, кроме того, по мере заряда линии начинает мигать неоновая лампочка, расположенная над отверстием с надписью "КАЛИБРОВКА". Стрелочный прибор — микроамперметр проградуирован таким образом, что показанию прибора 100 мкА соответствует напряжение заряда линии 5000 В.

II. Во время заряда линии необходимо непрерывно следить за показаниями микроамперметра и при достижении 5000 В тумблер "ВЫСОКОЕ" выключить.

12. Произведите заряд искусственной линии нажатием кнопки "РАЗ-РЯД" или подачей запускающего импульса на разъем "ВНЕШНИЙ ПУСК".

13. После разряда линии переключатель рода работ переведите в положение "ЛИНИЯ ЗАЗЕМЛЕНА".

Спектрометр инфракрасный скоростной ИКСС-2 предназначен для получения спектров поглощения и излучения быстротекущих процессов длительностью 0,001 с и более (рис. 1.6).

Спектрометр может быть использован для исследования химических реакций, импульсного фотолиза, фотосинтеза, люминесценции, горения, процессов в ударных трубах и в нестационарной плазме, излучения импульсных источников света и других явлений, изменяющихся во времени.

Его технические характеристики

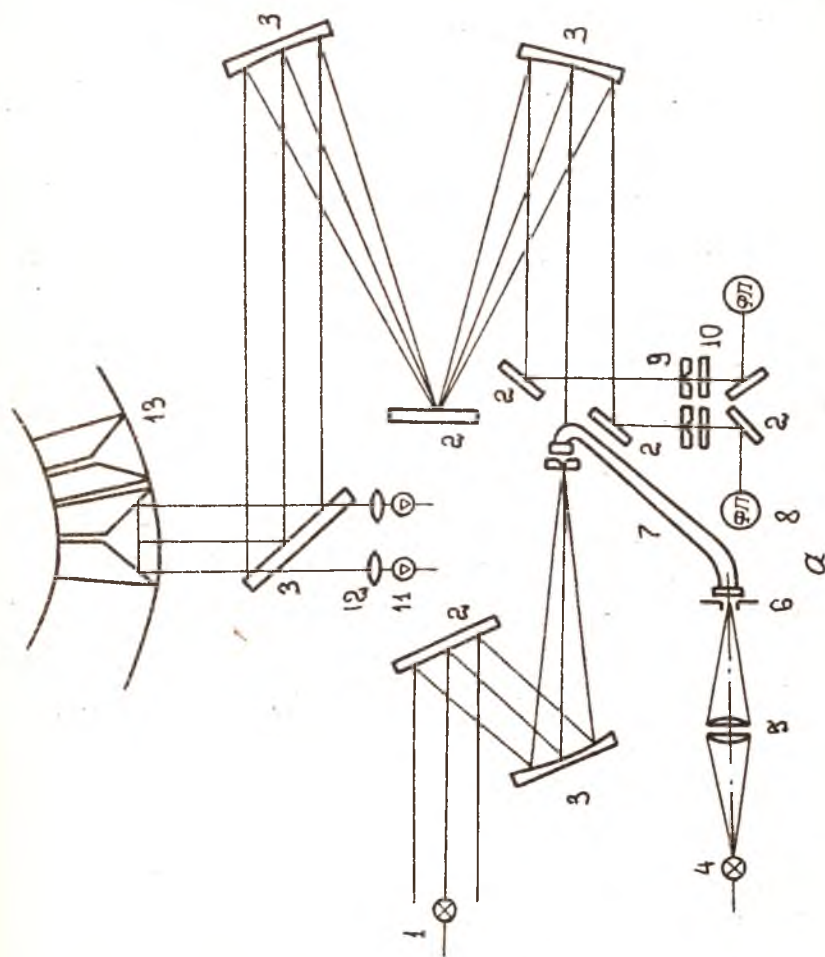
Рабочий диапазон спектра, мкм	0,4...0,8
Дифракционные решетки с числом штрихов на 1 мм	300,100,50,24,12
Фокусное расстояние объектива, мм	350
Относительное отверстие	1:5
Скорость сканирования систра, спектр/с...	100,200,400,800 1 спектр за 10 мин
Диапазон раскрытия щелей, мм	0,01...2,0
Обратная линейная дисперсия, мкм/мм:	
для решетки 300 штр/мм	0,004
100 штр/мм	0,013
50 штр/мм	0,026
24 штр/мм	0,055
12 штр/мм	0,111
Предел оптического разрешения, см ⁻¹	5,0

Спектрометр состоит из осветителя, монохроматора и приемно-регистрающего устройства, включающего в себя блок управления и блок питания.

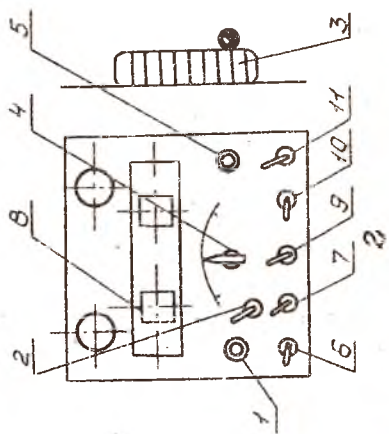
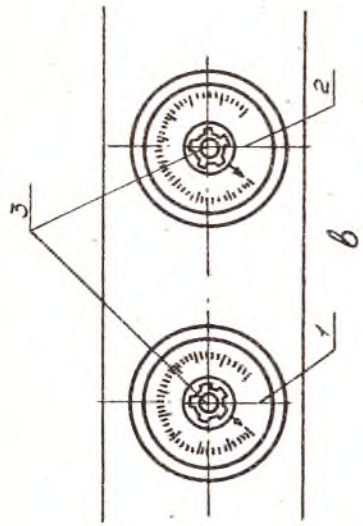
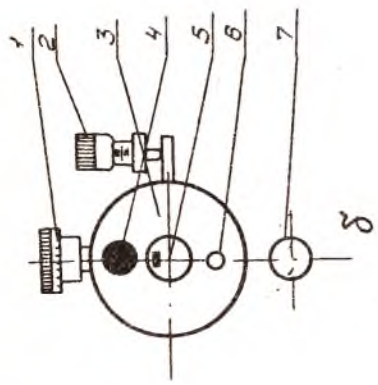
В основу работы спектрометра положено сканирование спектра исследуемого явления уголковыми зеркалами, равномерно расположенными по периферии сканирующего барабана.

Радиация от источника излучения через входную щель поступает в монохроматор двойной дисперсии, в промежуточной фокальной плоскости которого находится сканирующий барабан. При вращении барабана по входным щелям монохроматора сканируются два интервала длин волн.

Фототок, возникающий в приемниках радиации под действием падающего излучения, усиливается и поступает на вход регистрирующего устройства. Регистрация сигнала производится параллельно по двум кана-



Р и с. I.6. а (начало)



Р и с.1.б, б, в, г (продолжение)

лам, каждый из которых имеет выход на осциллограф, самописец и внешнее запоминающее устройство.

Спектрометр имеет три режима сканирования: скоростной, медленный и ручной.

В режиме скоростного сканирования производится запись регистрируемых спектров в память с одновременным просмотром поступающей информации на экране осциллографа.

В режиме медленного сканирования исследуемый образец записывается непосредственно на ленту самописца.

Режим ручного сканирования позволяет выводить на выходную щель нужную длину волны.

Оптическая схема спектрометра состоит из трех основных частей: осветительной системы, оптической схемы монохроматора, проекционных систем и двух вспомогательных: схемы формирователя импульса "Начало сканирования" и системы наведения на исследуемый объект.

Излучение от источника света осветительной системой направляется через входную щель 4 и на коллиматорное зеркало и параллельным пучком заполняет диспергирующий элемент. В качестве диспергирующего элемента в монохроматоре используются сменные дифракционные решетки 300, 100, 51, 24, 12 штрих/мм. Дифракционная решетка разлагает излучение в спектр в промежуточной фокальной плоскости по биссектрисе уголкового зеркала, отраженный от уголкового зеркала спектр смещается в сторону и проходит монохроматор вторично, в результате чего на выходных щелях спектрометра образуется спектр двойной дисперсии. В силу симметрии уголкового зеркала часть спектра смещается вправо от входной щели, другая часть — влево, обе части спектра зеркалами 9 направляются на выходные щели. Для разделения нерабочих порядков спектра за выходными щелями установлены светофильтры. Спектры, проходящие выходные щели, поворотными зеркалами направляются в проекционные системы и фокусируются на чувствительных площадках фотоприемников.

Оптическая схема формирования импульса "Начало сканирования" состоит из источника света — световода, который линзой проецируется в промежуточной фокальной плоскости монохроматора. Изображение источника света линзой переносится на приемник — фотодиод. При определенном положении уголкового зеркала в момент, предшествующий началу сканирования спектра на выходных щелях, формируется импульс "Начало сканирования".

Оптическая схема наведения на исследуемый объект состоит из источника света, который объективом проецируется на торец световода. Световод переносит изображение источника на входную щель монохромато-

ра, а зеркальный объектив проецирует это изображение в точку прост - ранства, где должен помещаться исследуемый объект.

Порядок работы на спектрометре ИКСС-2 следующий:

1. Включить спектрометр в сеть. Установить соответствующие светофильтры.

2. В зависимости от выбранного для работы спектрального диапа - зона установить в осветитель источник излучения (галогенную лампу или глабар).

3. Включить источник излучения.

4. Проверить освещение входной щели (равномерное).

5. Установить рабочую ширину входной и выходной щелей.

6. Установить держатель с исследуемым образцом.

7. Установить рабочий диапазон одним из переключателей "ДИАПА - ЗОН". При этом автоматически устанавливаются дифракционная решетка, светофильтры и переключаются соответствующие приемники излучения.

8. Включить фотоумножители на блоке управления.

Включение скоростного сканирования:

1. Снять модулятор.

2. Включить переключатель "ДВИГАТЕЛЬ" на блоке управления.

3. Изменение скорости сканирования производится изменением ско - рости вращения двухскоростного электродвигателя М2 и положением па - сенка.

Скорость сканирования спектр/с	Положение переключателя	Положение пасенка
100	"100"	II ступень
200	"200"	II ступень
400	"400"	I ступень
800	"800"	I ступень

Ручное сканирование:

1. Установить модулятор перед входной щелью монохроматора.

2. Надеть пассик на шкив электродвигателя М3.

3. Открыть заднюю крышку монохроматора.

4. Вывести рукоятку из зацепления, потянув ее вперед до щелчка.

5. Включить переключатель МС на передней панели монохроматора.

6. Включить переключатель МС на блоке управления.

7. Осуществлять ручное сканирование вращением рукоятки механиз - ма ручного сканирования.

Наблюдение спектров на экране осциллографа:

1. Осциллограф устанавливается в следующий режим работы:

режим развертки - ждущий;
синхронизация развертки - внешним синхронизирующим сигналом;
полярность синхронизирующего сигнала - положительная;
длительность развертки должна обеспечивать устойчивое изображение одного спектра в каждом канале.

Спектрограф ДФС-452 (рис. 1.6) предназначен для проведения спектрографических работ при исследовании спектров излучения, требующих высокой дисперсии в широком спектральном диапазоне:

Спектральный диапазон прибора 190...1100 нм

Фокусное расстояние 1000 мм

Имеются две дифракционные решетки: 600 штрихов на мм и 120 штрихов на мм.

Обратная линейная дисперсия:

с решеткой 600 штрихов на мм

в первом порядке 1,6...1,59 нм/мм

во втором порядке 0,8...0,63 нм/мм

с решеткой 1200 штрихов на мм

в первом порядке 0,8...0,63 нм/мм

во втором порядке 0,5...0,2 нм/мм

Интервал длин волн, укладывающихся на фотопластинке:

с решеткой 600 штр/мм

в первом порядке до 360 нм

во втором порядке до 160 нм

с решеткой 1200 штр/мм

в первом порядке до 160 нм

во втором порядке до 92 нм

Размеры фотопластинки 9x2A см²

Пределы раскрытия щели 0...0,4 мм

Цена деления шкалы микрометрического

винта щели 0,001 мм

Пределы установки таймера 3 мин

Цена деления таймера 1 с

Порядок работы на спектрографе ДФС-452 следующий:

Работать рекомендуется в затемненном помещении во избежание попадания прямого света в щель.

1. Заземлить спектрограф. Клемма заземления находится около крепления оптической скамьи.

2. Проверить, чтобы все переключатели на пульте управления находились в следующих положениях:

Переключатель включения (рис. 1.6, г) питания (тумблер 2) в положении "ВКЛ."

Переключатель включения спектрографа (тумблер 6) в нейтральном положении.

Переключатель затвора (тумблер 7) в положении "ВЫКЛ."

Переключатель поднятия кассеты (тумблер 10) в нейтральном положении.

Включатель подсветки (тумблер II) в положении "подсветка".

3. Включить вилку спектрографа в сеть.

4. Включить тумблер питания 2.

При этом загорается контрольная лампочка I и шкала 8. Если шкала и лампочка не загораются, проверить предохранитель.

5. Включить подсветку тумблером II.

Ввести зеркало переключателем. По световому пятну лампочки отъюстировать оптическую схему. Вывести зеркало и включить подсветку.

6. Выбрать рабочую щель. Для этого микрометрическим винтом выбрать оптимальную ширину щели. Микрометрическим винтом 2 нужный угол наклона щели.

Ручкой 7 оптимальное положение щели вдоль оптической оси.

Ручкой 4 установить нужное окно или ослабитель.

7. Выбрать нужный диапазон спектра следующим образом:

Выбрать нужную для работы решетку.

В зависимости от рабочей решетки и нужного порядка разрешения установить переключателем 4 (см. рис. 1.6, б) нужную шкалу.

При помощи ручки 3 выставить в окне 8 нужную длину волны.

8. Ручкой 10 установить оптимальное начальное положение кассеты.

9. Поставить тумблер затвора 7 в положение "ЗАТВОР".

10. Тумблером 9 выбрать оптимальный автоматический сдвиг кассеты.

11. На таймере поставить время, оптимальное для разгорания или обжига образца ручкой 3.

12. На таймере 2 выставить оптимальное время экспозиции.

Прибор готов к работе.

Включение производится тумблером пуска, нажатием вниз.

В случае необходимости можно прекратить процесс съемки нажатием этого тумблера вверх.

Пример измерений. Спектрограф разрешает с решеткой 600 штр./мм в первом порядке триплет железа 310 нм, с решеткой 1200 штр./мм во втором порядке дуплет железа 309, 9897-309, 9971 нм при следующих условиях:

Ширина щели 0,006 мм

Наилучшее положение спектра, найденное

при перемещении щели вдоль опт. оси $\pm 0,5$ мм.

Тип пластинки - диапозитивный

Чувствительность пластинки 2,8

Время экспозиции 3 с

Кварцевый генератор:

фокусное расстояние 61 мм

световой диаметр 24 мм

Ахроматический конденсатор с диффрагмой:

фокусное расстояние 150 мм

световой диаметр 15 мм

Конденсаторная насадка:

фокусное расстояние 209 мм

световой диаметр 15 мм

Конденсаторная головка:

фокусное расстояние 75 мм

световой диаметр 25 мм.

Возбуждение спектров промышленных материалов. Для возбуждения атомных спектров при качественном и количественном спектральных анализах промышленных материалов применяется источник возбуждения спектров ИВС-23 (см. рис. I.6,е).

Его технические характеристики:

Эффективное напряжение на электродах $13,85 \pm 0,35$ кВ.

Штатив обеспечивает крепление анализируемой пробы размерами $40 \times 55 \times 150$ мм, массой не более 3 кг и противоэлектрода диаметром от 6 до 10 мм, длиной от 25 до 150 мм.

Погрешность отсчета аналитического промежутка по шкале маховичка 0,01 мм, по измерительной шкале экрана штатива 0,5 мм. Воспроизводимость установки аналитического промежутка в пределах $\pm 2\%$.

Механизм перемещения держателя пробы обеспечивает подвижку в трех взаимноперпендикулярных направлениях: вдоль оптической оси и в плоскости, перпендикулярной оптической оси, на величину 10 мм.

Механизм перемещения противоэлектрода обеспечивает подвижку держателя в двух взаимноперпендикулярных направлениях: по вертикали - 10 мм маховичком, выведенным на корпус, и перпендикулярно оптической оси; в горизонтальной плоскости - 10 мм маховичком, расположенным в рабочей камере.

Откидной упор обеспечивает установку верхнего электрода на расстоянии $225 \pm \begin{matrix} +7 \\ -2 \end{matrix}$ мм от опорной плоскости рельса. Погрешность установки половины аналитического промежутка по откидному упору $\pm 0,05$ мм, цена деления шкалы - 0,1 мм.

Труба с конденсором может наклоняться на угол $\pm 3^\circ$, перемещаться в вертикальной плоскости относительно оптической оси спектрального прибора и жестко фиксироваться в рабочем положении.

Силом обеспечивает продувку аналитического промежутка газом заданного состава при расходе газа не менее 1,5 л в минуту.

Принцип действия ИВС-23 заключается в преобразовании электрической энергии питающей сети в электрические импульсы заданной формы, амплитуды и частоты, возбуждающие в аналитическом промежутке низко-температурную плазму, излучающую характеристический атомный спектр анализируемого вещества.

Оптическая схема состоит из защитного стекла, объектива, поворотной призмы и диффузно пропускающего свет экрана с измерительной шкалой, цена деления шкалы 0,05 мм с учетом увеличения системы.

Элементы закреплены в оптической трубе, расположенной во втулке. Втулка имеет возможность перемещения в вертикальной плоскости, что позволяет совместить оптические оси объектива камеры разряда и спектрального аппарата. Труба с элементами и призма при установке имеют возможность поворота вокруг своих осей, что позволяет совместить изображение середины аналитического промежутка (оптическая ось) с перекрестием сетки экрана.

Порядок работы на ИВС-23 следующий:

1. Установить штатив на рельсе спектрального аппарата и закрепить его двумя винтами на заданном расстоянии от щели.
2. Установить генератор рядом со штативом.
3. Заземлить генератор и штатив.
4. Включить тумблер в положение "ВНУТРЕННЕЕ".
5. Зазор между шарами предохранительного разрядника в блоке питания должен быть 8...10 мм.
6. Подсоединить концы кабеля к генератору и штативу согласно маркировке на концах кабеля генератора и штатива.
7. Сетевой кабель должен быть подключен к питающей сети через отдельный рубильник на ток до 25 А.
8. Установить в рабочей камере штатива два равных электрода диаметром 6...10 мм, заточенных на 90° , с сопряженной сферой радиусом 1 мм и привести их в соприкосновение.
9. В соответствии с характером спектрально-аналитической задачи переключить генератор на работу по "сложной" или "простой" схеме и установить требуемые величины емкости и индуктивности. При работе по "простой" схеме резистор RI (A1) отсоединить от аналитического промежутка.
10. Включить тумблер "СЕТЬ".

11. Установить нужную величину аналитического промежутка. Закрыть дверки рабочей камеры штатива и генератора нажатием кнопки "ПУСК". Включить генератор. Происходит высоковольтной пробой аналитического промежутка.

12. Выключить генератор нажатием кнопки "СТОП".

13. Установить конденсор в тубусе штатива: снять крышку устройства для закрепления и подвигки тубуса: установить тубус в отверстие качающегося фланца на заданном расстоянии передней линзы от оси электродов и закрепить тубус к фланцу винтом.

14. Снять крышку со щели спектрального аппарата и открыть щель до 0,1 мм. Совместить оптические оси конденсора и спектрального аппарата, например, путем совмещения центра видимого изображения источника света с центром грани призмы или центром оправы дифракционной решетки. Наблюдения вести через кассетную часть аппарата.

15. Закрыть дверку штатива и включить генератор нажатием кнопки "ПУСК".

16. Действуя винтами перемещения тубуса в вертикальной плоскости, добиться точного совмещения оптических осей конденсора и спектрального аппарата, рабочее положение тубуса закрепить винтами-фиксаторами.

17. Нажать кнопку "СТОП".

18. Закрыть крышкой устройство подвигки тубуса и закрепить ее винтами. Генератор и штатив готовы к работе.

19. Режим работы генератора: круглосуточный, повторно-кратковременный, 1 мин – работа, 2 мин – пауза.

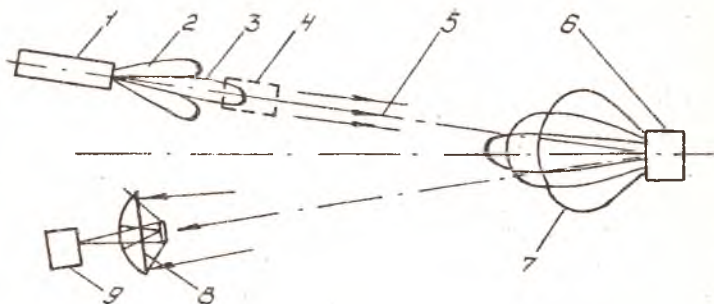
20. Регулировку работы генератора следует производить для каждого режима отдельно. Получение устойчивого условия возбуждения спектров добиваются постепенным выводом реостата до установления требуемого тока, величину которого контролируют по амперметру.

21. Наиболее устойчивые условия возбуждения спектра получают при работе в режиме одного разряда в каждый полупериод.

1.3. Отражательные характеристики цели*

Лазерное излучение, отраженное от цели, представляет собой случайный процесс, зависящий от многих факторов: свойств поверхности цели, ее ориентации, длины волны зондирующего излучения, температуры и т.п. При расчете лазерных систем необходимо знание средних энергетических и статистических характеристик отраженного сигнала, причем первые определяются эффективной поверхностью рассеяния цели, а вто-

ные описываются плотностью вероятности или аналогичной интегральной характеристикой — функцией распределения интенсивности отраженного лазерного сигнала.



Р и с. 1.7. Прохождение зондирующего излучения по цели: 1 — излучатель, 2 — крайний и 3 — основной лепестки диаграммы направленности, 4 — коллиматор, 5 — поток излучения; 6 — мишень, 7 — индикатрисса рассеивания, 8 — приемная антенна, 9 — устройство оптической визуализации

Энергетические отражательные свойства цели определяют долю энергии (или мощности) зондирующего лазерного сигнала, излученного через коллиматор по направлению к цели, которая отразится в обратную сторону и поступит на приемное устройство лазерной системы (рис. 1.7). Эти свойства определяются размерами, геометрией и характером поверхности цели. Сильно шероховатые поверхности рассеивают падающее излучение по закону Ламберта, согласно которому мощность излучения, отраженного в направлении, составляющем угол φ с нормалью к поверхности (угол наблюдения), равна

$$P = P_0 \cos \varphi, \quad (1.8)$$

где P_0 — мощность излучения, отраженного перпендикулярно к поверхности; φ — угол наблюдения.

Поверхности, отражающие по закону Ламберта, называют диффузно отражающими, причем их яркость не зависит от угла наблюдения φ .

В реальных условиях поверхность целей рассеивает лазерное излучение не по закону Ламберта из-за наличия участков с зеркальным характером отражения. Это свойственно аэродинамическим целям, имеющим хорошо полированную поверхность. Наличие зеркальных участков придает большую направленность отраженному излучению, чем в случае диффуз-

ноотражающей поверхности. Так, специальные оптические уголково-отражатели практически полностью возвращают падающее на них излучение в обратном направлении.

Таким образом, геометрические размеры цели еще не определяют мощность отраженного локационного сигнала. Для ее количественной оценки вводит понятие эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), численно равной площади такой плоской поверхности, которая при равномерном рассеянии зондирующего излучения во все стороны (изотропно) создает на приемной апертуре лазерной системы интенсивность излучения, равную фактической.

В табл. I.6 приведены значения коэффициентов диффузного отражения для различных материалов, температур, углов падения и длин волн зондирующего излучения.

Т а б л и ц а I.6

Коэффициент диффузного отражения для различных материалов

Наименование материала	Температура, К	$\lambda = 10,6 \text{ мкм}$				
		$\varphi = 90^\circ$	87°	85°	60°	30°
Теплоизоляционная капроновая ткань	373	0,74	0,32	0,30	0,1	0,04
	323	0,74	0,32	0,30	0,1	0,04
	273	0,74	0,32	0,30	0,1	0,04
	223	0,74	0,32	0,30	0,1	0,04
	173	0,75	0,33	0,31	0,1	0,04
Покртия на основе диоксида циркония	373	0,95	0,91	0,53	0,52	0,34
	323	0,97	0,93	0,54	0,53	0,36
	273	0,99	0,95	0,55	0,54	0,37
	223	0,99	0,95	0,55	0,54	0,37
	173	0,99	0,95	0,55	0,54	0,37
Пластины радиационных элементов из арсенида галия	373	0,20	0,12	0,03	$0,06 \times 10^{-3}$	$0,03 \times 10^{-3}$
	323	0,26	0,16	0,04	$0,07 \times 10^{-3}$	$0,04 \times 10^{-3}$
	273	0,33	0,20	0,06	$0,09 \times 10^{-3}$	$0,05 \times 10^{-3}$
	223	0,60	0,36	0,10	$0,17 \times 10^{-3}$	$0,09 \times 10^{-3}$
	173	0,70	0,42	0,12	$0,20 \times 10^{-3}$	$0,10 \times 10^{-3}$
Алюминиевый сплав после химполирования	373	0,976	0,589	0,170	$0,279 \times 10^{-3}$	$0,140 \times 10^{-3}$
	323	0,978	0,589	0,170	$0,279 \times 10^{-3}$	$0,140 \times 10^{-3}$
	273	0,980	0,590	0,170	$0,280 \times 10^{-3}$	$0,140 \times 10^{-3}$
	223	0,981	0,592	0,172	$0,281 \times 10^{-3}$	$0,135 \times 10^{-3}$
	173	0,985	0,595	0,173	$0,282 \times 10^{-3}$	$0,136 \times 10^{-3}$

Наименование материала	Температура, К	$\lambda = 10,6 \text{ мкм}$				
		$\varphi = 90^\circ$	87°	85°	60°	30°
Полилавановая пленка с алюминиевым покрытием	373	0,93	0,40	$32,4 \times 10^{-3}$	$0,51 \times 10^{-3}$	0
	323	0,93	0,40	$32,4 \times 10^{-3}$	$0,51 \times 10^{-3}$	0
	273	0,93	0,40	$32,4 \times 10^{-3}$	$0,51 \times 10^{-3}$	0
	223	0,93	0,41	$33,7 \times 10^{-3}$	$0,52 \times 10^{-3}$	0
	173	0,96	0,42	$35,2 \times 10^{-3}$	$0,54 \times 10^{-3}$	0
$\lambda = 1,06 \text{ мкм}$						
Теплоизоляционная капроновая ткань	373	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	323	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	273	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	223	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	173	0,72	0,32	0,29	0,09	0,03
Покрyтия на основе диоксида циркония	373	0,71	0,43	0,39	0,39	0,27
	323	0,72	0,44	0,40	0,40	0,27
	273	0,78	0,47	0,43	0,43	0,30
	223	0,89	0,54	0,49	0,49	0,33
	173	0,89	0,54	0,49	0,49	0,33
Пластины радиационных элементов из арсенида галлия	373	0,19	0,12	0,03	$0,05 \times 10^{-3}$	$0,03 \times 10^{-3}$
	323	0,25	0,15	0,04	$0,07 \times 10^{-3}$	$0,04 \times 10^{-3}$
	273	0,32	0,19	0,06	$0,09 \times 10^{-3}$	$0,05 \times 10^{-3}$
	223	0,50	0,30	0,09	$0,14 \times 10^{-3}$	$0,07 \times 10^{-3}$
	173	0,60	0,36	0,10	$0,17 \times 10^{-3}$	$0,09 \times 10^{-3}$
Алюминиевый сплав после химполирования	373	0,946	0,573	0,165	$0,270 \times 10^{-3}$	$0,136 \times 10^{-3}$
	323	0,947	0,573	0,165	$0,271 \times 10^{-3}$	$0,136 \times 10^{-3}$
	273	0,950	0,573	0,166	$0,272 \times 10^{-3}$	$0,130 \times 10^{-3}$
	223	0,951	0,574	0,167	$0,272 \times 10^{-3}$	$0,131 \times 10^{-3}$
	173	0,955	0,576	0,168	$0,274 \times 10^{-3}$	$0,132 \times 10^{-3}$

Наименование материала	Температура, К	$\lambda = 1,06 \text{ мкм}$				
		$\varphi = 90^\circ$	87°	85°	60°	30°
Полилавансовая пленка с алюминиевым покрытием	373	0,80	0,37	$2,6 \times 10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-3}$	0
	323	0,59	0,32	$2,7 \times 10^{-3}$	$0,41 \times 10^{-3}$	0
	273	0,84	0,39	$3,3 \times 10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-3}$	0
	223	0,88	0,41	$3,5 \times 10^{-3}$	$0,52 \times 10^{-3}$	0
	173	0,94	0,44	$3,7 \times 10^{-3}$	$0,56 \times 10^{-3}$	0
		$\lambda = 0,56 \text{ мкм}$				
Теплоизоляционная капроновая нить	373	0,70	0,30	0,28	0,09	0,03
	323	0,70	0,30	0,28	0,09	0,03
	273	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	223	0,71	0,31	0,29	0,09	0,03
	173	0,72	0,32	0,29	0,09	0,03
Покрyтия на основе диоксида циркония	373	0,40	0,24	0,22	0,22	0,15
	323	0,43	0,26	0,24	0,24	0,16
	273	0,50	0,33	0,30	0,30	0,20
	223	0,56	0,34	0,31	0,31	0,21
	173	0,56	0,34	0,31	0,31	0,21
Пластины радиационных элементов из арсенида гадия	373	0,18	0,11	0,02	$0,05 \times 10^{-3}$	$0,03 \times 10^{-3}$
	323	0,24	0,14	0,03	$0,07 \times 10^{-3}$	$0,03 \times 10^{-3}$
	273	0,30	0,18	0,04	$0,08 \times 10^{-3}$	$0,04 \times 10^{-3}$
	223	0,48	0,29	0,06	$0,13 \times 10^{-3}$	$0,07 \times 10^{-3}$
	173	0,58	0,35	0,07	$0,16 \times 10^{-3}$	$0,08 \times 10^{-3}$
Алюминиевый сплав после химполирования	373	0,828	0,50	0,100	$0,237 \times 10^{-3}$	$0,118 \times 10^{-3}$
	323	0,829	0,50	0,100	$0,237 \times 10^{-3}$	$0,118 \times 10^{-3}$
	273	0,830	0,50	0,148	$0,238 \times 10^{-3}$	$0,114 \times 10^{-3}$
	223	0,831	0,50	0,146	$0,238 \times 10^{-3}$	$0,115 \times 10^{-3}$
	173	0,834	0,50	0,147	$0,239 \times 10^{-3}$	$0,115 \times 10^{-3}$
Полилавансовая пленка с алюминиевым покрытием	373	0,84	0,36	$30,1 \times 10^{-3}$	$0,47 \times 10^{-3}$	0
	323	0,84	0,36	$30,1 \times 10^{-3}$	$0,47 \times 10^{-3}$	0
	273	0,90	0,39	$32,3 \times 10^{-3}$	$0,50 \times 10^{-3}$	0
	223	0,87	0,38	$31,2 \times 10^{-3}$	$0,48 \times 10^{-3}$	0
	173	0,92	0,39	$31,9 \times 10^{-3}$	$0,49 \times 10^{-3}$	0

ЭПР позволяет сравнивать отражательные свойства любых целей, уточняя их конкретную форму, материала поверхности и геометрических размеров. С физической точки зрения введение ЭПР эквивалентно замене реальной цели источником, излучающим равномерно во всех направлениях мощность

$$P = I\sigma,$$

где I — интенсивность зондирующего излучения в области цели, Вт/м²;

σ — эффективная поверхность рассеяния (ЭПР), м².

Таким образом, ЭПР цели есть коэффициент, связывающий интенсивность зондирующего излучения с полной мощностью излучения, рассеиваемого целью во всех направлениях. Размерность этого коэффициента совпадает с размерностью площади.

Пользуясь ЭПР, легко найти принимаемую мощность отраженного излучения на приемной апертуре лазерной системы:

$$P_{\text{пр}} = \frac{IS\sigma}{4\pi L^2}, \quad (I.9)$$

где L — дальность до цели, м; S — площадь приемной апертуры, м²;

Если ЭПР цели известна и заданы основные характеристики лазерной системы (мощность P_n и расхожимость 2θ излучения передатчика, а также эквивалентная мощность шумов приемного устройства N), дальность ее действия определяется как дальность до цели, при которой мощность сигнала равна эквивалентной мощности шумов приемного устройства.

Определив интенсивность зондирующего излучения в области цели по формуле $I = P_n / (\pi(L\theta)^2)$ и подставив это выражение в (I.9), найдем принимаемую мощность

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_n S \sigma}{(2\pi)^2 L^4 \theta^2} = N,$$

откуда дальность действия

$$L = \sqrt[4]{\frac{P_n S \sigma}{(2\pi)^2 \theta^2 N}}, \quad (I.10)$$

где

$$\Pi = \frac{P_n S \sigma}{(2\pi)^2 \theta^2 N}. \quad (I.11)$$

принято называть потенциалом лазерной локационной системы, м²; N — эквивалентная мощность шумов приемного устройства, рассчитываемая с

учетом ослабления принимаемого излучения в оптико-механическом тракте лазерной системы.

В формуле (I.10) не учтены затухание лазерного излучения в атмосфере и деполяризация излучения при отражении от цели. Так как свойства атмосферы не являются характеристикой лазерной системы, их учитывают отдельно от потенциала с помощью коэффициента пропускания атмосферы t на пути лазерного сигнала от системы к цели и обратно.

Деполяризация излучения при отражении от цели никак не сказывается на работе лазерных систем с приемными устройствами на основе фотопетекторов с прямой детектированием сигналов. Но в лазерных доплеровских локационных системах с гетеродинными приемными устройствами, критичными к состоянию поляризации регистрируемого сигнала, полная деполяризация сигнала приводит к преобразованию в выходной электрический сигнал только половины мощности принимаемого излучения.

В ряде случаев деполяризация отраженного излучения либо отсутствует совсем (например, при зеркальном отражении), либо носит частичный характер. Значения степени деполяризации лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм при отражении от объектов естественного происхождения приведены в табл. I.7. Они определялись следующим образом. Сначала устанавливалась горизонтальная поляризация излучения передатчика, горизонтальное направление поляризационной чувствительности гетеродинного приемного канала (поляризация приемника) и измерялось среднее выходное напряжение фотоприемника, которое в дальнейшем принималось за 100%. Затем направления поляризации приемника и передатчика поочередно менялись и регистрировалось среднее напряжение выходного сигнала, которое сравнивалось с напряжением, принятым за 100%. Их отношение в процентах характеризовало степень деполяризации. Эта методика не учитывала различие коэффициентов отражения излучения от целей при разных направлениях поляризации зондирующего излучения, поэтому в результате экспериментов появлялась деполяризация, превышающая 100%.

При отражении лазерного зондирующего излучения от диффузноотражающей цели поле в области приемной апертуры представляет собой суперпозицию большого числа отдельных независимых случайных составляющих, обусловленных действием множества источников вторичных волн, расположенных на поверхности цели. Такое поле в каждой точке приемной апертуры имеет гауссовскую статистику. Для гауссовских случайных полей интенсивность I поля в каждой точке приемной апертуры распределена экспоненциально:

Т а б л и ц а 1.7

Деполаризация лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм, %

Виды поляризации		Цель				
Приемника	Передачика	бетонная стена	опора линии электропередачи	иловая отмель	Деревья	
					апельсиновые	эвкалиптовые
вертикальная	Горизонтальная	20	21	18	0	8
вертикальная	вертикальная	85	120	91	80	90
горизонтальная	вертикальная	20	14	24	0	6

$$P(I) = \frac{1}{2d^2} \exp\left(-\frac{I}{2d^2}\right), \quad (I.12)$$

где d - параметр распределения, а фаза поля распределена равномерно на интервале значений $(0, 2\pi)$.

Отраженное от цели излучение собирается приемным телескопом лазерной системы и направляется на фотодетектор, статистические характеристики амплитуды выходного сигнала которого зависят от его типа. Амплитуда выходного сигнала для гетеродинных приемников пропорциональна амплитуде принимаемого поля, а для приемников прямого детектирования - пропорциональна интенсивности поля. Особенностью гетеродинных приемников является свойство одномоковости. Его сущность заключается в том, что поле, отраженное от диффузно отражающей цели, в плоскости приемной апертуры пространственно когерентно только в пределах некоторой области, характерный размер которой - радиус когерентности отраженного поля - зависит от характерного размера цели и дальности:

$$\rho \sim \frac{\Delta}{r} L, \quad (I.13)$$

где ρ - радиус когерентности отраженного поля, м; r - характерный размер цели, м; L - дальность до цели, м.

Из формулы (I.13) видно, что, чем меньше размер цели, тем больше радиус когерентности отраженного поля в плоскости приемной апертуры. Если размер цели r настолько велик, что в пределах приемной апертуры лазерной системы умещается несколько областей когерентности с размером ρ , то на цели всегда можно выделить одну или несколько областей меньшего размера r' , которые в отдельности создают

поле, пространственно когерентное в пределах приемной апертуры. Другими словами, размер этих областей r' связан с диаметром d приемной апертуры соотношением

$$\rho = d = \frac{\lambda}{r'} L. \quad (I.14)$$

Такая область создает на приемной апертуре поле, называемое мощной приемной апертурой. Свойство одномощности гетеродинного приемника состоит в том, что он принимает излучение только одной мощи поля, т.е. идущие только от какой-либо одной области размером r' на цели. Если размеры цели r меньше r' , то поле, отраженное от всей цели, когерентно в пределах приемной апертуры, и, следовательно, выходной сигнал гетеродинного приемного устройства формируется в результате когерентного сложения отдельных элементарных сигналов с различных участков приемной апертуры. Все эти элементарные сигналы строго коррелированы между собой.

При использовании приемника прямого детектирования его выходной сигнал формируется в результате сложения элементарных составляющих фототока с различных участков чувствительной площадки фотодетектора. Такой сигнал в статистическом смысле можно представить как совокупность m независимых случайных составляющих, соответствующих отдельным областям пространственной когерентности регистрируемого поля на приемной апертуре, число которых

$$m \approx \left(\frac{d}{\rho}\right)^2. \quad (I.15)$$

В этом случае плотность вероятности амплитуды выходного сигнала фотодетектора описывается гамма-распределением:

$$P(a) = \frac{\alpha^{m-1}}{\beta^m (m-1)!} \exp\left(-\frac{a}{\beta}\right); \quad (I.16)$$

где a — амплитуда выходного сигнала; β — параметр распределения.

Так как встречающиеся на практике цели не обеспечивают строго диффузный характер отражения, то отношение среднего квадратичного отклонения амплитуды выходного сигнала гетеродинного приемника σ к ее среднему значению a всегда равно $\sigma = 0,523 a$. Экспериментальные точки на графике, расположенные вблизи зависимости $\sigma = f(a)$, свидетельствуют о близком к диффузному характере отражения излучения от тех целей, для которых проводились эксперименты (рис. I.8).

При наличии на поверхности цели зеркальных участков статистические свойства отраженного излучения меняются, причем плотность вероят-

нести энергию отраженного сигнала зависит от числа зеркальных участков. Так как чаще всего возможна ситуация, при которой в каждый момент времени на поверхности цели имеется только один зеркальный участок, то в отличие от (I.16) плотность вероятности амплитуды отраженного поля в любой точке приемной апертуры будет описываться следующим образом:

$$P(A) = \frac{A}{d^2} \exp\left(-\frac{A^2 + A_3^2}{2d^2}\right) I_0\left(\frac{AA_3}{d^2}\right) \quad (I.17)$$

где A_3 - амплитуда зеркальной компоненты отраженного поля; d - параметр распределения; I - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Форма распределения (I.17) меняется в зависимости от отношения мощности зеркальной компоненты к мощности диффузной компоненты отраженного сигнала, равного

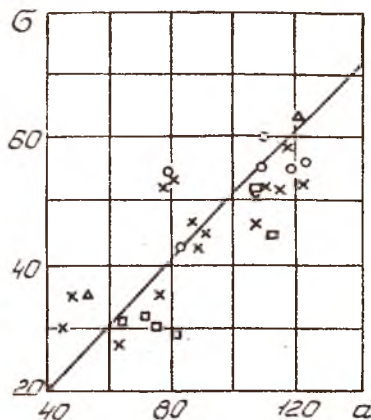
$$q = A_3^2 / 2d^2. \quad (I.18)$$

Обычно цель считается обнаруженной, если отношение вероятности ее правильного обнаружения от вероятности ложной тревоги при заданном отношении сигнал/шум превышает заранее установленное пороговое значение. В соответствии с этим вероятность правильного обнаружения

\mathcal{D} определяется интегрированием плотности вероятности смеси сигнала с шумом в пределах от величины порогового значения амплитуды до бесконечности, а вероятность ложной тревоги F - аналогичным интегрированием плотности вероятности одного только шума в отсутствие сигнала. Вероятности, и каждая в отдельности, зависят от величины порога обнаружения. В случае гауссовских сигнала и шума и при отсутствии других помех характеристики обнаружения имеют вид

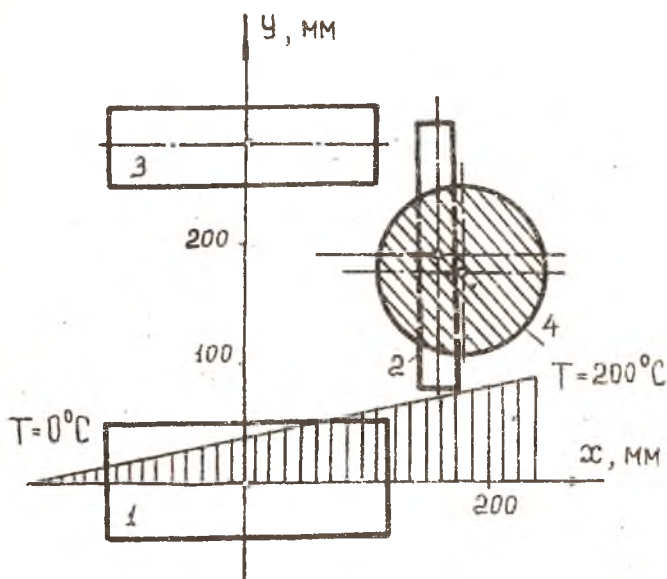
$$\mathcal{D} = F \frac{1}{1+q}, \quad (I.19)$$

где q - отношение сигнал/шум по мощности.



Р и с. I.8. Зависимость среднего квадратичного отклонения амплитуды выходного сигнала B от ее среднему значению

Пример. Определить координаты энергетического центра освещенности изделия*) и эффективную площадь рассеивания. Геометрические размеры, распределение температур по поверхности изделия и материалы внешней компоновки приведены на рис. 1.9.



Р и с. 1.9. Общий вид изделия и распределение температуры вдоль оси X: 1-элемент с покрытием на основе диоксида циркония; 2 - элемент из полированного алюминия; 3 - элемент из стеклотканки; 4 - плоское зеркало

1. Проведем вычисление площади отдельных элементов конструкции изделия:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= 2,3 \cdot 100 \cdot 100 = 23000 \text{ мм}^2; \\
 S_2 &= 0,3 \cdot 100 \cdot 2,2 \cdot 100 = 6600 \text{ мм}^2; \\
 S_3 &= 2,1 \cdot 100 \cdot 0,6 \cdot 100 = 12600 \text{ мм}^2; \\
 S_4 &= \frac{3,14(1,4 \cdot 100)^2}{4} = 15400 \text{ мм}^2.
 \end{aligned}$$

2. Определим величину углов между оптической осью лазерного пучка и нормалью к плоскости отдельного элемента конструкции:

*) Энергетическим центром освещенности изделия является точка, через которую проходит равнодействующая отраженного светового сигнала

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}^2 \alpha_z &= \operatorname{tg}^2 \alpha_x + \operatorname{tg}^2 \alpha_y; \\ \alpha_{z_1} &= \arctg \sqrt{\operatorname{tg}^2 10^\circ + \operatorname{tg}^2 8^\circ} = 12^\circ 42'; \\ \alpha_{z_2} &= \arctg \sqrt{\operatorname{tg}^2 3^\circ + \operatorname{tg}^2 17,6^\circ} = 17^\circ 48'; \\ \alpha_{z_3} &= \arctg \sqrt{\operatorname{tg}^2 5^\circ + \operatorname{tg}^2 16,8^\circ} = 17^\circ 44'; \\ \alpha_{z_4} &= \arctg \sqrt{\operatorname{tg}^2 18^\circ + \operatorname{tg}^2 14,4^\circ} = 22^\circ 30'. \end{aligned}$$

3. Вычислим температуру поверхности каждого элемента конструкции:

$$T_i = \frac{K_i}{l} \cdot 200 + 173, \quad l = 425 \text{ мм};$$

$$T_1 = \frac{175}{425} \cdot 200 + 173 = 255 \text{ К}, \quad T_3 = T_1;$$

$$T_2 = \frac{15}{425} \cdot 200 + 173 = 187 \text{ К};$$

$$T_4 = \frac{355}{425} \cdot 200 + 173 = 340 \text{ К}.$$

4. Установим значение коэффициента отражения каждого элемента конструкции:

$$T_1 = 255 \text{ К}, \quad \alpha_{z_1} = 12^\circ 42', \quad r_1 = 0,002;$$

$$T_2 = 187 \text{ К}, \quad \alpha_{z_2} = 17^\circ 48', \quad r_2 = 0;$$

$$T_3 = 255 \text{ К}, \quad \alpha_{z_3} = 17^\circ 44', \quad r_3 = 0,085;$$

$$T_4 = 340 \text{ К}, \quad \alpha_{z_4} = 22^\circ 30', \quad r_4 = 0.$$

5. Определим величину потока отраженного излучения от каждого элемента конструкции:

$$q_1 = 23000 \cdot 0,002 = 46 \text{ Вт};$$

$$q_2 = q_4 = 0;$$

$$q_3 = 12600 \cdot 0,085 = 1071 \text{ Вт}.$$

6. Вычислим координаты энергетического центра освещенности:

$$x_0 = \frac{\sum x_i q_i}{\sum q_i} = \frac{0 \cdot 46 - 160 \cdot 0 + 0 \cdot 1071 + 180 \cdot 0}{46 + 1071} = 0;$$

$$y_0 = \frac{\sum y_i q_i}{\sum q_i} = \frac{0 \cdot 46 - 190 \cdot 1071 - 280 \cdot 0 - 180 \cdot 0}{1071 + 46} = -182 \text{ мм}.$$

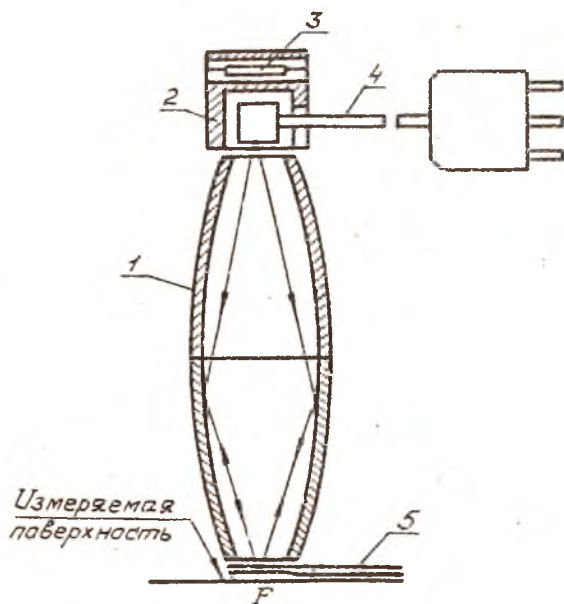
7. Определим эффективную площадь рассеивания

$$P = \sum q_i = 46 + 1071 + 0 + 0 = 1117 \text{ Вт};$$

$$\frac{P}{S} = \frac{III7}{I} = III7 \text{ мм}^2.$$

Для более сложных конфигураций изделия его энергетический центр освещенности определяется приближенными способами с использованием специализированных ЭВМ типа СВИТ-И30Т-1060. Программы для определения энергетического центра освещенности приводятся в приложениях I, 2, 3.

Определение коэффициента излучения поверхностей изделия. Коэффициент излучения поверхностей изделий определяется с помощью терморadiометра ТРМ "И" по отношению к образцам сравнения (рис. I.10). Исследуемые поверхности должны быть непрозрачны в области спектральной чувствительности терморadiометра.



Р и с. I.10. Оптическая схема терморadiометра ТРМ "И": I - эллипсоид вращения; 2 - источник излучения; 3 - резистор; 4 - головка баллометра; 5 - зеркальный модулятор

Его технические данные:

Напряжение в сети переменного тока 220 В
 Область спектральной чувствительности, мкм 4 - 40

Пределы оценки коэффициента излучения.....	0,03 - 0,99
Разброс показаний в диапазоне "0 - I" при повторных измерениях образца при одинаковых условиях, не более - делений	2
Частота модуляции теплового потока, Гц	7 ±1
Избыточная температура в зоне приемника теплового потока - болометра - по отношению к температуре окружающей среды, °C	10 - 15
Потребляемая мощность, Вт, не более	30

Терморациометр состоит из блока измерительной головки (БИГ), куда входит болометр, и блока питания и управления (БПУ).

В основу работы терморациометра положен метод сравнения тепловых потоков, отраженных от зеркальной поверхности модулятора и от исследуемой поверхности объекта.

Величина сигнала ΔU , снимаемого с болометра, пропорциональна разности этих потоков ΔP , которая имеет место из-за поглощения излучения при отражении от исследуемой поверхности и зависит от коэффициента излучения ε этой поверхности.

Следовательно, между коэффициентом излучения исследуемых поверхностей и сигналом, поступающим в измерительную схему терморациометра, существует прямо противоположная зависимость.

Основным элементом оптической схемы терморациометра является эллипсоид вращения, в одной из фокальных плоскостей которого расположена приемная площадка болометра, в другой - исследуемая поверхность объекта.

Источником излучения служит система, состоящая из нагревателя, выполненного в виде модели черного тела, нагреваемого резисторами, и головки болометра, расположенной в полости нагревателя.

Тепловой поток, излучаемый источником, модулируется зеркальным модулятором, расположенным в непосредственной близости от исследуемой поверхности объекта и плоскости входного окна эллипсоида. Модуляция лучистого потока устраняет влияние тепловых помех от различных частей терморациометра.

Отраженный модулированный поток конструируется с помощью эллипсоида на приемной площадке болометра, вызывая периодическое изменение ее сопротивления и тем самым изменяя напряжение на болометре.

Методика измерений следующая:

Установите БИГ на зеркало и ручкой "Компенсация" фона установите по шкале терморациометра отсчет три деления. Затем блок измерительной головки наложите на образец сравнения и ручкой "Калибровка" ус-

тановите отсчет, соответствующий значению коэффициента излучения образца сравнения. Калибровку по зеркалу и образцу сравнения продолжайте до получения вышеуказанных отсчетов с отклонением $\pm 0,5$ деления без установки их ручками "Компенсация фона" и "Калибровка".

После этого наложите БИГ на исследуемый участок поверхности и по шкале терморadiометра определите величину коэффициента излучения.

При значении коэффициента излучения исследуемой поверхности меньше 0,5 для повышения точности измерения рекомендуется проводить на диапазоне 0-0,5.

В процессе каждой серии измерений рекомендуется несколько раз проверять калибровку прибора по зеркалу и образцу сравнения.

Измерения необходимо проводить быстро, так как излучаемый тепловой поток нагревает исследуемый материал, что может привести к неточному результату.

Измерение световых коэффициентов яркости твердых и порошковых материалов. Для измерения световых коэффициентов яркости твердых и порошковых светорассеивающих спектрально-неизбирательных материалов в диапазоне углов падения и отражения $0 - 85^\circ$ и минимальном угле 30° между осветительной и приемной ветвями и для измерения световых коэффициентов пропускания (или оптической плотности) твердых и жидких (нерассеивающих) спектрально-неизбирательных сред применяется фотометр сканирующий СКФ (рис. I.II).

Фотометр может быть использован для качественной или относительной оценки (в условных единицах или приведенных физических величинах с ненормируемой погрешностью) следующих параметров материалов:

блеска светорассеивающих образцов;

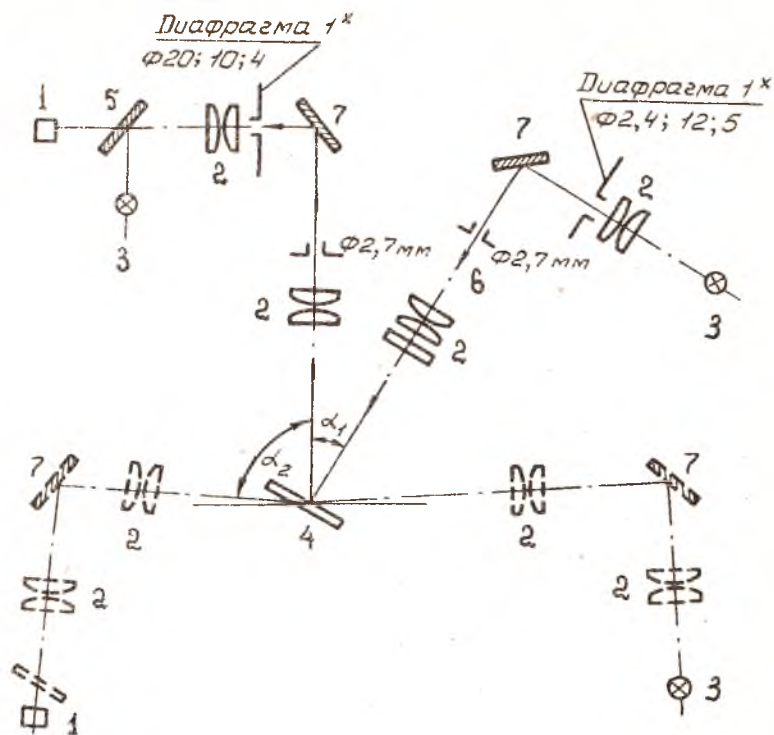
коэффициента отражения и белизны поверхностей, равномерно рассеивающих свет;

коэффициентов пропускания материалов по спектру в спектральных интервалах, выделенных светофильтрами фотометра.

В этом случае фотометр работает как индикатор и может быть использован для наблюдения за изменением величин без оценки с нормированной погрешностью их значений в единицах физических величин.

Фотометр позволяет измерять коэффициенты яркости путем сравнения с образцовой пластинкой коэффициента яркости, аттестуемой в метрологических учреждениях.

Кроме того, фотометр может быть использован в качестве концентрационного колориметра, работающего в узких спектральных областях в диапазоне $400...930 \text{ нм}$ с применением вертикального фотометрирования.



Р и с. I.II. Оптическая схема сканирующего фотометра СКФ:
 1 - фотоприемник; 2 - коллиматор; 3 - источник излучения;
 4 - поворотное зеркало; 5 - светоделитель; 6 - диафрагма;
 7 - зеркало

Для определения концентрации растворов производится предварительная градуировка фотометра по набору стандартных или контрольных растворов.

Его технические данные:

Диапазон измерения коэффициента яркости от 0,05 по 1,00

Диапазон измерения коэффициента пропускания, % 5 - 100

Предел допускаемой основной погрешности фотометра при измерении коэффициента яркости при угле падения света на образец 45° и угле наблюдения 0° , не более 0,01

Предел допускаемой основной приведенной погрешности фотометра при измерении светового коэффициента пропускания, %, не более I

Предел допускаемого значения среднего квадратичного отклонения случайной составляющей погрешности фотометра, характеризующей оценкой среднего квадратичного отклонения результата наблюдения (отдельного измерения) коэффициента пропускания, % (абс), не более 0,2

Спектральный диапазон работы фотометра, нм 400-930

Принцип действия фотометра при измерении коэффициентов пропускания состоит в том, что на фотоприемник направляются поочередно световые потоки, полный и прошедший через исследуемую среду.

Принцип измерения коэффициента яркости состоит в том, что на фотоприемник направляются поочередно световые потоки, отраженные от контрольного и от исследуемого образцов.

Отношение потоков регистрируется на цифровом табло в виде коэффициентов пропускания или яркости.

Для определения абсолютной величины коэффициента яркости (пропускания) исследуемого образца вводится множитель, соответствующий коэффициенту яркости (пропускания) контрольного образца, для этого используются пластины, прикладываемые к прибору.

Оптическая схема состоит из двух основных узлов: осветителя и фотометрического узла. Как осветитель, так и фотометрический узел можно автоматически установить на любой угол α , α_2 (соответственно) от 0° до 85° вокруг точки пересечения оптических осей обоих узлов. Точка пересечения располагается в плоскости измеряемых образцов.

Нить лампы в осветителе изображается конденсором в плоскости апертурной диафрагмы, имеющей диаметр 2,7 мм с увеличением 2^7 . Апертурная диафрагма расположена в фокальной плоскости объектива и обеспечивает создание лучка лучей, освещающих измеряемый образец с расхождением не более 3° .

Расходимость принимаемых в фотометрическую ветвь световых лучей определяется диафрагмой 2,7 мм, расположенной в фокальной плоскости объектива.

Вблизи конденсатора располагается сечение входной диафрагмы.

$\varnothing 24$, 12,5 мм, вводимые в ход лучей конденсатора в зависимости от размера исследуемого участка измеряемой поверхности.

Зеркала в ветви осветителя и в фотометрическом блоке поворачивают оптическую ось с целью уменьшения габаритов фотометра. Для выделения спектральных интервалов в параллельный пучок осветителя устанавливаются сменные светофильтры. Световой поток из осветителя, отраженный от измеряемого образца, направляется в фотометрическую ветвь.

Поле зрения фотометрической ветви определяется сменными диафрагмами $\varnothing 20$, $\varnothing 10$, $\varnothing 4$ мм, расположенными на двойной фокусной расстоянии от объектива. Этот же объектив переносит изображение диафрагмы поля зрения $\varnothing 20$, $\varnothing 10$, $\varnothing 4$ мм в плоскость измеряемых образцов.

Коллективная линза переносит изображение апертурной диафрагмы $\varnothing 2,7$ мм в плоскость фотоприемника.

Измерение коэффициента пропускания проводится следующим образом:

1. Установить угол осветителя 60° . Для этого нажать клавишу "а", затем клавишу "1", нажатием клавиш цифровой клавиатуры набрать значение угла осветителя. Цифры до запятой означают градусы, после запятой — десятые или сотые доли градуса. Аналогично установить угол фотометрического блока — 0° .

2. Установить в опрау осветителя необходимый светофильтр.

3. Установить диафрагмы $\varnothing 12$ мм в осветителе и $\varnothing 10$ мм в фотометрическом блоке.

4. Нажать клавишу "ГРАД". На цифровом табло результатов измерений высвечивается текущее значение напряжения сигнала.

5. Нажать клавишу "Т". На цифровом табло результатов измерений должно высветиться значение "100,0 $\pm 0,2$ ". В противном случае повторить п. 4.

6. На столик установить измеряемый образец. На цифровом табло результатов высветится значение коэффициента пропускания образца в процентах.

При измерении коэффициента яркости и коэффициента отражения следует:

1. Установить необходимые углы наклона осветителя и фотометрического блока.

2. В зависимости от размера измеряемого образца установить диафрагму $\varnothing 24$, 12,5 мм в осветителе и $\varnothing 20$, 10 или 4 мм в фотометрическом блоке. Освещенный участок не должен выходить за пределы образца.

3. Нажать клавишу "И". Наблюдая образец, удостовериться в том,

что при любом выбранном для измерений угле световое пятно из осветителя перекрывает измеряемый участок, а изображение выходной диаграммы фотометрического блока в обратном ходе лучей на измеряемом образце вписывается в размеры светового пятна осветителя. В противном случае переключением диафрагм добиться указанного положения. При измерениях углов более 60° применяются только наименьшие диафрагмы в осветителе и фотометрическом блоке.

4. На прижимной столик установить контрольный образец.

5. Нажать клавишу "ГРАД". На цифровом табло результатов измерений высветится текущее значение напряжения сигнала.

6. Нажать клавишу " $K\beta/\rho$ ". На табло высветится значение 1,000.

7. На прижимной столик установить измеряемый образец. На табло высвечиваются измеряемые коэффициенты яркости " $\rho_{изм}$ ".

При измерении "блеска" почти все светорассеивающие поверхности при направленном освещении обнаруживают так называемый "блеск", который проявляется в том, что яркость поверхности в направлении зеркального отражения бывает в большинстве случаев больше, чем в других направлениях.

Определение величин, характеризующих блеск светорассеивающей поверхности, сводится к измерению коэффициентов яркости поверхности при различных углах наклона оптических осей осветителя и фотометрического блока.

Блеск поверхности характеризуется двумя способами, а именно: выбирается угол " δ " из ряда 20, 45, 60, 75, 85° для обеих ветвей фотометра и измеряется коэффициент яркости в режиме измерения " β/ρ " или определяется график (индикатриса) зависимости параметра " γ ", который рассчитывается от угла " δ " по формуле

$$\gamma = \frac{1}{\cos \delta} \frac{\beta_{\delta_i}}{\beta_{\delta_{0x}}} \quad (I.20)$$

Порядок работы следующий:

Установить угол наклона осветителя 0° .

Установить необходимый угол наклона фотометрического блока.

Провести измерения коэффициента яркости " β_{δ_0} ".

Нажать клавиши " γ ", " δ ", "I".

Угол наклона осветителя по командам микроЭВМ изменяется в пределах от 0 до 85° . На цифровое табло результатов измерений выводится текущее значение " γ ".

1.4. Прохождение лазерного излучения через слои

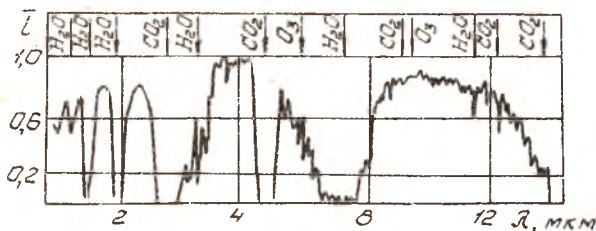
Рассмотрим прохождение излучения через атмосферу. Воздействие атмосферы на распространяющееся лазерное излучение характеризуется тремя основными факторами: ослаблением интенсивности излучения вследствие поглощения и рассеяния, искажением волнового фронта вследствие турбулентности и рефракционным отклонением лазерного луча при большой дальности действия.

При распространении в атмосфере интенсивность лазерного излучения уменьшается по закону Бугера, согласно которому коэффициент пропускания

$$t = \exp(-\gamma L), \quad (1.21)$$

где L — протяженность участка атмосферы, в котором распространяется излучение, м; γ — показатель ослабления, равный сумме показателей рассеяния γ_p и поглощения γ_n , м^{-1} .

Следовательно, коэффициент пропускания атмосферы равен произведению коэффициентов поглощения и рассеяния.



Р и с. 1.12. Поглощение излучения в атмосфере

Поглощение излучения в атмосфере обусловлено в основном молекулами водяного пара, двуокиси углерода и озона (рис. 1.12). Поглощение значительно зависит от длины волны излучения, что обусловлено резонансными процессами. В прозрачной атмосфере поглощение излучения в области длин волн 0,9 мкм (полупроводниковый лазер) определяется молекулами воды ($\lambda = 0,86$ и $0,93$ мкм) и кислорода ($\lambda = 0,8$ мкм), поэтому для распространения лазерного излучения наилучшие условия соответствуют длинам волн 0,83 и 0,92 мкм. В области длин волн вблизи 1 мкм (неодимовый лазер) практически отсутствует заметное резонансное поглощение, что определяет исключительно слабое поглощение чистой атмосферой излучения неодимового лазера, а в области длин волн вблизи

10,6 мкм (CO_2 -лазер) оно обусловлено молекулами CO_2 и H_2O . К сожалению, узкие резонансные линии поглощения двуокисью углерода совпадают с линиями генерации CO_2 -лазера. Увеличить поглощение излучения CO_2 -лазера в атмосфере можно, используя в качестве рабочего вещества лазеров молекулы CO_2 , состоящие из изотопов С и О. В этом случае линии генерации смещаются относительно линий поглощения в атмосфере.

Рассеяние лазерного излучения на частицах, размеры которых соизмеримы с длиной волны, называют релеевским, а на частицах, размеры которых существенно больше длины волны, — Ми-рассеянием.

Показатель ослабления $\gamma_p^{(p)}$, см^{-1} при релеевском рассеянии определяется выражением

$$\gamma_p^{(p)} = 0,827 N S^3 \lambda^{-4} \quad (1.22)$$

где N — концентрация частиц, см^{-3} ; S — площадь поперечного сечения рассеивающих частиц, см^2 ; λ — длина волны излучения, см.

В большинстве случаев релеевское рассеяние во много раз слабее, чем Ми-рассеяние, и им практически можно пренебречь. Показатель ослабления $\gamma_p^{(M)}$, км^{-1} , при Ми-рассеянии определяется эмпирическим соотношением

$$\gamma_p^{(M)} = \frac{3,91}{U} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-0,585 U^{1/3}} \quad (1.23)$$

где U — метеорологическая дальность видимости, км; λ — длина волны, мкм.

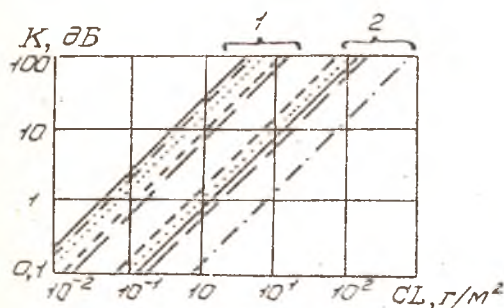
Например, при метеорологической дальности видимости $U = 5$ км показатель ослабления на длине волны 1 мкм при Ми-рассеянии равен $0,43 \text{ км}^{-1}$.

Пропускание чистой атмосферой лазерного излучения значительно зависит от влажности и давления (резко меняется в течение суток), а также от наличия тумана, дождя и других загрязняющих примесей, причем степень влияния этих факторов с учетом вероятности той или иной погодной ситуации различна для разных длин волн (рис. 1.13). Показательно, что несмотря на лучшее пропускание чистой атмосферой излучения с длиной волны 1,06 мкм по сравнению с длиной волны 10,6 мкм, в среднем с учетом возможного выпадения осадков и появления примесей имеет место обратная ситуация.

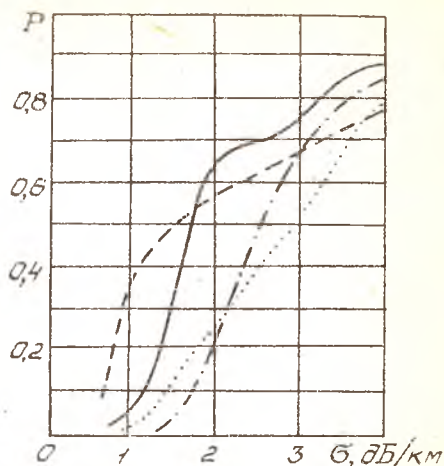
На применение лазерных локационных систем существенно влияет

и наличие в атмосфере аэрозолей и дымовых составов. Физико-химические характеристики некоторых из них приведены в табл. I.8, а зависимость коэффициента ослабления излучения с длиной волны 10,6 мкм от концентрации аэрозолей показана на рис. I.14. Для сравнения на рис. I.14 приведены данные, характеризующие ослабление излучения гелий-неонового лазера с длиной волны 0,63 мкм.

Показатель преломления атмосферы не постоянен, а зависит от давления и температуры. Плавное изменение давления с изменением высоты приводит к астронормической рефракции — преломлению лучей, идущих от источника, находящегося на высоте, к наблюдателю (или в обратную сторону). Так как показатель преломления атмосферы возрастает с приближением к поверхности Земли, лучи в результате рефракции изгибаются



Р и с. I.14. Зависимость ослабления излучения аэрозолями от их концентрации и длины трассы: 1 — $\lambda = 0,63$ мкм, 2 — $\lambda = 1,06$ мкм, — состав FS, — — — — масляный аэрозоль А, — — — — масляный аэрозоль В, — — — — состав RP, — — — — состав HC



Р и с. I.13. Вероятность P появления погодных условий с ослаблением меньше B излучения с длиной волны: — — — — 10,6 мкм зимой; — — — — 10,6 мкм летом; — 1,06 мкм зимой; — · — · — 1,06 мкм летом

выпуклостью к зениту, причем рефракционная ошибка в зависимости от зенитного угла наблюдения может изменяться от нуля (в зените) до нескольких угловых минут.

Случайные локальные неоднородности давления и температуры приводят к зависимости показателя преломления от времени и координат. Эти сравнительно быстро меняющиеся неоднородности, называемые турбулентностью, вызывают случайные изменения влия-

Физико-химические характеристики пылевых составов

Состав	Химическая формула	Диаметр аэрозоля, мкм
WP, PWP, RP	$H_3PO_4 \cdot nH_2O$	1,1
HC (гексахлорэтан, ZnO, Al)	$ZnCl_2 \cdot nH_2O$	1,3
F	$H_2SO_4 \cdot nH_2O$	0,85
C-Г-2(инлеобразное масло)	Масляные аэрозоли	A-0,6 [*] B-3,4 [*]

* Аэрозоль А получается пиротехническим методом, аэрозоль В - испарением.

туды и фазы лазерного излучения, распространяющегося через область турбулентности. Все это в конечном счете приводит к случайным изменениям траектории лазерного луча как целого, к его расширению (размытию) и потере когерентности. Отмеченные факторы, весьма существенные для лазерных систем видимого диапазона, значительно меньше заметны в ближнем и в особенности в среднем инфракрасных диапазонах.

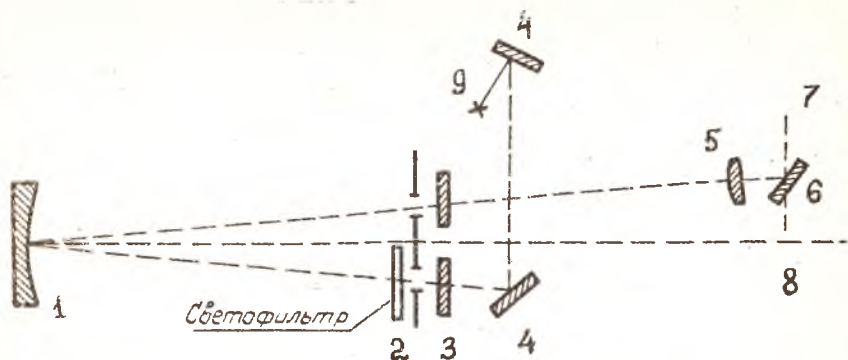
Турбулентность атмосферы обычно характеризуется радиусом пространственной когерентности поля ρ_0 . Потеря пространственной когерентности регистрируемого поля в лазерных системах с прямым фотодетектированием приводит главным образом к ухудшению разрешающей способности, в в лазерных локационных системах с гетеродинным детектированием дополнительно и к ухудшению отношения сигнал/шум в приемном тракте (это ухудшение на длине волны 10,6 мкм мало, так как в среднем $\rho_0 = 0,1 \dots 1,0$ м; для большинства систем диаметр приемной апертуры $d < \rho_0$).

Измерение спектральных коэффициентов пропускания жидких и твердых веществ. Измерение спектральных коэффициентов пропускания жидких и твердых веществ в области спектра от 190 до 1100 нм определяется спектрофотометром СЭ-46, а для области спектра от 190 до 2500 нм - спектрофотометром СЭ-20.

Спектрофотометр СЭ-46 имеет следующие технические характеристики (рис. I.15):

Относительное отверстие монохроматора 1:17

Диспергирующий элемент - волновая дифракционная решетка с переменным шагом и криволинейными штрихами:



Р и с. 1.15. Оптическая схема спектрофотометра СФ-46: 1 - вогнутая дифракционная решетка; 2 - щель; 3 - пластина; 4 - зеркало; 5 - линза; 6 - поворотное зеркало; 7, 8 - фотоэлементы

фокусное расстояние, мм	250
число штрихов на 1 мм	600
рабочий порядок	первый
длина волны максимальной концентрации энергии, нм	320
размер заштрихованной площади, мм	60x50
Обратная линейная дисперсия, нм/мм	3,0
Диапазон измерения спектральных коэффициентов пропускания, %	от 1 до 100
Абсолютная погрешность спектрометра, %	не более 1
Среднее квадратичное отклонение случайной составляющей погрешности спектрометра, %	не более 0,1
Погрешность отчетного устройства установки длины волны, нм	не более 0,5
Среднее квадратичное отклонение случайной составляющей погрешности отчетного устройства установки длины волны, нм	не более 0,25
Уровень мешающего излучения при длине волны 220 нм, %	не более 0,2
Время прогрева спектрофотометра, мин	30
Источник питания - сеть (220 ± 22) В	50 Гц
Потребляемая мощность, Вт	200

В основу работы спектрофотометра положен принцип измерения отношения двух световых потоков: потока, прошедшего через исследуемый образец (или прошедшего через контрольный образец).

Излучение от источника падает на зеркальный конденсатор, который

направляет его на плоское зеркало и дает изображение источника излучения в плоскости линзы, расположенной вблизи входной щели монохроматора.

Прошедшее через входную щель излучение падает на вогнутую дифракционную решетку с переменным шагом и криволинейным штрихом. Решетка изготавливается на сферической поверхности, поэтому, помимо диспергирующих свойств, она обладает свойством фокусировать спектр. Применение переменного шага и криволинейного штриха значительно уменьшает абберационные искажения вогнутой дифракционной решетки и позволяет получить высокое качество спектра во всем рабочем спектральном диапазоне.

Дифрагированный пучок фокусируется в плоскости выходной щели монохроматора, расположенной над входной щелью. Сканирование осуществляется поворотом дифракционной решетки, при этом монохроматическое излучение различных длин волны проходит через выходную щель, линзу, контрольный или измеряемый образец, линзу и с помощью поворотного зеркала попадает на светочувствительный слой (катод) одного из фотоэлементов, электрические сигналы на резисторе R_n , включенном в анодную цепь фотоэлемента, пропорциональны потокам излучения, падающим на фотокатод.

Усилитель постоянного тока с коэффициентом усиления, близким к 1, обеспечивает передачу сигналов на вход микропроцессорной системы МПС. МПС поочередно измеряет и запоминает напряжения U_T , U_0 и U , пропорциональные темповому току фотоэлемента, потоку, прошедшему через контрольный образец, и потоку, прошедшему через исследуемый образец. После измерения МПС рассчитывает коэффициент пропускания исследуемого образца по формуле

$$T = \frac{U - U_T}{U_0 - U_T} \cdot 100$$

Значение измеренной величины высвечивается на цифровом табло.

Для обеспечения работы спектрофотометра в широком диапазоне спектра используются два фотоэлемента и два источника излучения сплошного спектра. Сурьмяно-цезиевый фотоэлемент применяется для измерений в области спектра от 186 до 700 нм, кислородно-цезиевый для измерений в области спектра от 600 до 1100 нм.

Дейтериевая лампа предназначена для работы в области спектра от 190 до 350 нм, лампа накаливания – для работы в области спектра от 340 до 1100 нм.

Порядок работы на спектрофотометре СФ-46 следующий:

1. Установите рукоятку переключения шторки в положение ЗАКР.

2. Нажмите клавишу "Ш (0)", при этом на фотометрическом табло высветится значение сигнала в вольтх, пропорциональное значению темнового тока фотоэлемента.

3. Установите рукояткой "НУЛЬ" на фотометрическом табло числовое значение в диапазоне от 0,05 до 0,1. Показания с табло снимайте, нажимая клавишу "Ш (0)" до появления показания, отличающегося от предыдущего не более чем на 0,001.

4. Установите на пути потока излучения контрольный образец, перемещая каретку. При отсутствии контрольного образца измерение будет проводиться относительно воздуха.

5. Установите рукоятку переключения шторки в положение "ОТКР."

6. Нажмите клавишу "К (1)" и снимите показания с фотометрического табло. Слева на табло высвечивается индекс "I". Оно должно быть в пределах 0,5...5,0. При показании меньше 0,5 следует увеличить ширину щели. При показании больше 5,0 на табло высвечивается индекс "II". В этом случае следует уменьшить ширину щели и нажимать клавишу "К (1)" несколько раз до появления показания, отличающегося от предыдущего не более чем на 0,001.

7. Нажмите клавишу "τ(2)", при этом на табло должно появиться показание $100,0 \pm 0,1$, а слева индекс "Z". Если показание имеет другое значение, необходимо еще раз ввести значение сигнала сравнения, нажав клавишу "К (1)".

8. Нажмите клавишу "Ц/Р", при этом должно наблюдаться свечение индикатора режима "Ц". Нажмите клавишу "τ(2)". Спектрофотометр переходит в циклический режим измерения, производит измерение образца каждые 5 с и высвечивает результат измерения.

9. Установите поочередно на пути потока излучения измеряемые образцы, перемещая каретку, и при появлении показания, отличающегося от предыдущего не более чем на 0,1, снимите показания с табло.

Спектрофотометр СФ-20 имеет следующие технические характеристики (рис. 1.16):

Тип монохроматора — двойной со сложением дисперсии

Относительное отверстие монохроматора 1:8

Фокусное расстояние зеркальных объективов, мм:

предварительного монохроматора 240

основного монохроматора 600

Характеристики дифракционных решеток:

I решетка II решетка

число штрихов на 1 мм

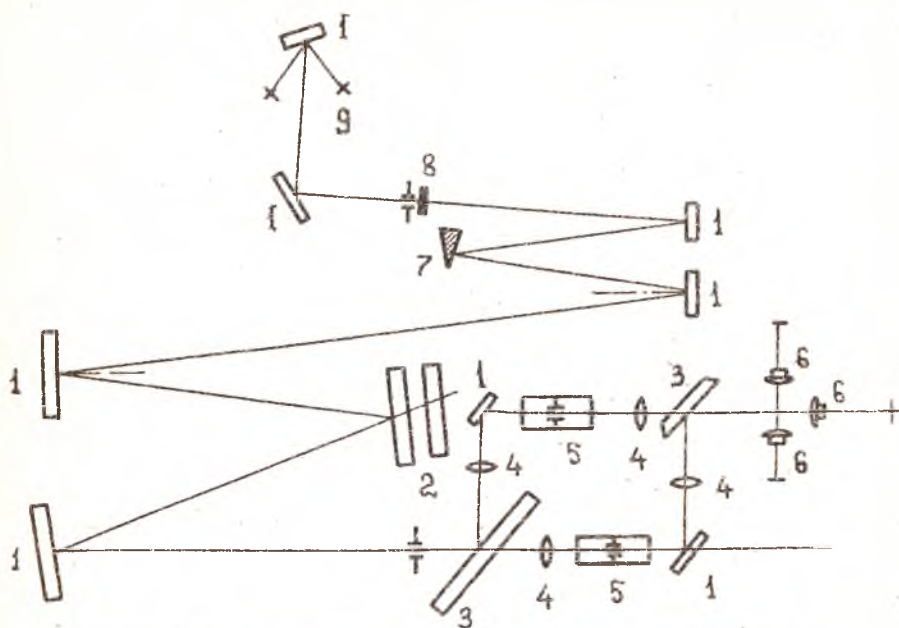
600

600

рабочий порядок

I и II

I



Р и с. 1.16. Оптическая схема спектрофотометра СФ-20: 1 - зеркало; 2 - дифракционная решетка; 3 - зеркальный мюллеровский поляратор; 4 - линза; 5 - двухканальное устройство; 6 - фокусирующие линзы и фотопомножитель; 7 - призма; 8 - цель; 9 - источник излучения

длина волны максимальной концентрации энергии, н.м	400	1300
рабочая область спектра, н.м	100-850	600-2500
Величина обратной линейной дисперсии для длины волны 200 нм, н.м/мм	0,75	
Диапазон показаний шкалы коэффициентов пропускания, %	от 0 до 10 от 0 до 100 от 0 до 110	
Диапазон измерений коэффициентов пропускания, %	от 3 до 100	
Пределы допускаемой абсолютной погрешности спектрофотометра при измерении коэффициентов пропускания, %	±1	
Диапазон показаний шкалы оптических плотностей, В	от 0 до 1 от 1 до 2	

Пределы допускаемой абсолютной погрешности спектрофотометра при измерении оптической плотности:

$$\Delta D = \pm 0,43 \frac{1}{T_d} \quad (1.24)$$

где T_d - действительное значение коэффициента пропускания образцового светофильтра.

Предел допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности спектрофотометра при измерении коэффициентов пропускания, %..... 0,25

Предел допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности при измерении оптической плотности

$$\sigma_p[\Delta] = 0,22 \frac{1}{T_d} \quad (1.25)$$

Предел допускаемой абсолютной погрешности спектрофотометра по шкале длин волн, Н·м:

в диапазоне длин волн от 190 до 340 Н·м $\pm 0,1$

в диапазоне длин волн от 340 до 800 Н·м $\pm 0,2$

в диапазоне длин волн от 800 до 2500 Н·м $\pm 0,4$

Величина смещенного излучения для длины волн

200 Н·м, % не более 0,2

Величина раскрытия щелей, Н·м от 0 до 2,9

Скорости развертки спектра, Н·м/мин 0,5; 2; 8;
32; 128

Скорости прогрева прибора от момента включения до начала работы, мин не более 30

Скорости движения бланка, мм/мин 2; 4; 8;
16; 32

Время прогрева прибора от момента включения до начала работы, мин не более 30

Оптическая схема спектрофотометра - двойной монохроматор. В предварительном монохроматоре диспергирующим элементом служит призма из кварцевого стекла, в основном - две сменные дифракционные решетки 600 штрихов на 1 мм. Предварительный монохроматор предназначен для устранения положения порядков дифракции и уменьшения рассеянного излучения. Монохроматоры построены по схеме Фаста со сферическими зеркальными объективами. Дисперсии монохроматоров складываются.

Свет от источника эллиптическим конденсорным зеркалом и плоским отклоняющим зеркалом направляется через входную щель в предварительный монохроматор. В приборе используются два источника излучения: деутериевая лампа для работы в области спектра от 190 до 340 Н·м и лампа накаливания для работы в области спектра от 340 до 2500

Н·м. В зависимости от используемого источника эллиптический конденсор устанавливается в одно из указанных на схеме положений, направляя на входную щель излучение лампы.

Конденсорное зеркало проектирует источник излучения на входную щель, которая расположена в фокусе объектива. Световое излучение, отражаясь от объектива, параллельным пучком падает на призму, которая разлагает его в спектр.

Монохроматическое излучение, идущее в направлении оптической оси, попадает на второй зеркальный объектив, фокусируется в плоскости средней щели и проходит во второй монохроматор. Отражаясь от зеркального объектива, излучение направленным пучком направляется на дифракционную решетку, дифрагированный пучок, отразившись от второго зеркального объектива, фокусируется в плоскости выходной щели. На выходную щель попадает излучение той длины волны, которая дифрагирует в направлении оптической оси. За выходной щелью расположен модулятор, прерывающий световой поток с частотой 500 Гц.

Для обеспечения оптимальных энергетических условий в спектрофотометре применяются две сменные решетки, одна из которых с максимумом концентрации энергии для $\lambda \sim 40$ Н·м в первом порядке — работает во втором порядке в области спектра от 190 до 340 Н·м и в первом порядке в области спектра от 340 до 850 Н·м, другая — с максимумом концентрации энергии для длины волны ~ 1300 Н·м — работает в первом порядке в области спектра от 800 до 2500 Н·м.

За монохроматором расположено двухканальное устройство, состоящее из двух зеркальных модуляторов, отклоняющих зеркал линз.

Зеркальные модуляторы направляют пучок с частотой 12,5 Гц в канал сравнения или в канал с исследуемым образцом и на приемник дробной энергии, соответствующий рабочей области спектра; линзы и объектив проектируют зрачок системы в плоскость, а линзы собирают свет на приемник.

На приемник излучение направляется модуляторами попеременно из обоих каналов.

В приборе применяются два сменных приемника: фотоэлектронный умножитель с кварцевым окном и мультищелочным фотокатодом для работы в области спектра от 190 до 800 Н·м и фотосопротивление 20 для работы в области спектра от 800 до 2500 Н·м.

Зеркало устанавливается в различные положения в зависимости от области работы и направляет излучение на работающий в данной области приемник.

В основу работы спектрометра СТ-20 положен принцип измерения от-

ношения двух световых пучков, светового потока, прошедшего через исследуемый образец, к световому потоку, прошедшему через образец сравнения.

Монохроматор разделяет световое излучение источника в спектр.

Монохроматическое излучение с выходной щели монохроматора попадает на зеркальное светоделительное устройство киветного отделения, которое попеременно направляет световой пучок по двум каналам, в одном из каналов помещается исследуемый образец, другой является каналом сравнения.

На выходе киветного отделения световые пучки из обоих каналов попеременно попадают на чувствительную площадку фотоэлектрического приемника.

Напряжение с приемника усиливается, преобразуется и поступает на устройство, выражающее отношение двух напряжений.

При работе по двулучевой схеме на бланке записывается величина коэффициента пропускания измеряемого объекта в процентах или его оптическая плотность.

Однолучевая схема дает возможность производить исследования энергетических характеристик источников излучения. При этом сигнал на выходе значительно изменяется в результате наличия полос поглощения в атмосфере, различного пропускания монохроматора в разных областях спектра, энергетических параметров дифракционной решетки, сигнал зависит также от ширины щели и спектральной чувствительности излучения.

Последовательность операций при измерении по двулучевой схеме:

1. Установите бланк на барабане.
2. Включите тумблер "СЕТЬ".
3. Установите рукоятку в положение "Т" или "Д".
4. Включите необходимый источник излучения, прогрейте прибор.
5. Установите переключатели скоростей в положение "ВЫК.".
6. Установите рукоятки в положения, соответствующие выбранному рабочему поддиапазону спектра.
7. Установите исходную длину волны.
8. Установите положение "МНОГОКРАТНО" в случае многократной записи участка спектра, а рукояткой в положение, соответствующее выбранному поддиапазону спектра.
9. Установите постоянную времени.
10. Установите необходимую ширину щели подбором чувствительности и напряжение на фотоумножителе.
11. Включите запись.

12. Перекройте пучок в канале образца штормой.
13. Откройте штормку.
14. Отрегулируйте положение пера, приведя его на деление "100".
15. Установите рукоятку в положение требуемой измерительной шкалы.

16. Установите испытуемый образец в направляющее, соответствующее цифровое "2" на корпусе кюветного отделения.

17. Установите переключатели скоростей развертки спектра и движения бумаги в требуемые положения.

18. Установите тумблер в положение "РЕШЕР" в случае необходимости отметки по шкале для волн.

19. Нажмите кнопку "ВПЕРЕД".

Последовательность операций при измерении по однолучевой схеме:

1. Установите бланк на барабан.
2. Включите тумблер "СЕТЬ".
3. Установите рукоятку в положение "Э".
4. Включите исследуемый источник света.
5. Прогрейте прибор.
6. Установите переключатели скоростей в положение "ВЫКЛ.".
7. Установите рукоятки в положения, соответствующие выбранному рабочему поддиапазону спектра.

8. Установите переключатели скоростей развертки спектра и движения бумаги в требуемые положения.

9. Установите переключатели скоростей развертки спектра и движения бумаги в требуемые положения.

10. Установите постоянную времени.

11. Включите запись.

12. Установите ширину целей, чувствительность и напряжение питания фотомножителя, чтобы перо не выходило за пределы шкалы по всему рабочему участку спектра.

13. Нажмите кнопку "ВПЕРЕД".

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

Большие объемы измерений и монтажных работ, выполняемые в производстве двигателей и летательных аппаратов, многообразие этих работ, а также большое число типов изделий, которые различны по своему функциональному назначению и техническим характеристикам, требуют создания разных моделей лазерных технологических систем.

Наименьшие погрешности измерений обеспечиваются использованием когерентных свойств лазерного излучения. Когерентность света прояв-

ляется в явлениях интерференции и дифракции. Дифракционные элементы в виде щелей, решеток, голограмм используются для формирования реперных распределений светового поля при прецизионных измерениях прямолинейности и соосности. Дифракционная оптика конкурирует с традиционными оптическими элементами: светоделителями, призмами, клиньями и т.п., создавая распределения, которые не реализуются последними.

Интерферометры, как правило, с фотоэлектрическим отсчетом, применяются в датчиках линейных и угловых перемещений. Их разрешение составляет доли длины волны используемого излучения. Основной их недостаток при измерениях геометрической стабильности заключается в необходимости установки по одному датчику на каждую степень свободы в контролируемой точке изделия. При параллельном измерении в N точках количество датчиков увеличивается в N раз. Другое применение интерферометры и микроинтерферометры находят при оценке качества обработки и формы поверхности высоких классов чистоты.

Мощным инструментарием в экспериментальных исследованиях деформаций является голографическая интерферометрия. Используемые в настоящее время фототермопластические реверсивные регистрирующие среды, не требующие длительных процедур проявления, промывки и фиксации фотопластинок, повысили оперативность метода и позволили внедрить голографию в такую машиностроительную отрасль, как двигателестроение. Вместе с тем накладываемые ограничения по виброзащите как регистрирующей аппаратуры, так и самого объекта измерения, требование к высокой пространственной разрешающей способности регистрирующей среды и когерентным источникам света большой мощности при освещении крупногабаритных изделий снижают экономическую эффективность метода и сужают области ее применения в производстве. Меньшие мощности осветителей требуются при регистрации голографических интерферограмм сфокусированных изображений. Кроме того, в голографической интерферометрии часто возникают трудности в идентификации интерференционных полос, когда деформации велики либо резко пространственно неоднородны; также сложно варьировать чувствительностью метода.

От многих отмеченных недостатков, присущих голографической интерферометрии, свободны методики спекл-интерферометрии, особенно в применении к крупногабаритным изделиям, когда взаимные смещения их крайних точек могут составлять десятки длин волн. Здесь меньшая чувствительность спекл-интерферометрии по сравнению с голографической выступает уже как положительный фактор, так как вместе с чувствительностью снижаются требования к виброзащите, пространственной разрешающей способности, что позволяет в ряде случаев вообще отказаться

от промежуточных носителей изображения и непосредственно формировать интерференционные картины спеклов на фоточувствительном слое ПЭС-матрицы либо мишени видикона с последующим вводом в ЭВМ.

Это связано с тем, что в методах спекл-интерферометрии требуется обеспечить лишь разрешение спекл-структуры, а не тонкой структуры полос, возникающей в результате интерференции предметной и опорной волн и регистрируемой голограммой. Типичные минимальные размеры спеклов лежат в пределах 5...100 мкм, и, следовательно, регистрировать спекл-структуру можно стандартной телекамерой. Таким образом, для сохранения и последующей обработки спекл-корреляционных полос наряду с фотографией в равной мере используется и видеозапись. Этот метод называют электронной спекл-интерферометрией (ЭСИ). Важная отличительная особенность метода ЭСИ состоит в том, что он позволяет выводить динамическую картину корреляционных полос прямо на экран дисплея. Относительная простота позволяет применить метод ЭСИ к решению существенно более сложной задачи, связанных с определением форм поверхности и анализом деформаций.

Процедура определения корреляции интенсивностей в ЭСИ осуществляется с помощью сложения или вычитания видеосигналов. Вычитание сигналов производится следующим образом. С помощью телекамеры получают видеосигнал, соответствующий спекл-структуре объекта в плоскости изображения. Этот сигнал поступает в электронное запоминающее устройство. Затем объект, например, смещается или деформируется, и полученный таким же образом, как и для несмещенного объекта, видеосигнал вычитается из сигнала, записанного в памяти. (Отметим, что все это время телекамера должна оставаться в одном и том же положении). Затем сигнал на выходе отфильтровывается с помощью широкополосного фильтра и выпрямляется. Полученный сигнал поступает на дисплей. Таким образом, корреляционные полосы формируются за промежуток времени, равный длительности двух кадров, т.е., с точки зрения пользователя, в реальном временном масштабе. Обработка видеосигналов в методе сложения производится аналогично.

Использование интерференционных явлений в измерительных системах промышленного назначения сдерживается рядом факторов:

методы не ГОСТированы;

опыты их применения в промышленности ограничены небольшим числом исследовательских работ;

часто требуется калибровка в процессе измерения;

анализ интерференционных картин представляет самостоятельную сложную задачу.

Вследствие вышеперечисленных причин проектировщику необходимо будет решать наряду с техническими и аттестационные задачи.

Триангуляционные бесконтактные оптические методы измерений имеют уже многовековую историю. Лазеры позволили сделать визуально ощутимыми прямые и плоскости в пространстве, автоматизировать процессы обработки триангуляционной информации. Здесь используются такие проявления когерентности лазерного излучения, как узкие диаграмма направленности и спектральная ширина линии.

Деформации конструкций летательных аппаратов и вызываемая ими разъюстировка приборов штатно контролируются с помощью автоколлимационных теодолитов. Используемые при этом автоколлимационные теодолиты типа ТБ2А, ТБ3, ТБВ не могут обеспечить среднеквадратичную ошибку измерения углов из одного приема менее 2 угл.с, что в настоящее время не всегда является допустимым значением. Визуальные автоколлиматоры и теодолиты достигают разрешения 0,2...0,5 угл.с лишь при марках специального вида, например бисекторных (рис. 2.1). Это объясняется высокой чувствительностью глаза к сравнению углов прихода двух волновых фронтов при поперечной наводке (~ 10 угл.с), что обусловлено геометрической структурой расположения светочувствительных элементов сетчатки. Разрешающая способность глаза к двум точечным источникам в 5...10 раз хуже.



Р и с. 2.1. Характерные виды поля изображения при совмещении: а - двух тонких штрихов (погрешность визуального совмещения $\varphi = 10...15$ угл.с); б - штриха и бисектора ($\varphi = 6...8$ угл.с); в - штриха и щели ($\varphi = 6...8$ угл.с); г - тонкого штриха или перекрытия с краем толстого штриха ($\varphi = 30...60$ угл.с); д - тонкого штриха или перекрытия с краем темного поля ($\varphi = 30...60$ угл.с). Случай (б) и (д) относятся к бисекторной установке

Переход от визуальных к объективным методам регистрации и вычисления количественных характеристик изображения вносит ряд позитивных моментов в штатную процедуру измерения:

практическое полное исключение субъективных ошибок наведения, вызванных, например, утомлением оператора при длительных испытаниях;

время получения первичной информации о распределении освещенности в изображении не более времени одного кадра в телевизионном стандарте, т.е. 40 мс, что по крайней мере на два порядка быстрее, чем при визуальных наблюдениях;

возможность использования пучков с произвольным распределением плотности мощности по поперечному сечению, а не по специфическим маркам, применение которых не всегда допустимо;

для малых отклонений, не выводящих пучок из поля зрения прибора, отсутствует механическое перемещение оптической оси фотоприемной части, в то время как совмещение автоколлимационных меток либо перекрестия трубы теодолита с бисекторной маркой достигается с помощью механических подвижек.

Информативной характеристикой изображения, с помощью которой оценивается пространственное положение пучков и их смещения, удобно выбрать координаты энергетического центра освещенности. Точность наведения на энергетический центр современных фотоэлектронных микроскопов составляет 0,01 мкм. При релеевском разрешении координат энергетического центра ($\lambda/2 \sim 0,5$ мкм в видимом диапазоне) с объективом, имеющим фокусное расстояние $F = 1$ м, получаем угловое разрешение $\lambda/2F = 0,1$ угл.с, т.е. по крайней мере в два раза выше, чем в лучших визуальных измерениях.

К лазерным технологическим системам относятся и дальномеры, как импульсные, так и фазовые. Оптические излучатели и фотоприемники схожи с аналогичными системами лазерных локаторов, проектирование которых рассмотрено в гл. 4. Отличие состоит в том, что в лазерных локаторах приходится обрабатывать сигналы с большим разбросом интенсивностей в различной помеховой обстановке. В дальномерах используются световозвращатели, т.е. сигналы, поступающие на фотоприемник, имеют нормированную амплитуду и в заданное число раз превышают шум. Специфика обработки сигналов дальномеров сосредоточена в их электронной части.

Лазерные технологические системы можно классифицировать по виду опорной базы: с опорной линией (параллельным пучком), опорной плоскостью и комбинированными опорными плоскостями, сочетающими, например, веерообразную вертикальную и круговую горизонтальную. Ниже приведены принципы функционирования, конструктивное исполнение и характеристики серийных лазерных технологических систем, которые могут служить ориентирами при проектировании, а также примеры оригинальных разработок.

2.1. Системы с опорной линией

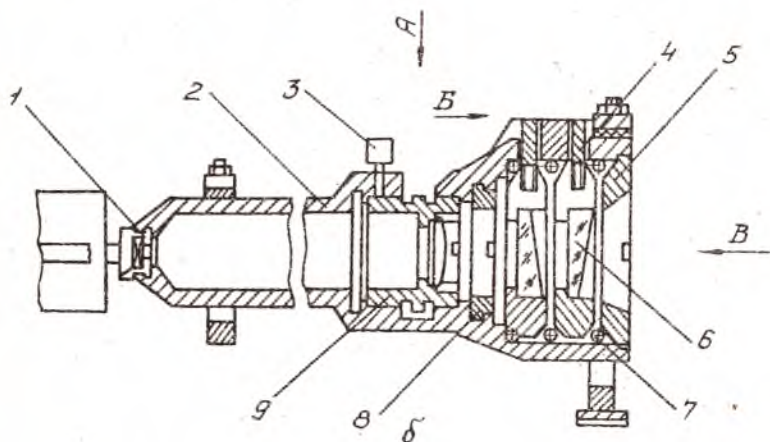
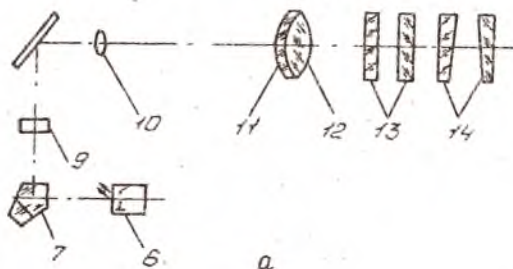
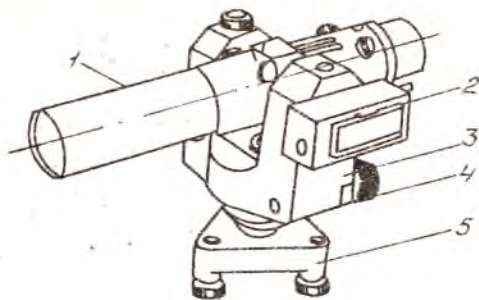
Лазерные системы с опорной линией получили наибольшее распространение. Они имеют несложную конструкцию, просты в обращении и ремонте, относительно недороги. Их применяют для задания направления и контроля линейных объектов: трубопроводов, туннелей и др. Системы, как правило, состоят из лазерного задатчика, формирующего параллельный пучок излучения, мишеней (марок), а также набора различных приспособлений для крепления задатчика и мишеней.

Среди отечественных систем этого класса известны лазерный визир ЛВ-5 и лазерные указатели направления ЛУН-3, ЛУН-9Э, УНЛЗ-У5.

Визир ЛВ-5 (рис. 2.2,а) представляет собой малогабаритный переносной прибор на основе излучателя гелий-неонового лазера ОКГ-13. По конструкции визир напоминает теодолит. Излучатель вместе с оптической системой располагается в цилиндрическом корпусе на специальной подставке. Имеется цилиндрический уровень с точностью отсчета 20" для контроля точной установки пучка в горизонтальной плоскости и круглый уровень для грубой установки. Изменение углов наклона пучка в вертикальной плоскости и наведение его по азимуту осуществляются микрометрическими винтами. Для формирования пучка с малым углом расходимости (20 угл.с) встроена телескопическая система (увеличение в 25 раз), позволяющая фокусировать пучок на расстояниях от 2 м до бесконечности. Диаметр пучка на расстоянии 200 м составляет 20 мм, 500 м - 50 мм, 2000 м - 200 мм. В комплект поставки входит блок питания, позволяющий работать как от сети переменного тока 220 В, так и автономного питания (аккумулятора 12 В). Техническая характеристика системы ЛВ-5 приведена в табл. 2.1.

Лазерный указатель направления ЛУН-3 выполнен во взрывобезопасном и герметичном исполнении. Состоит из задатчика опорной линии (светопроектор), включающего электрооптический блок, коллимирующую систему и триггерную подставку, источника питания. В корпусе электрооптического блока расположен излучатель с блоком питания, узел переключателя, программное устройство, пентапризма, камера ввода и вольтметр. Снаружи корпуса на крышке расположены цилиндрические уровни. Напряжение питания подается кабелем через втулку камеры ввода и клеммы.

В оптической системе ЛУН-3 (рис. 2.2,а) пучок лазера отклоняется на 90° пентапризмой и через защитное стекло и светоповоротное зеркало направляется на коллимирующую систему, выполненную в отдельном корпусе. Коллимирующая система состоит из входной и выходной (скле-



Р и с. 2.2. Лазерный визир ЛВ-5, оптическая система лазерного указателя направления ЛУН-3 (а) и конструкция объектива (б):
 1 - цилиндрический корпус; 2 - корпус цилиндрического уровня; 3 - подготовка; 4 - микрометрический винт; 5 - триггерное основание; 6 - излучатель; 7 - пентапризма; 8 - защитное стекло; 9 - светоповоротное зеркало; 10 - входная линза; 11, 12 - склеенная линза; 13, 14 - потищеские клинья;
 1 - коллиматор; 2 - корпус; 3 - винт; 4 - зубчатое колесо; 5 - шайба; 6 - оптический клин; 7 - кольцо; 8 - прокладка; 9 - втулка

Т а б л и ц а 2.1

Технические характеристики лазерных систем с опорной линией

Параметры	ЛВ-5	ЛНН-3	УНЛВ-У5	СЛ-3ВМ	1055XL	833	955SL
Мощность излучения лазера, мВт	1	2	2	1	2	2	1
Мощность, потребляемая лазерным затвором, Вт	50	35	30	-	30	30	40
Дальность действия, м	200	1000	-	200	300	700	300
Точность задания направления, %	-	-	-	-	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$
Диапазон задания углов, %	± 5	-	-	± 20	$-10...+30$	-	$-10...+20$
Диаметр пучка (мм) на расстоянии:							
до 100 м	20	-	20	15	-	10	-
300 м	30	30	-	-	-	25,4	-
Напряжение питания, В	12,6; 200	127	12,6; 36; 127; 220	12,6; 127; 220	12,6	12,6	12,6
Масса лазерного затворка, кг	5,8	42	5,5	-	-	7,5	-
Диапазон рабочих температур, °С	$-30...+40$	-	$-20...+40$	5...40	$-20...+50$	-	-

Параметры	HL-840	VarL Line 108	SL-5	LA12700	4700	LS-35	LS-5	LS-7	LS-80
Мощность излучения лазера, мВт	1	2	1,5	3	3	6	1,5	1,5	1,5
Мощность, потребляемая лазерным задатчиком, Вт	30	18	24	30	17	28	28	28	28
Дальность действия, м	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Точность задания направления, %	±0,01	±0,01	±0,005	-	±0,001	0,01	0,01	0,01	0,01
Диапазон задания уклонов, %	-10...20	±15	-10...+20	-	+35...-15	+25...-30	+25...-30	±10	±20
Диаметр пучка (мм) на расстоянии:									
до 100 м	13	10	10	9,5	-	16	16	16	16
300 м	-	30	-	-	-	-	-	-	-
Напряжение питания, В	12,6	12,6	12,6	12,6	10,5...15	12,6; 220	12,6; 220	12,6; 220	12,6; 220
Масса лазерного задатчика, кг	6,2	-	8	-	4	7,4	7,2	-	6,8
Диапазон рабочих температур, °С	-20...+50	-	-	-	-38...+32	-15...+15	-15...+15	-15...+15	-15...+45

енных) линз. Перемещением выходной линзы фокусируется пучок на объекте. Клинья предназначены для корректировки положения лазерного пучка в горизонтальной плоскости и задания требуемого угла его наклона. Контроль угла осуществляется по шкале микрометрического винта. Точность его невелика и диапазон задания составляет несколько десятков угловых минут. Задатчик может работать в двух режимах: длительность излучения 2,5 мин, пауза 12,5 мин и соответственно 5 и 25 мин. Эти режимы обеспечиваются программным устройством. Техническая характеристика системы ЛУН-3 дана в табл. 2.1. В усовершенствованной системе ЛУН-9э значительно уменьшена масса задатчика (в три раза), применена компактная электронная схема питания, предусмотрена возможность отклонения пучка на угол от -65 до $+90^{\circ}$, в три раза снижена потребляемая мощность, расширен диапазон рабочих температур — от -40 до $+40^{\circ}\text{C}$.

Лазерный указатель направления УНЛЗ-У5 (табл. 2.1) предназначен для задания опорного направления и визуального контроля положения различных механизмов и машин. Модуль состоит из лазера и печатной платы с радиоэлектронными элементами. На крышке модуля размещены цилиндрический уровень, закрытый планкой с прорезью, и прицельное приспособление. Оптическая система включает излучатель лазера ЛГ-78, оптические клинья. Одна из линз объектива позволяет фокусировать лазерный луч от 10 м до ∞ . Сетевой источник питания лазерного модуля преобразует напряжение 36, 127, 220 В в постоянное напряжение 12 В.

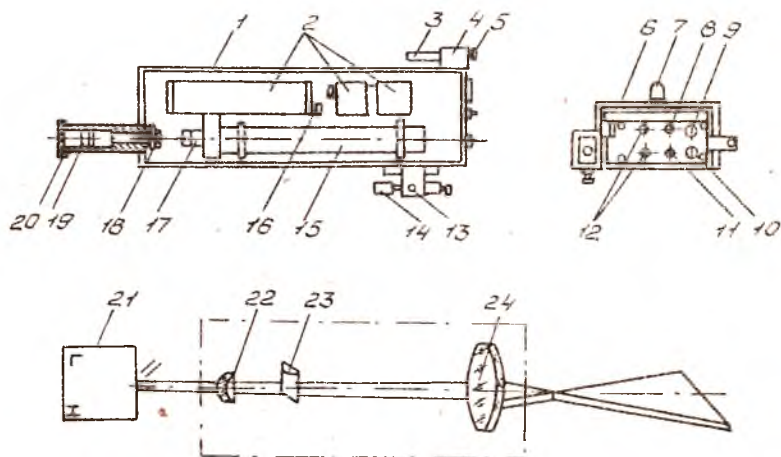
Среди зарубежных систем с опорной линией известны системы G-L-3 BM, фирмы Labimex (Польша); LF-1, фирмы Carl Zeiss (ГДР); серия систем Dialgrade: модели 833, 855, 955 SL, 1050, 1050T, 1055 SL; 1055 XL, фирмы Spectra-Physics (США); система Vari-Line 108, фирмы Vari.Tech.Co (США); системы А1 2700, 4700, фирмы Laser Alignment (США); серия систем фирмы Visomat (Швеция); LS-3S и LS-5, LS-65S и LS-7S, LS-80 и LS-7; системы S-352 и SL-5 фирмы AGL Corporation (США). Технические характеристики систем приведены в табл. 2.1. Некоторые задатчики герметизируются и заполняются избыточным давлением азота с целью предотвращения попадания загрязнений, увеличения срока службы, сохранения высокой точности, а также для работы в технологических средах, например, в воде.

Среди лазерных систем с опорной линией система 4700 фирмы Laser Alignment занимает особое место по своим техническим характеристикам. Она имеет небольшие габариты и массу (4 кг), экономична и потребляет небольшую электрическую мощность (≤ 17 Вт) при выходной мощности излучения лазера 3 мВт, обладает высокой точностью задания уклона ($\pm 0,0016$), большим диапазоном задания уклонов ($-15...+35\%$).

Конструктивно система 4700 представляет собой цилиндр, на торцах которого имеются два бампера из ударопрочной пластмассы; на одном (со стороны выхода пучка излучения) находится ручка для переноса и грубого задания направления, на другом – расположена лицевая панель управления режимами работы.

2.2. Системы с опорной плоскостью

Лазерные системы с опорной плоскостью разделяют на два типа: веерообразные и круговые. Наиболее характерными моделями систем с веерообразной опорной плоскостью (табл. 2.2) являются отечественные УКЛ-1, УКЛ-1М и зарубежные LG -66I фирмы Siemens (ФРГ), Т-3, Т-4 фирмы Spectra Physics (США) и модель 4005 фирмы Laser Alignment (США). Они предназначены в основном для автоматического или ручного управления высотным положением измерительного органа при монтаже и строительстве линейных объектов.



Р и с. 2.3. Головка задатчика УКЛ-1 (а) и его оптическая схема (б): 1 – корпус (вид сверху при снятой крышке); 2 – печатные платы; 3 – уровень; 4 – механизм отсчета; 5 – ручка механизма отсчета; 6 – ручка для переноса; 7 – кожух; 8 – тумблер; 9 – держатель предохранителя; 10 – штекерное гнездо; 11 – клемма “Земля”; 12 – светодиод; 13 – зрительная труба; 14 – крышка; 15 – излучатель газового лазера; 16 – транзистор; 17 – окуляр; 18 – цилиндрическая линза; 19 – объектив; 20 – крышка; 21 – лазер; 22 – окуляр; 23 – цилиндрическая линза; 24 – объектив

Технические характеристики лазерных систем с веерообразной опорной плоскостью

Параметры	УКЛ-1	УКЛ-1М	LG-664	LT-3	LT-4
Мощность излучения лазера, мВт	4	2	3	5	5
Мощность, потребляемая лазерным запяточком, Вт	15	18	80	36	36
Дальность действия, м	500	400	400	1600	1600
Поперечность установки лазерного излучения, угл.с	± 30	± 30	-	± 20	± 20
Диапазон зацаня углона, %	0...2	0...5	± 5	± 10	± 30
Размер зоны чувствительности, мм	25...50	20...40	20...40	-	-
Угол развертки опорной плоскости, град	1,5	1,5	17,5	10	15
Напряжение питания, В	11...12,6	11...12,6	12,6; 24	12,6; 110 \pm 10	11...15; 110 \pm 20
Масса лазерного запяточка, кг	9,5	8,8	9	9,08	6
Масса ГФЧ, кг	1,0	1,0	-	-	-
Масса ББК, кг	8,2	5,3	-	-	-
Масса штатива, кг	8,3	7,8	-	-	-
Диапазон рабочих температур, °С	-10...+40	-15...+50	-30...+40	-20...+60	-29...+60

Система УКЛ-1 состоит из лазерного светоизлучателя (передатчика) (рис. 2.3) и фотоприемного устройства. Светоизлучатель включает датчик уклона, штатив и аккумуляторную батарею. В состав фотоприемного устройства входит фоточувствительная головка (ГФЧ) и блок обработки команд (ББК). В комплект системы также входит фоторейка. Светоизлучатель формирует в пространстве веерообразный пучок, который устанавливается под заданным углом относительно горизонтальной плоскости. При попадании лазерного излучения на ГФЧ последняя преобразует световые сигналы в электрические. ББК усиливает электрические сигналы и формирует команды управления различными функциональными устройствами.

Датчик уклона содержит две основные части - оптическую и электрическую. Лазерный пучок от излучателя лазера ИЛН-203 проходит через коллиматор, состоящий из трех элементов: окуляра, цилиндрической линзы и объектива. Коллиматор уменьшает расходимость пучка излучения по вертикали до 20 угл.с и увеличивает по горизонтали до $1,5^{\circ}$, формируя веерообразную опорную плоскость, которая обеспечивает необходимую зону управления ($> 1,5$ м на 100 м). Электрическая часть датчика уклона обеспечивает преобразование напряжения аккумуляторной батареи в напряжение, необходимое для питания излучателя. Задающий генератор вырабатывает импульсы, частота которых регулируется в пределах 70...100 Гц. Длущий мультивибратор запускается задним фронтом импульсов генератора и формирует импульсы с регулируемой длительностью в пределах 1...2 мс. Регулировка частоты задающего генератора и длительности импульсов мультивибратора необходима для выбора оптимального (с точки зрения устойчивости и экономичности) импульсного режима работы излучателя.

Конструктивно датчик уклона состоит из головки и механизма наведения. Головка представляет собой вытянутую вдоль горизонтальной оси конструкцию, оканчивающуюся конусом, в котором закреплена выходная линза (объектив) оптической системы. К боковым сторонам головки крепятся механизм отсчета и зрительная труба, оптическая ось которой параллельна геометрической оси веерообразного излучения. Зрительная труба существенно облегчает оператору работу по наведению излучения на ГФЧ и позволяет в процессе управления контролировать положение ГФЧ относительно пучка. Трубу можно использовать также для нивелировки. В корпусе головки расположены излучатель и оптическая система.

Угловое положение лазерного пучка задают с помощью ручки механизма отсчета и винта задания уклона механизма наведения. Механизм отсчета состоит из трехразрядного счетчика и цилиндрического уровня. Головку светоизлучателя крепят с помощью винтов на подставке механиз-

ма наведения. Задатчик уклона наводит по азимуту с помощью рукоятки плавного поворота. За счет выдвижения стоек высота штатива регулируется от 0,7 до 1,4 м. Плавная регулировка высоты штатива в диапазоне 400 мм обеспечивается перемещением рейки при помощи редуктора и рукоятки маховика.

Принцип работы фотоприемного устройства заключается в следующем. После включения генератор одиночных импульсов формирует импульс напряжения, который через элементы каналов "Вверх" и "Вниз" устанавливает триггеры блоков памяти этих каналов в положение "0". При этом ключи блоков управления закрыты, а электромагниты управляющих систем находятся в отключенном состоянии. При попадании лазерного излучения на средний фотодиод на выходе усилителя появляется сигнал, который подается на интегратор. Уровень постоянного напряжения на выходе интегратора зависит от амплитуды и количества лазерных импульсов, попадающих на фотодиод.

В некоторых случаях решения задач авиастроения для контроля геометрии рабочих поверхностей крупногабаритных объектов, а также при юстировке оптических систем требуются высокоточные лазерные системы формирования реперных осей и плоскостей. Данные системы от описанных выше отличает введение временной стабилизации диаграммы направленности излучения в пространстве. Рассмотрим одну из подобных систем.

Системы с круговой опорной плоскостью можно разделить на два класса: системы с пассивной и активной стабилизацией опорной плоскости (см. табл. 2.2). К первым относятся отечественные системы СКП-1, Горизонт, САУЛ-1, УКЛ-3 и зарубежные AI 2800, AI 2900, фирмы Laser Alignment и 842 Potolite, фирмы Spectra Physics. Ко второму классу относятся системы УКЛ-4, модели 942, 944, 945, 946, 1045 фирмы Spectra Physics и 2800, 3000, 5000, фирмы Laser Alignment.

В системах с пассивной стабилизацией опорная плоскость удерживается в заданном положении механическими способами, а в системах с активной стабилизацией – электронными устройствами автоматического регулирования.

Системы с пассивной стабилизацией опорной плоскости. Отечественная лазерная система контроля планировки СКП-1 (табл. 2.3) предназначена для контроля высотного положения измерительного устройства под горизонтальную плоскость. Она состоит из четырех блоков: лазерного передатчика, фотоприемника, индикатора и штанги.

Принцип работы системы СКП-1 заключается в следующем: лазерный передатчик формирует круговую горизонтальную опорную плоскость. Относительной этой плоскости фотоприемником определяются высотные от-

Системы с пассивной стабилизацией опорной плоскости

Параметры	СКП-1	САУЛ-1	САУЛ-3	УСЛ-3	Горизонт	LAI 2800	LAI 2900	№2 Roto Cite Laser
Мощность излучения лазера, мВт	0,5	0,5	I	2	I	2	2	3
Мощность, потребляемая лазерным затвораком, Вт	30	30	25	18	25	22,6	22,6	-
Дальность действия, м	500	400	400	400	450	150	305	100
Погрешность установки опорной плоскости относительно горизонта, угл.с	± 10	± 20	± 15	± 20	± 20	-	-	-
Диапазон задания уклона, %	-	0...3	0...5	0...10	0...3	-	-	-
Размер зоны нечувствительности, мм	до ± 30	до ± 50	25...40	20; 90	± 20	-	$\pm 1,6$	± 10 (на 100 м)
Диапазон стабилизации положения опорной плоскости, угл.мин	± 10	± 10	± 10	-	10	± 10	± 10	-
Частота вращения пучка, с ⁻¹	1...2	1...4	10	10	10	0...5	0...5	5
Напряжение питания затвора, В	12,6; 220	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6; 220	12,6
Масса затвора, кг	38	28	25(со штативом)	6,5	15	4,5	5,2	-
Диапазон рабочих температур, °С	-10...+40	-10...+50	-10...+50	-20...+50	-10...+50	-	-	-

метки измерительного устройства, которые высвечиваются на индикаторе. Управление его высотным положением производится вручную по показаниям индикатора.

Передачик состоит из задатчика и металлического штатива. Внутри корпуса задатчика помещены: лазер, коллиматор, блок питания, которые жестко связаны между собой и расположены на одном отвесе, подвешенном на двухосном карданном шарнире, что обеспечивает стабилизацию положения опорной плоскости с погрешностью около 10 угл.с. Для уменьшения амплитуды и времени свободных колебаний отвеса применен масляный демпфер. Узел развертки задатчика преобразует вертикальный лазерный пучок в горизонтальную плоскость и состоит из вращающейся пентапризмы (отражателя) и клина. Для уменьшения расхожести пучка лазера служит коллиматор в виде телескопической трубы, а для корректировки положения пучка и компенсации ошибки в изготовлении пентапризмы — корректирующий клин. В качестве источника излучения применяется гелий-неоновый лазер ОКГ-13 или излучатель ИЛПН-207. Диаметр пучка на выходе лазера составляет около 1 мм, на выходе оптической системы формируется пучок диаметром около 25 мм. На расстоянии 500 м диаметр пучка не превышает 60...80 мм.

Фотоприемник состоит из пяти световодных дисков, внутри которых встроены фотолюды. Такая конструкция фотоприемника обеспечивает круговой прием лазерного излучения. В нижней части фотоприемника расположены усилители и логическое устройство. Диапазон регистрации отклонений фотоприемника относительно опорной плоскости равен ± 10 см. При выходе фотоприемника из зоны лазерного излучения за пределы этого диапазона запоминающее устройство регистрирует направление выхода из зоны излучения. Фотоприемник устанавливается на измерительном устройстве с помощью штанги, позволяющей регулировать его высотное положение. Индикатор выполнен в виде светового табло на газоразрядных лампах, для питания которых в корпусе индикатора расположены преобразователь напряжения и выпрямитель. Индикатор выдает цифровую информацию об отклонении фотоприемника относительно опорной плоскости (0, ± 2 , ± 4 , ± 10 см).

Система САУЛ-1 (система автоматического управления лазерная) обеспечивает автоматическое управление измерительным устройством и позволяет проводить планировку не только под горизонтальную плоскость, но и под наклонную. Предусмотрено использование системы как в автоматическом режиме управления, так и в ручном режиме по показаниям лампочек специального светового табло. В задатчике системы используют излучатель ИЛПН-207 с источником питания. Наклон пучка ла-

зера регулируют двумя клиньями с помощью механизма задания уклона. Задаваемые углы отсчитывают по линейной шкале и лимбу. Направление главного угла опорной плоскости в передатчике задается по визиру. При выходе фотоприемника за пределы воздействия лазерного излучения примерно через 0,5 с пропадает сигнал "ЛУЧ", а сигнал "Вверх" или "Вниз" сохраняется, так как триггеры каналов не изменяют свое состояние. В результате происходит запоминание сигналов лазерного излучения и возврат фотоприемника в зону опорной плоскости.

Опыт эксплуатации этих систем при производстве планировочных работ выявил следующие их достоинства: возможность одновременного управления несколькими измерительными устройствами с одной позиции излучателя; возможность перемещения их в любом направлении вследствие использования фотоприемника с круговым обзором. При модернизациях систем СКП-I и САУЛ-I применены новый излучатель лазера ИЛПН-211А с малогабаритным источником питания, магнитный цепочкер, повышены быстродействие и помехоустойчивость фотоприемного устройства, увеличена частота вращения пучка до 10 с^{-1} , изменена конструкция индикатора, который выполнен в виде символического табло, введен переключатель выбора режимов работы "Зона грубо" $\pm 40 \text{ мм}$, "Зона точно" $\pm 20 \text{ мм}$. Кроме того, в комплект поставки дополнительно включена фоторейка, состоящая из индикатора лазерного излучения с круговым обзором и рейки с рулеткой для отсчета высотного положения опорной плоскости.

В отличие от отечественных зарубежная система А1 2800 разработана для обеспечения планировочных работ, задатчик выполнен в виде трубы, в которой вертикально располагается гелий-неоновый лазер с оптической системой, в верхней части трубы имеется вращающаяся головка с пентапризмой, формирующая круговую опорную плоскость, положение которой стабилизируется в диапазоне $\pm 10 \text{ угл. мин}$ с помощью маятника. К тому же в системе А1 2900 имеется съемная вращающаяся головка, что позволяет задатчику формировать опорную линию.

Системы с активной стабилизацией опорной плоскости. Разработана система, в состав которой входят: передающее устройство, включающее задатчик опорной плоскости, фотоприемное устройство, состоящее из фоточувствительной головки, блока выработки команд (БВК), индикатора ручного управления (ИРУ), штанги крепления ГФЧ, фоторейка, состоящая из индикатора лазерного излучения (ИЛИ), измерительной рейки; блок программного управления (БПУ).

Система имеет четыре варианта поставки (табл. 2.4): УКЛ-4, УКЛ-5 для управления высотным положением измерительных устройств при монтаже линейных объектов; УКЛ-6, УКЛ-7 для группового управления высотным

Комплект поставки лазерных систем с активной стабилизацией

Система	Итатив		Задатчик опорной плоскости	Зарядное устройство		Аккумуляторная батарея	Гру	БВК	Штанга	УРУ	Блок программного управления	Преобразователь напряжения	ИЛИ-2	Измерительная стойка
	# 1	# 2		# 1	# 2									
УКЛ-4	1	-	1	-	-	1	1	1	-	-	-	-	1	1
УКЛ-5	1	1	1	1	1	1	2	2	-	2	1	1	1	1
УКЛ-6	-	1	1	-	-	1	6	6	6	-	-	-	2	2
УКЛ-7	1	1	1	1	1	1	6	6	6	-	-	-	2	2

положением рабочих органов измерительных устройств при производстве планировочных работ.

Задатчик создает круговую опорную плоскость, угловое положение которой устанавливается в пространстве по двум координатам. Оптический блок, формирующий опорную плоскость, содержит излучатель, коллиматор, пентапризму и конструктивно объединен с источником питания излучателя. Лазерный пучок, отражаясь от двух поворотных зеркал, меняет направление на 180° и попадает на коллиматор, состоящий из трех оптических элементов: окуляра, фокусирующей линзы, объектива. Коллиматор уменьшает расходимость пучка лазера в 22,5 раза, и далее пучок отклоняется на угол 90° пентапризмой, которая вращается вокруг вертикальной оси, создавая круговую опорную плоскость. Оптический клин служит для компенсации погрешностей изготовления пентапризмы. Наклон опорной плоскости относительно горизонта по двум координатам X и Y задается наклоном оптического блока с помощью механизма координатного перемещения. Для получения необходимой информации об угловом положении оптического блока в задатчике используются два установленных ортогонально электролитических датчика угла (ЭДУ). В зависимости от угла наклона оптического блока ЭДУ формирует электрический сигнал, несущий информацию о направлении и значении уклона. ЭДУ связаны с оптическим блоком через механизмы задания уклонов, которые при помощи электродвигателей М1 и редукторов изменяют положение ЭДУ относительно горизонта. Значение задаваемого уклона отображается на механических счетчиках.

Стабилизация углового положения оптического блока осуществляется с помощью ЭДУ, блоков стабилизации уклонов и механизма координатного перемещения по двум идентичным каналам, обеспечивающим раздельную стабилизацию уклонов по координатам X и Y . Работа системы стабилизации (например, по координате X) заключается в следующем. В исходном состоянии при задании горизонтальной плоскости оптический блок находится в вертикальном, а ЭДУ в горизонтальном положениях. В этом случае сигналы генератора импульсов блока стабилизации (сдвинутые по фазе на 180°) поступают на два электрода ЭДУ и вычитаются по нагрузке, сигнал на выходе ЭДУ равен 0. При случайном или необходимом изменении уклона оптический блок изменяет свое исходное положение. На нагрузке ЭДУ появляется разностный сигнал, амплитуда которого пропорциональна углу наклона ЭДУ, а фаза определяет направление наклона. Этот сигнал через усилитель блока стабилизации подается на синхронный ключ, выполняющий функции фазочувствительного выпрямителя. Выходной сигнал ключа преобразуется широтно-импульсным модулятором (ШИМ) и через усилитель мощности подается на исполнительный электродвигатель механизма координатного перемещения. Электродвигатель через редуктор изменяет положение оптического блока вместе с ЭДУ до момента появления его на выходе нулевого сигнала. Одновременно выходной сигнал синхронного ключа подается на компаратор, который при достижении определенной амплитуды сигнала через блок управления отключает лазер на время отработки системой стабилизации разностного сигнала ЭДУ и восстановления заданного положения оптического блока.

Для упрощения конструкции задатчика широтно-импульсного модуляторы и усилители мощности блоков стабилизации уклонов применяют для управления электродвигателями механизмов задания уклона. В данном случае применено перекрестное управление — часть блока стабилизации уклона координаты X (ШИМ, усилитель мощности) используется для управления электродвигателем механизма задания уклона координаты Y , и наоборот. Подобное включение позволяет одновременно задавать и обрабатывать уклон по одной координате.

Если в процессе эксплуатации требуется больший угловой диапазон задания уклона, то предусмотрен "ручной" режим с отключенной системой стабилизации. В этом случае контроль установки углов необходимо осуществлять с помощью оптических приборов, например теодолитов, нивелиров. В этом случае на блок коммутации подается электрический сигнал, под действием которого он закрывает синхронные ключи в обоих блоках стабилизации, а на ШИМ и компараторы поступает сигналы "0", которые отключают электродвигатели механизма координатного перемещения и поддерживают лазер во включенном состоянии.

Для обеспечения требуемой точности в задатчик введена система стабилизации вращения пентапризмы, состоящая из датчика скорости (оптрона), модулирующего диска, механически связанного с пентапризмой, и электродвигателя, входящих в механизм вращения пентапризмы, а также блока стабилизации вращения пентапризмы. Оптронный датчик по время вращения пентапризмы формирует импульсные сигналы, частота которых пропорциональна скорости вращения. Импульсы датчика через усилитель фототока поступают на формирователь, который преобразует их в аналоговый сигнал, причем амплитуда сигнала пропорциональна частоте. Далее этот сигнал через электронный переключатель поступает на схему сравнения, на ее выходе формируется разностный сигнал, который через ключ и усилитель мощности подается на электродвигатель. Система стабилизации настроена на частоту вращения пентапризмы 10 Гц.

Имеется возможность регулировать частоту вращения пентапризмы в пределах 0...10 Гц. Вращение пентапризмы прекращается одновременно с отключением лазера.

Конструктивно задатчик состоит из основания, корпуса, крышки с защитными стеклянными окнами, через которые выходит лазерное излучение, и ручки для переноски прибора. В ручке имеются четыре ортогонально расположенные прорези-прищелки для задания направления осей уклона по координатам X и Y. На корпусе расположены панели управления. Питание задатчика осуществляется через кабель и разъем. На основании имеется конусообразный узел для крепления задатчика на штативе, три упора для установки задатчика на плоскую поверхность и клапан для заполнения внутреннего объема азотом. Функциональная схема фотоприемного устройства системы УКЛ-4 содержит четыре группы фотодиодов, обеспечивающих требуемые зоны нечувствительности и диапазоны управления по высоте (180 мм), и блок усилителей-формирователей. В состав входят разделители импульсов, схема логической обработки сигналов, ключи "Вниз", "Норма", "Вверх" с одноименными индикаторами. По сигналам ГФЧ формирует команды управления положением рабочего органа "Вверх", "Вниз", "Норма" с соответствующей индикацией, а также сигналы на включение индикаторов в ИРУ.

Фотоприемное устройство работает следующим образом. При засветке лазерным пучком фотодиодов они преобразуют световые импульсы в электрические. Блок усилителей и формирователей усиливает сигналы фотодиодов, нормирует их по длительности (10 мс) и амплитуде (3 В) и преобразует в разнополярные импульсы, которые по кабелю подаются в блок выработки команд. Передача двух разнополярных импульсов по одному сигнальному проводу позволила вдвое уменьшить число каналов ГФЧ.

Такой режим работы позволяет исключить возможность появления автоколебаний при малой зоне нечувствительности и, следовательно, срыв управления.

Использование постоянных и импульсных команд управления в фотоприемном устройстве позволяет обеспечить высокое быстродействие системы регулирования и устойчивое управление при малых зонах нечувствительности (10 мм).

Корпус ГЧ состоит из двух половин. Внутри корпуса расположена прямоугольная плата с радиоэлектронными элементами, которая крепится к корпусу с помощью резиновых амортизаторов. На плате (вдоль ее боковых сторон) закреплены четыре металлических уголковых держателя с приклеенными на них фотодиодами. Вдоль боковых сторон корпуса расположены четыре окна, закрытых защитными стеклами. На боковой стороне корпуса закреплен кронштейн, фокусирующий ГЧ с помощью зажима на штанге.

Индикаторно-регистрирующее устройство состоит из двух частей, стянутых болтами. ИРУ закрепляют на машине при помощи кронштейна. Штанга состоит из двух телескопических труб, сверху штанги располагают ГЧ. Выбранное положение ГЧ фиксируют с помощью зажима. Снизу штангу закрепляют на измерительном устройстве.

Фоторейка состоит из индикатора лазерного излучения (ИЛИ-2), измерительной рейки и зарядного устройства ИЛИ-2 предназначен для поиска лазерного излучения и определения положения энергетической оси лазерного пучка. При воздействии лазерного излучения на фотодиоды ИЛИ-2 последние преобразуют его в электрический сигнал, длительность которого в зависимости от расстояния до передающего устройства может меняться примерно от 200 до 1 мкс. Для надежной работы последующих каскадов длительность входных сигналов увеличивается до 10 мс усилителями-расширителями. С их выходов сигналы поступают на блок формирования зоны нечувствительности, который обеспечивает работу ИЛИ-2 в двух режимах по точности: "Грубо" ± 3 мм, "Точно" $\pm 1,5$ мм.

В отличие от отечественных, например Модель 1045, в комплексе фоточувствительная головка выполнена в виде цилиндра с прорезями по образующей, закрытыми стеклянными окнами. Внутри нее вдоль прорезей помещены пластинчатые фотодиоды. ГЧ монтируют на матце, закрепляемой на измерительном устройстве. Поиск опорной плоскости в пределах до 1,6 м и регистрация управления при помощи световой и звуковой индикации может осуществляться автоматически, что на 50% снижает трудозатраты на геодезические работы. Предусмотрено также комплектование с одним передатчиком нескольких фотоприемных устройств для двух-

контурного управления. Частота вращения пентапризмы 300 и 600 мин⁻¹, время задержки на включение системы стабилизации 2,5 или 10 с. Основным элементом пульта является однокристалльная микроЭВМ 8035 (микроконтроллер), выполняющая функции центрального процесса. Программируемое постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) предназначено для хранения рабочих программ. Диапазон стабилизации $\pm 5,5^\circ$ или ± 8 угл.мин.

При автоматическом режиме положение лазера (пучка) автоматически стабилизируется, значение уклона плоскости (линии) соответствует показаниям счетчиков. При ручном режиме система стабилизации отключается и положение пучка можно контролировать с помощью геодезических приборов.

Пример. Определить величину мощности излучателя лазерной системы при ее эксплуатации в диспергированных средах, точность измерения. Исходный диаметр пучка $d_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ м; расходимость излучения $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$ мрад; концентрация частиц на участке 1 $N = 0,56 \cdot 10^8$ м⁻¹, на участке 2 $N = 10^6$ м⁻¹; размеры участков $l_1 = 1000$ м, $l_2 = 500$ м, $l_3 = 400$ м; точность установки зеркал $\sim 0,001$; интенсивность излучения 10^{-4} Вт/м²; длина волны излучения на первой стадии измерений $\lambda_1 = 10,6 \cdot 10^{-6}$ м, на второй стадии измерений $0,56 \cdot 10^{-6}$ м; падение мощности на каждом зеркале 2%, диаметр частиц $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ м.

1. Определим диаметры светового пучка на каждом зеркале:

$$d_1 = \alpha \cdot l_1 + d_0 = 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4} + 4 = 5,5 \text{ мм},$$

$$d_2 = 5 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4} + 5,5 = 7,5 \text{ мм},$$

$$d_3 = 4 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4} + 7,5 = 11,5 \text{ мм}.$$

2. Вычислим коэффициент ослабления излучения на каждом участке.

$$\gamma = 0,827 N \cdot S^3 \cdot \lambda^4,$$

$$\gamma_3 = 0,827 \cdot 10^8 (10,6 \cdot 10^{-6})^{-4} \left(\frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-12}}{4} \right)^3 \cdot 0,56 = 0,012 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1},$$

$$\gamma_3' = 0,827 \cdot 10^6 (0,56 \cdot 10^{-6})^{-4} \left(\frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-12}}{4} \right)^3 \cdot 0,56 = 146 \text{ м}^{-1},$$

$$\gamma_2 = 0,827 \cdot 10^6 (10,6 \cdot 10^{-6})^{-4} \left(\frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-12}}{4} \right)^3 = 0,189 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1},$$

$$\gamma_2' = 0,827 \cdot 10^6 (0,56 \cdot 10^{-6})^{-4} \left(\frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-12}}{4} \right)^3 = 2,76 \text{ м}^{-1}.$$

3. Установим значение интенсивности излучения на первом зеркале:

$$I'' = \frac{I_2}{\exp(-\gamma_2 l_2)} = \frac{1,0149 \cdot 10^{-4}}{\exp(-0,189 \cdot 10^{-7} \cdot 500)} = 1,01407 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2,$$

$$I_{\text{пор}} = 0,02 I'' = 0,0203 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2,$$

$$I_4 = I_{\text{пор}} + I'' = 0,0203 \cdot 10^{-4} + 1,01402 \cdot 10^{-4} = 1,0343 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2.$$

4. Установим значение интенсивности на втором зеркале:

$$I' = \frac{I \cdot 10^{-4}}{\exp(0,012 \cdot 10^{-4} \cdot 400)} = 1,0005 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2,$$

$$I_{\text{пор}} = 0,02 \cdot I' = 2,001 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м}^2,$$

$$I_2 = 1,0005 \cdot 10^{-4} + 2,001 \cdot 10^{-6} = 1,02051 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2.$$

5. Мощность излучателя для длины волны $\lambda = 0,56 \cdot 10^{-6}$ м равна

$$P_0 = I_0 S_0 = I_0 \frac{\pi d_0^2}{4} = 1,0343 \cdot 10^{-4} \frac{3,1415(4 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1,299 \text{ Вт}.$$

Прохождение излучения с длиной волны $\lambda = 0,56 \cdot 10^{-6}$ м в данной среде неосуществимо:

$$P'_0 = I'_0 \cdot S'_0 = 0.$$

6. Точность измерения лазерной системы определяется точностью установки зеркал:

$$\Delta_1 = l_2 \operatorname{tg}(\Delta \alpha) = 500 \cdot \operatorname{tg}(0,2^\circ) = 1,57 \text{ м},$$

$$\Delta_2 = l_3 \operatorname{tg}(\Delta \varphi) = 400 \cdot \operatorname{tg}(0,09^\circ) = 0,57 \text{ м}.$$

Способы формирования реперных осей и плоскостей в пространстве.

Наиболее простая из сформулированных в названии задач – это формирование реперной оси. Ее решение заключается в получении минимального размера пятна на рабочей дистанции прибора ~ 10 м и достигается применением телескопических систем с апертурной ~ 1 см. Формирование реперных плоскостей может быть осуществлено двумя путями:

сканированием пучка;

перераспределением энергии исходного пучка дифракционными или линзово-зеркальными (лазерный нож) элементами.

Сканирующие устройства условно можно разделить на классы:

с механически подвижными элементами (оптико-механические, пьезоэлектрические, пьезомагнитные, магнитоэлектрические);

основанными на упругом взаимодействии света с регулярными неоднородностями в твердом теле или жидкости (акустооптические, магнитооптические и др.). Их общий недостаток – дополнительные энергозатраты на привод или возбуждение волн акустической либо магнитной природы.

Перераспределение энергии исходного пучка для формирования реперных плоскостей дифракционными или линзово-зеркальными элементами

имеет целый ряд преимуществ по сравнению со сканерами:

отсутствие дополнительных энергозатрат и механических перемещений;

получение произвольной формы световой поверхности в рабочей зоне с помощью одного оптического элемента;

высокая дифракционная эффективность моданов-элементов компьютерной оптики;

широкий спектральный диапазон;

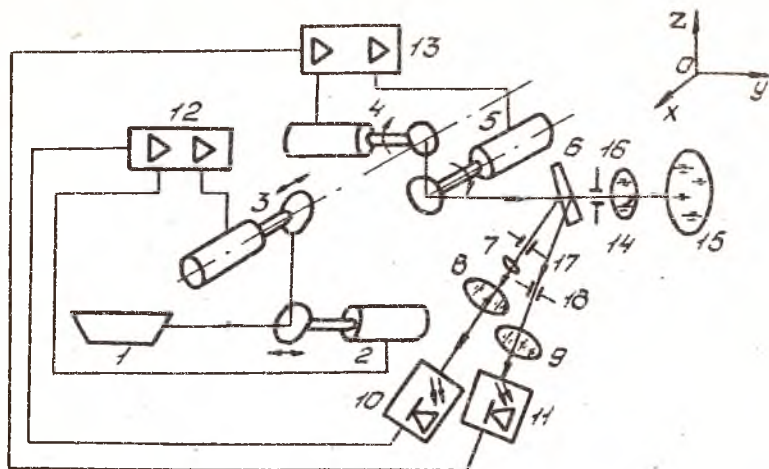
малые потери в линзово-зеркальных системах типа лазерного ножа.

Для формирования лазерной плоскости можно ограничиться простейшими дифракционными элементами — отражающими или пропускающими дифракционными решетками, технология которых отработывалась в течение столетий и достигла высокого совершенства.

Система стабилизации положения оси диаграммы направленности. Структурная схема системы стабилизации пространственного положения ОДН лазера изображена на рис. 2.4. Она представляет собой активную систему автоматического управления, работающую по отклонению. Лазерный луч, отражаясь от подвижного зеркала исполнительного механизма, попадает на координатно-чувствительный датчик, сигнал рассогласования с которого управляет приводом подвижного зеркала через согласующий усилитель.

В функциональную схему устройства обработки сигнала с координатно-чувствительного датчика (рис. 2.5,а) входят следующие блоки: блок суммарно-разностной обработки аналогового сигнала с фотодатчика, компаратор, счетчик, генератор, цифроаналоговый преобразователь, усилитель.

Работа устройства (на примере одного канала) заключается в следующем. При смещении светового пятна относительно центра симметрии фотодатчика возникает разностный сигнал, который после прохождения через блок суммарно-разностной обработки поступает на компаратор. Логический сигнал, сформированный на выходе компаратора, в зависимости от знака разности входных сигналов управляет поступлением импульсов с генератора на суммирующий или вычитающий вход реверсивного счетчика. Цифровой код с выходов счетчика подается на цифроаналоговый преобразователь и полученный аналоговый сигнал поступает на исполнительные элементы, которые корректируют уход светового пятна. При этом квадрантный фотодиод типа ФД-19КК включен в режиме источника тока. Для повышения разрешающей способности в блоке суммарно-разностной обработки использованы операционные усилители с малыми входными токами типа К544УД1. В качестве компаратора (рис. 2.5,б) служит микросхема К597СА2, позволяющая согласовать уровень выходного сигнала с



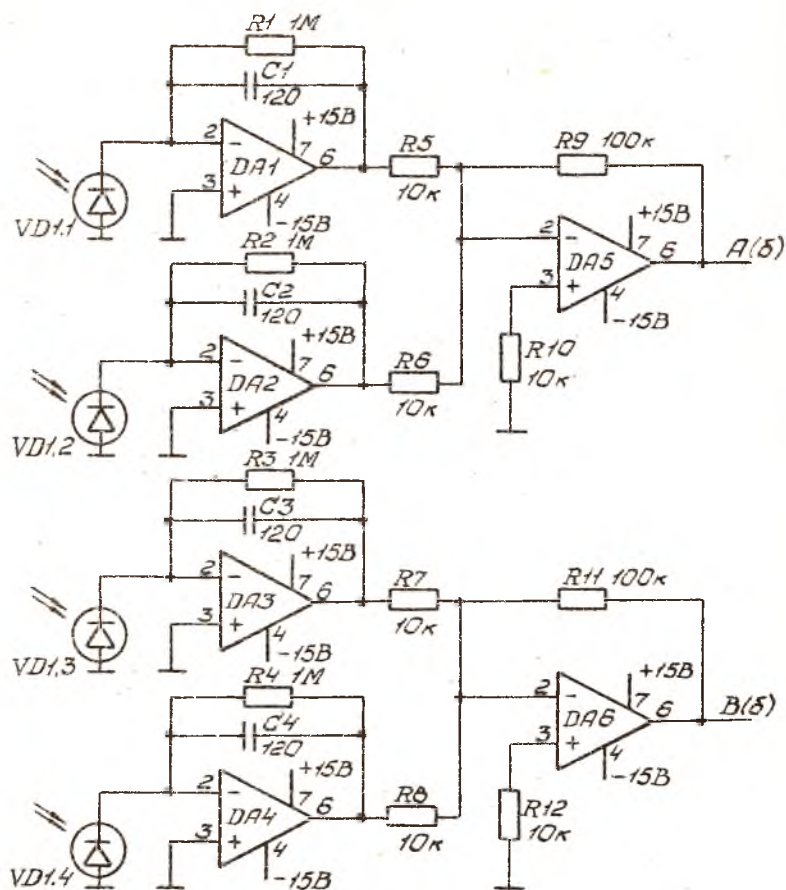
Р и с. 2.4. Структурная схема системы стабилизации пространственного положения оси диаграммы направленности: 1 - лазер ЛП-79-2; 2, 3 - зеркала с линейным пьезоприводом; 4, 5 - зеркала с угловым пьезоприводом; 6 - стеклянный светоделитель - ный клин; 7, 8 - линзы коллиматора фотодатчика продольных перемещений ОДН; 9 - линза фотодатчика угловых перемещений ОДН; 10 - фотодатчик линейных перемещений ОДН; 11 - фотодатчик угловых перемещений ОДН; 12, 13 - согласующие усилители пьезоприводов; 14, 15 - линзы выходного коллиматора; 16, 17, 18 - диафрагмы.

сигналами цифровой ТТЛ-логики. Счетчик и генератор построены на микросхемах 155-й серии (К155ИЕ7 и К155ЛА8 соответственно). ЦАП - универсальный десятиразрядный (К572ЦАП). Усилитель выполнен на транзисторах и позволяет усилить выходной сигнал до 200 В.



а

Р и с. 2.5., а. Функциональная схема координатно-чувствительного датчика

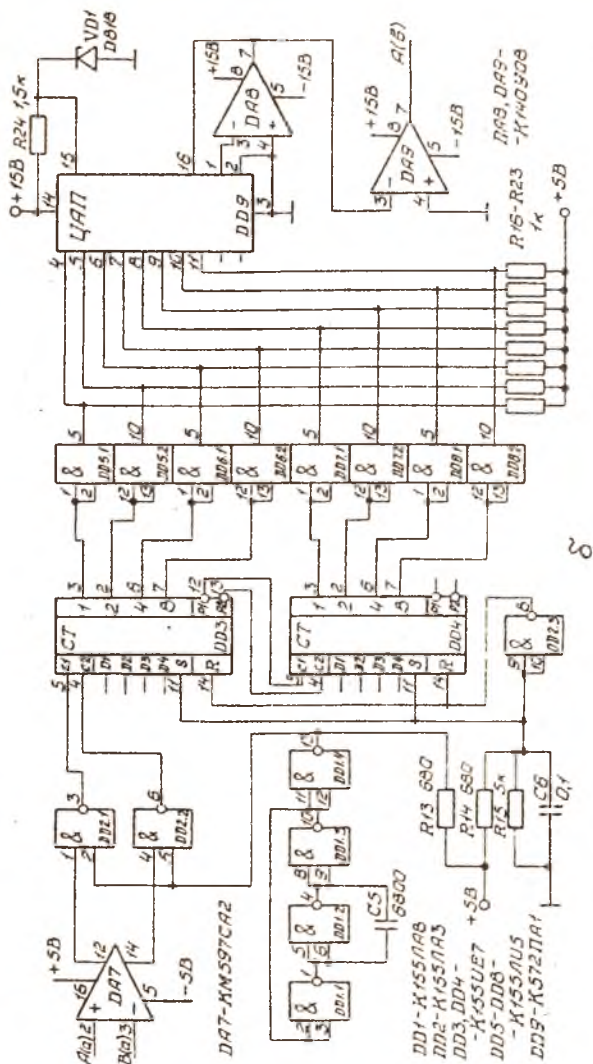


DA1-DA6 - К544УД1

VD1 - ФД-19КК

δ

Р и с. 2.5,6. Принципиальная схема устройства обработки сигнала



2

Р и с. 2.5.6. Окончание рисунка

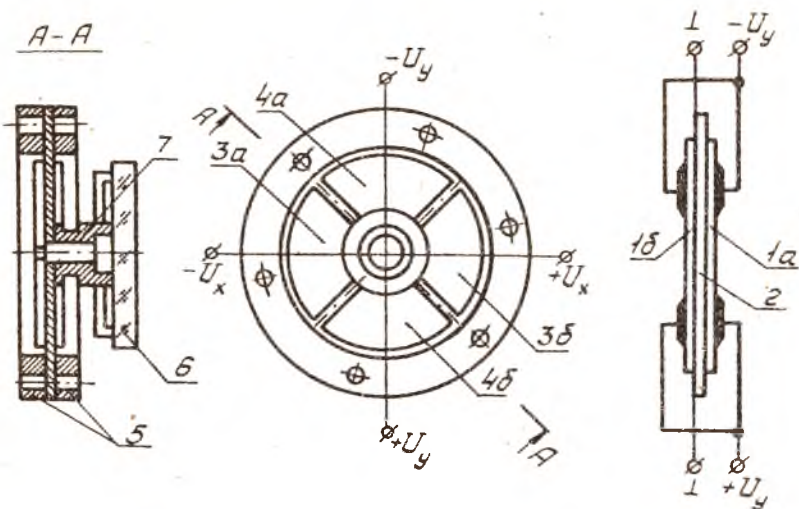
Пьезоэлектрические приводы. Для широкораспространенной пьезо-керамики ЦТС-19 параметры, входящие в формулу ($H = \alpha U$), имеют значения: $P = 4 \cdot 10^{10}$ Н/м², $U_{\max} = 1500$ В, $\alpha = 2 \cdot 10^6$ В/м.

Получение максимальной чувствительности управляющих зеркал описанных устройств ограничено возможностью изготовления тонких пьезо-керамических элементов. Практически могут быть получены пьезокерамические пластины толщиной $\sim 0,1$ мм.

Для линейного сканирования излучения используются исполнительные элементы, в состав которых входят пьезоэлектрические двигатели (ПЭД) (рис. 2.6), предназначенные для широкого применения: в обзорно-визирных устройствах подвижных и неподвижных объектов, в оптико-механических сканирующих устройствах и т.д. ПЭД работает как в непрерывном, так и в шаговом режиме, а также в режиме поступательного и вращательного перемещений. В зависимости от конструкции ПЭД имеют следующие характеристики:

Напряжение возбуждения	5 - 10 В
Потребляемый ток	0,1 - 0,3 А
Мощность	15 Вт
Частота возбуждения	30-100 кГц
Скорость вращения	0 - 2000 об/мин
Скорость движения	0 - 0,2 м/с
Момент на валу	0,02 - 0,9 Нм
Коэффициент детонации	0,04%
Время пуска и остановки	10^{-3}
Диапазон перемещений	0 - 350 мм
Ресурс	по 10^4 ч
Диаметр вала	1,5 - 6 мм
Масса	10 г
Уровень шумов	20 дБ

При подаче противофазных напряжений (рис. 2.6), например, на электроды по направлению оси X , происходит деформация изгиба в противоположные стороны от нейтрального положения центральной части мембраны, что приводит к повороту в горизонтальной плоскости зеркального отражателя, жестко связанного с центральной частью мембраны через шток. При одновременной подаче на все противоположные электроды противофазных управляющих напряжений происходит поворот отражателя одновременно в двух ортогональных плоскостях. Описанное устройство может быть использовано в оптических системах для углового позиционирования, причем достигнута чувствительность в горизонтальной



Р и с. 2.6. Общий вид пьезоэлектрического привода: 1 - электроды; 2 - центральная часть мембраны; 3 - электроды координаты X; 4 - электроды координаты Y; 5 - оправа; 6 - зеркальный отражатель; 7 - шток

плоскости $3,6 \cdot 10^{-4}$ град/В, в вертикальной $4,7 \cdot 10^{-4}$ град/В, максимальный угол поворота зеркал составляет $1,7 \cdot 10^{-3}$ град. В другом типе устройства может содержаться биморфная пластинка, которая образуется пьезокерамическими дисками, имеющими поляризацию. На поверхность диска наносится светоотражающее покрытие. Посредством прокладки из микропористой резины пластинка закреплена в оправе. Напряжением, прикладываемым к электродам биморфной пластинки, можно изменять величину ее изгиба, следовательно, и кривизну зеркальной поверхности. В зависимости от знака напряжения пластинка прогибается в том и другом направлении, образуя выпуклое либо вогнутое сферическое зеркало, угловое положение которого может быть вычислено по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{R(E - E_0)}{\alpha U},$$

где δ - толщина одного пьезокерамического элемента, R - радиус кривизны зеркала; E_0 - модуль упругости пьезокерамики; α - ее диэлектрическая проницаемость; E - напряженность поля остаточной поляризации пьезокерамики; U - управляющее напряжение.

Относительная деформация пьезоэлемента при этом будет вполне

достаточно. Во избежание появления паразитных рефлексов зеркала должны иметь наружное отражающее покрытие из алюминия. Все оптические элементы устанавливаются в держателе, имеющем касторовочные перемещения по линейным координатам ± 5 мм и угловые $\pm 10^\circ$.

Точность позиционирования лежит в пределах от единиц минут до единиц секунд и меньше и зависит от частоты вращения, с которой производится остановка двигателя. Возможно плавное и дискретное изменение скорости. В режиме стояния ПЗД не потребляет энергию. Конструктивное исполнение в виде цилиндра $\varnothing 20 \times 10$ мм и более с фланцевым креплением.

К разряду приводов в прецизионных следящих системах следует отнести гальванометрические исполнительные элементы, принцип действия которых основан на возможности отклонения лазерного луча с помощью подвижного зеркала гальванометра. Отраженный от зеркала луч проецируется на объектив, где часть излучения пропускается им, а другая, отражаясь, попадает в фотоприемник, подключенный к усилителю постоянного тока, выход которого соединен с зеркалом гальванометра. В точке равновесия системы лазерный луч располагается относительно объектива так, что оптический сигнал не попадает в фотоприемник. При смещении лазерного луча в какую-либо сторону в системе появляется неравновесие, на фотоприемник поступает сигнал соответствующего знака и зеркало через управляющий прибор и усилитель смещается в положение равновесия. Однако использование данной следящей системы ограничено инерционностью зеркального гальванометра.

Существующие электромагнитные приводы обладают высокой точностью позиционирования (0,1-1) угл.с, быстродействие составляет (0,05-0,1) с, а диапазон регулирования находится в пределах (30-240) угл.с, но из-за значительных габаритов 200×180 мм² и веса порядка 15 кг и больше также находят весьма ограниченное применение в прецизионных следящих системах.

Наиболее оптимальными являются исполнительные элементы, выполненные на базе пьезометрических приводов, которые по своим техническим характеристикам незначительно уступают электромагнитным, но значительно легче (200 г) и миниатюрнее их. Поэтому элементы системы стабилизации оси диаграммы направленности должны содержать в себе пьезоэлектрические приводы.

Причины флуктуации оси диаграммы направленности лазеров и конструктивные мероприятия, их минимизирующие. При использовании оптических квантовых генераторов в качестве датчиков опорного направления и во многих других случаях важно иметь стабильное положение оси диаграммы направленности (ОДН) излучения. Решение данной задачи получа -

ется наиболее простым в том случае, если причины, вызывающие флуктуации ОДН, легко устранимы, а сам лазер наиболее полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к разрабатываемой измерительной системе. Ось диаграммы направленности — это прямая, проходящая через максимум углового распределения энергии или мощности лазерного излучения, а диаграмма направленности — это угловое распределение энергии или мощности лазерного излучения.

Для выбора лазера с минимальными флуктуациями ОДН рассмотрим основные факторы, влияющие на стабильность ОДН в различных типах лазеров. Ввиду отсутствия в литературе данных по флуктуациям ОДН твердотельных и жидкостных лазеров, о пригодности того или иного излучателя можно косвенно судить по величине расхожимости лазерного излучения. Причины нестабильности ОДН различных типов лазеров сведены в табл. 2.5, построенную по принципу поглощения, т.е. каждому последующему типу присуща почти полностью вся совокупность свойств предыдущего.

Анализ амплитуд флуктуации ОДН в лазерах различных типов позволяет выбирать в качестве источника света устройства формирования реперных осей и плоскостей в пространстве газовой отпаянный лазер непрерывного излучения. Амплитуда угловых флуктуаций ОДН у них достигает 1 угл.мин, а поступательные смещения луча 0,3 мм. Частоты колебания ОДН отражают спектр источников возмущений.

Конструкции серийных приборов допускают доработку, снижающую амплитуду флуктуаций ОДН до 10–15 угл.с, которая состоит из следующих мероприятий.

- установки тепловых экранов;
- оптимизации количества, расположения, материала стержней резонатора и держателей активного элемента;
- выбора типа резонатора;
- прокачки хладагента через крепеж и зеркала;
- применения композитных материалов для основы зеркал резонатора.

Эскизный проект лазерного визира. Полная структурная схема лазерного визира представлена на рис. 2.4. Пучок света лазера ЛЛ-79-2 с флукутирующей ОДН последовательно отразившись от двух зеркал с линейными пьезоприводами, последовательно претерпевает еще два отражения от зеркал с угловыми пьезоприводами и попадает на светоделительный клин. Зеркала с линейными пьезоприводами обеспечивают поступательные подвиги ОДН вдоль осей x и y соответственно, а зеркала с угловыми пьезоприводами осуществляют угловые перемещения ОДН в плоскостях xoz и yoz . Оптический клин расщепляет пучок

Причины флуктуаций ОДН лазеров различных типов

№ п/п	Тип лазера	Причины флуктуаций	Величина флуктуаций или расходимость
1	Газовый отпаянный непрерывный	Неравномерный нагрев старшей резонатора при трехступенчатой конструкции, приводящий к разъястировке зеркал. Температурные градиенты в газовом разряде	Флуктуация ОДН по 60 угл.с
2	Газовый прокачной импульсный	Турбулентные потоки в активной среде	Увеличение расходимости по 10 угл.мин
3	Твердотельный	Неоднородность активного элемента, тепловая линза, температурные напряжения, пульсации тока лампы накачки	Расходимость 10 угл.мин
4	Жидкостный	Акусто- и термооптические искажения активной среды в процессе оптической накачки, различная расходимость излучения по слоям кюветы	Расходимость I градуса

на основной, с помощью которого осуществляется визирование, и два вспомогательных. Паразитные пучки, образующиеся в результате многократных отражений, отсекаются диафрагмами. Вспомогательные пучки используются для управления поступательными и угловыми перемещениями ОДН.

Всего каналов управления подвижками четыре: два по линейным и два по угловым координатам. Развязка между каналами управления по линейным и угловым координатам достигается за счет выбора соответствующих оптических систем, чувствительных к угловым либо поступательным перемещениям ОДН. В канале управления угловыми перемещениями квадрантный фотодиод ФД-19К располагается в фокальной плоскости собирающей линзы. Положение пучка в фокальной плоскости безабберационной линзы зависит лишь от угла падения пучка на линзу и нечувствительно его параллельному смещению.

В канале управления линейными перемещениями перед фотодиодом установлен коллиматор, собранный по схеме телескопа Кеплера в обратном ходе лучей. Здесь находит применение свойство оптической системы подавлять угловые флуктуации ОДН, усиливая линейные.

Путь луча внутри лазерного визира от выходного зеркала резонатора до первой линзы выходного коллиматора порядка 1 м. Наблюдаемые экспериментально отклонения ОДН гелий-неоновых лазеров не превышают 2 угл.мин. Выбирая коэффициент запаса по отклонению ОДН равным пяти при диаметре пучка 2 мм и расхожмости $2 \cdot 10^{-3}$ рад, получаем, что апертура оптических элементов ~ 10 мм.

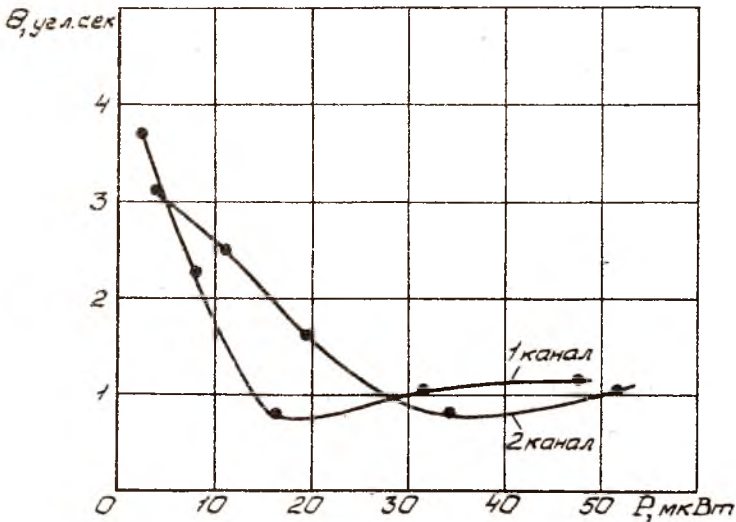
Исполнительные элементы. Для стабилизации оси диаграммы направленности оптические системы многих экспериментальных установок содержат зеркала: плоские, с выпуклой или вогнутой отражающей поверхностями. Одной из трудностей, возникающих на пути управления оптическими сигналами, является невозможность оперативно с помощью электрических сигналов управлять линейными, угловыми отклонениями оптических сигналов путем изменения положения зеркал. Как правило, изменение параметров оптической системы осуществляется заменой одних зеркал на другие. Помимо того, что такая операция приводит к существенной потере времени, она исключает возможность плавной регулировки оптической системы и предусматривает временное ее отключение. Указанная проблема может быть решена применением пьезоэлектрических и электромагнитных приводов, которые обладают высокой точностью позиционирования и быстродействием (табл. 2.6.).

На рис. 2.7, 2.8 представлены зависимости углового отклонения луча в зависимости от уровня падающей мощности излучения и времени эксплуатации устройства формирования реперных осей и плоскостей.

Таблица 2.6

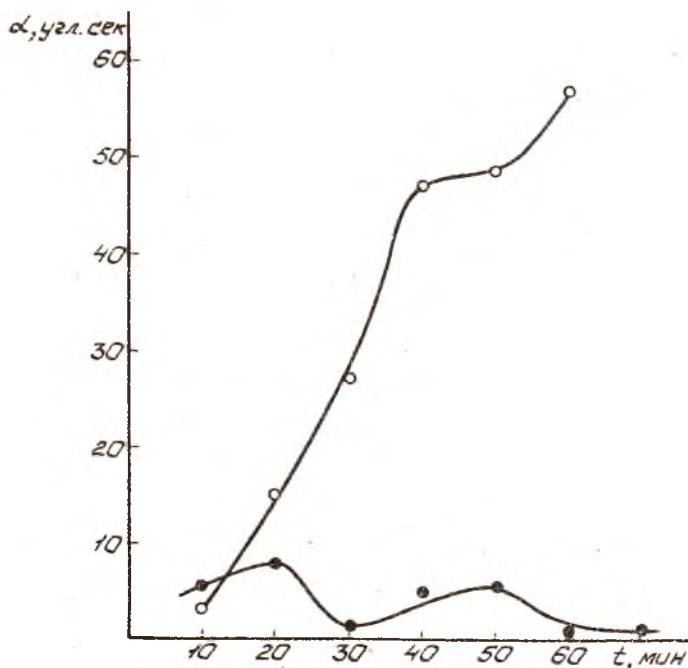
Технические характеристики исполнительных элементов

Принцип действия исполнительного элемента	Точность позиционирования, угл.с	Диапазон регулирования, угл.с	Количество степеней свободы	Быстродействие, с
Пьезоэлектрический	0,3	60	2	0,02
Электромагнитный	0,1	30	2	0,005
Шаговый электродвигатель	0,26	$3 \cdot 10^4$	2	0,1
Магнитоэлектрический	1	240	2	0,01



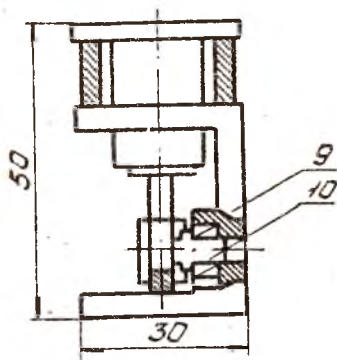
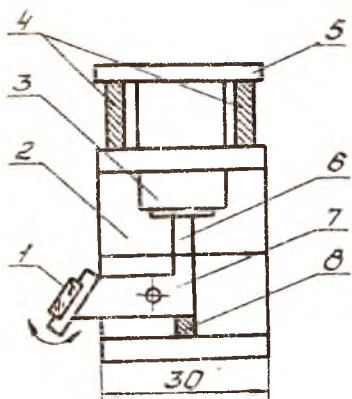
Р и с. 2.7. Точностные характеристики устройства в зависимости от уровня подаваемой мощности излучения

Рассмотренные конструкции исполнительных элементов ОДН имеют недостатки, которые заключаются в следующем: узкий диапазон сканирования в линейном направлении по углу; максимальная чувствительность углового позиционирования ограничена возможностью изготовления тонких пьезокерамических пластин. В корпусе (см. рис. 2.7, а) конструкции для углового позиционирования крепятся подшипник с валиком и пьезо-

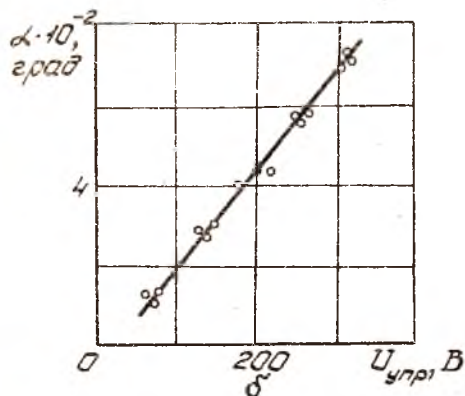


Р и с. 2.8. Временная зависимость углового отклонения луча: ○ - без коррекции; ● - с коррекцией

электрический привод, который с одной стороны фиксируется фиксатором и четырьмя пружинами, а с другой - толкателем. Толкатель в свою очередь фиксирует рычаг с закрепленным на его торце зеркалом. Рычаг имеет возможность совершать круговые движения вокруг оси валика. Работа исполнительного элемента основана на способности изменять длину пьезокерамического элемента посредством изменения управляющего напряжения на его электродах. Изменение напряжения на электродах пьезоэлемента приводит к увеличению его длины или к уменьшению, в зависимости от выбранного начального положения. При этом рычаг под действием толкателя совершает поворот вокруг оси валика, что позволяет отклонять падающий на зеркало лазерный луч на определенный угол (рис. 2.9, б). Длина рычага составляет 20 мм, при перемещении толкателя на 6,5 мм луч отклоняется на $9,3 \cdot 10^{-2}$ град. Корпус исполни-



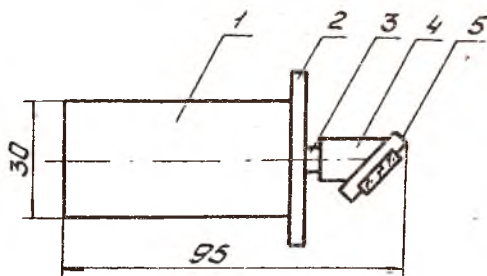
а



Р и с. 2.9. Общий вид пьезокерамического привода угловых перемещений (а) и зависимость перемещений от величины управляющего напряжения (б): 1 - зеркало; 2 - корпус; 3 - пьезокерамика; 4 - пружина; 5 - фиксатор; 6 - толкатель; 7 - рычаг; 8 - пружина; 9 - подшипник; 10 - валик

тельного элемента выполнен из стали 45. Пьезоэлектрический привод состоит из пьезокерамики ЦТС-19 с параметрами: $P = 4 \cdot 10^{22}$ Н/м, $U_{max} = 1500$ В, $\alpha = 2 \cdot 10^6$ В/м.

В устройстве линейного позиционирования (рис. 2.10) основным элементом является пьезоэлектрический привод ЛПД-ЦЗ2-1, на валу которого при помощи штока крепится зеркало. Принцип действия устройства также основан на способности изменять длину пьезокерамического элемента путем изменения на его электродах управляющих напряжений, в связи с чем вал с закрепленными на нем штоками и зеркалом может совершать линейные перемещения относительно начального положения в зависимости от величины U .



Р и с. 2.10. Общий вид пьезокерамического привода линейных перемещений: 1 - пьезокерамический привод ЛПД-ЦЗЗ-1; 2 - фланец; 3 - вал; 4 - шиток; 5 - зеркало

Основные технические характеристики пьезоэлектрического привода ЛПД-ЦЗЗ-1:

Напряжение возбуждения, В	50
Потребляемый ток, А	0,2
Скорость движения, м/с	0,15
Максимальное усилие, Н	7
Максимальный шаг, мм	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Диапазон перемещений, мм	0 - 30
Время пуска и остановки, с	10^{-3}

Координатно-чувствительные датчики положения оси диаграммы на-
поавленности. Существующие позиционно-чувствительные датчики в за-
висимости от принципа действия, положенного в их основу, условно
можно разделить на четыре большие группы: оптико-механические, фо-
тоэлектрические, фотоэлектронные, полупроводниковые.

В случае необходимости регистрации очень малых смещений изобра-
жения лазерного пятна наиболее широкое распространение получили по-
лупроводниковые позиционно-чувствительные фотоприемники, основанные
на использовании одного фотодетектора, как правило, кремниевого фото-
диода. Его чувствительная поверхность разделяется зазором на два или
четыре расположенных рядом фотоэлемента в общей базой. Для измере-
ния смещения относительно линии, примыкающей к двум соседним квадра-
нтам, используется сигнал, образованный как разность сигналов, снимае-
мых с противоположных квадрантов.

Многочисленные примеры использования этих датчиков для измере-
ний малых смещений источника излучения говорят об их высокой эффек-
тивности. Такая угловая чувствительность системы, использующей в ка-

чество датчика квадрантный фотодиод, к лазерному источнику излучения составляет около 10^{-8} рад. На отечественной элементной базе с помощью кремниевого фотодиода ФД-22-КП достигнута стабильность 10^{-6} рад. Погрешность системы с ПЭС датчиком также составила $2,6 \cdot 10^{-6}$ рад. Характеристики многоэлементных фотодиодов приведены в табл. 2.7.

2.3. Влияние среды на погрешность измерений лазерных технологических систем

При использовании в измерениях лазерных технологических систем расстояния между излучателем и приемником, как правило, превышают нескольких сотен метров. Причем часто измерения проводятся внутри лабораторных или производственных помещений, а средой является воздух. Неоднородности среды оказывают возмущающее воздействие на лазерный луч при его распространении. Априорные представления о нем как об идеальной прямой оказываются неверными и нуждаются в корректировке. Поэтому на стадии проектирования необходимо либо сформулировать требования к состоянию воздушной среды на рабочей дистанции, либо исходя из ее состояния оценить погрешности, вносимые средой.

Основными причинами искривления траектории лазерного пучка в среде являются градиенты температур и давлений, которые вызывают флуктуации фазового показателя преломления среды. В воздухе угловые отклонения траектории пучка могут достигать единиц угловых минут, если не предпринимаются специальные меры по выравниванию параметров состояния газа вдоль трассы. Поэтому в настоящем разделе под показателем преломления подразумевается фазовый показатель преломления.

Рассмотрим плоскую задачу, когда имеется постоянный градиент показателя преломления в вертикальной плоскости, обусловленный перепадами температур и давлений. В этом случае траектория параксиального лазерного пучка описывается параболой:

$$y = -\frac{\xi z^2}{2}, \quad (2.1)$$

где ось y направлена вертикально вверх, а ось z — горизонтально, причем она является касательной к траектории лазерного луча в ее начальной точке (рис. 2.11): n_{ξ} — градиент показателя преломления, а n_0 — показатель преломления в начальной точке, т.е. точки с координатами $(0, 0)$.

Тангенс угла α , который составляет траектория пучка с осью z , и является в данном случае погрешностью лазерной технологической системы, обусловленной атмосферой, и определяется производной

Таблица 2.7

Характеристики многоэлементных фотодиодов

Тип фотодиода	Размер фоточувствительного элемента, мм (количество элементов)	Диапазон спектральной чувствительности, мкм	Интранальная чувствительность, А/Вт	Темновой ток $I_{\text{н}}$, нА	Порог чувствительности $I_{\text{п}}$, В	Быстродействие $\tau_{\text{с}}$
ФД-19КК	1x1 (4)	0,5...1,1	4,2 (группа А) 3,8 (группа Б)	0,1	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-6}$
ФД-20КП	2x2 (4)	0,5...1,1	4	0,1	-	$5 \cdot 10^{-6}$
ФД-20-30К	1,5x1,5(2)	0,5...1,1	0,3 А/Вт или 0,9 нА/мм	0,1	-	$1,6 \cdot 10^{-6}$
ФД-20-32К	2x1,35(2)	0,45...1,06	4	0,1	$4 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
ФД-22-КП	1x1 (4)	0,45...1,1	4,4	0,05	-	10^{-6}
ФДК-142	ø 13,7 (4)	0,3...1,1	10	1,5	-	$8 \cdot 10^{-8}$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dz} = -\varepsilon z = -\alpha. \quad (2.2)$$

Из-за малой величины α в равенстве (2.2) $\operatorname{tg} \alpha$ заменен самим углом. Как видим, погрешность зависит не только от градиента показателя преломления, но и от длины дистанции.

Если градиент показателя преломления вдоль трассы известен, то выражение (2.2) может быть непосредственно использовано для оценки погрешностей. Однако экспериментальные определения показателя преломления с высокой точностью требуют уникального оборудования и достаточно трудоемки, поэтому ε получают расчетным путем исходя из таких легко измеримых параметров состояния среды, какими являются температура и давление. Датчики температур и давлений могут быть расставлены вдоль трассы (см. рис. 2.11), что позволяет объективно оценивать погрешности в процессе работы с лазерной технологической системой. Более того, как покажет последующий анализ, при секундных допусках в воздушной среде достаточно ограничиться датчиками температуры.

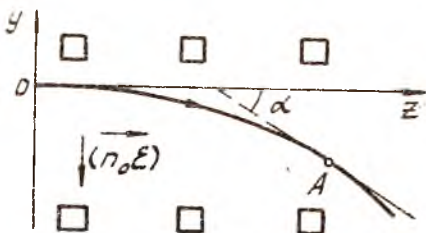


Рис. 2.11. Траектория пучка в среде с градиентом показателя преломления (\bar{n}_0, ε) , направленным вниз: \square - датчики температур и давлений

Рис. 2.11. Траектория пучка в среде с градиентом показателя преломления (\bar{n}_0, ε) , направленным вниз: \square - датчики температур и давлений

ε рассчитывается исходя из формулы Лорентца-Лоренца:

$$A = \frac{RT}{P} \frac{n^2 - 1}{3}, \quad (2.3)$$

где A - молярная преломляющая способность, R - газовая постоянная, T - температура, P - давление.

Замечая, что для газа $n-1 \approx 2$ имеем:

$$n-1 = \frac{3AP}{2RT}. \quad (2.4)$$

В лабораторных условиях при температуре и давлении (298 К и 760 мм рт.ст) $n-1 = 3 \cdot 10^{-4}$, поэтому $3A/(2R) = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ К/мм рт.ст.}$ Если отношение $P(y)/T(y)$ разложить в ряд Тейлора около точки $y_0=0$, то, удерживая лишь члены первого порядка малости, получим

$$\frac{P(y)}{T(y)} = \frac{P_0}{T_0} + \frac{P'_y}{T_0} y - \frac{P_0 T'_y}{T_0^2} y. \quad (2.5)$$

В простейшей модели:

$$n(y) = n_0 + n_0 \epsilon y. \quad (2.6)$$

Подставив (2.6) и (2.5) в (2.4) и, учитывая, что

$$n_0 - 1 = \frac{3AP_0}{2RT_0} = 1,2 \times 10^{-4} \frac{P_0}{T_0}, \quad (2.7)$$

будем иметь выражение для расчета модуля градиента показателя преломления:

$$n_0 \epsilon = \left(1,2 \cdot 10^{-4} \frac{K}{\text{мм рт. ст.}} \right) \frac{P}{T_0} \left(\frac{T'_y}{T_0} - \frac{P'_y}{P_0} \right). \quad (2.8)$$

Тогда искомая погрешность будет описываться формулой:

$$\Delta = \left(1,2 \cdot 10^{-4} \frac{K}{\text{мм рт. ст.}} \right) \frac{P_0 z}{T_0 n_0} \left(\frac{P'_y}{P_0} - \frac{T'_y}{T_0} \right), \quad (2.9)$$

связывающей параметры состояния воздушной среды вдоль трассы с систематической погрешностью лазерной технологической системы, если поправки на искривление траектории пучка не вносятся.

Для приближенных оценок Δ , когда тщательное исследование параметров состояния воздушной среды не планируется, формула (2.9) может быть упрощена, если ввести приращения давлений и температур между начальной и конечной точкой траектории пучка:

$$P'_y z = \Delta P, \quad T'_y z = \Delta T. \quad \text{В лабораторных условиях}$$

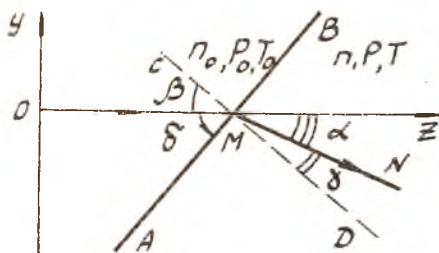
$$P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}, \quad T_0 = 298 \text{ К}, \quad n_0 = 1,0003, \text{ причем}$$

$$\Delta T / T_0 \gg \Delta P / P_0 :$$

$$\Delta = \left(0,242 \frac{\text{угл. с}}{\text{К}} \right) \Delta T. \quad (2.10)$$

Практическая реализация оценок с помощью выражения (2.10) легко осуществима, если при проектировании лазерной технологической системы предусмотреть датчики температур воздуха вблизи излучателя и приемника излучения.

Наряду с плавными изменениями показателя преломления на трассах экспериментально наблюдаются и резкие скачки температур в 2...3 К, а вместе с ними и n . Модель с резким скачком показателя преломления при неблагоприятном расположении границы температурных зон по отношению к траектории пучка дает большее значение углов отклонения, чем модель с востоянным градиентом.



Р и с. 2.12. Ход пучка в модели с резкой границей: OMN — траектория пучка; AB — граница раздела; CD — перпендикуляр к границе раздела; β — угол падения света на границу раздела; γ — угол преломления; α — угол отклонения пучка; δ — угол, характеризующий наклон границы по отношению к начальному направлению распространения пучка

Обратимся к рис. 2.12. Пусть начальное направление пучка также совпадает с осью z . Из закона преломления следует:

$$\frac{\sin \beta}{\sin \delta} = \frac{n_1}{n_0}, \quad (2.11)$$

где β и δ — соответственно углы падения и преломления.

Из рис. 2.12 и геометрических соображений углы β и γ выражаются через угол наклона границы δ и угол отклонения траектории пучка от своего начального направления α :

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \delta; \quad \gamma = \frac{\pi}{2} - (\delta + \alpha). \quad (2.12)$$

Используя тригонометрические преобразования, получим

$$\cos \delta = \frac{n_1}{n_0} \cos(\delta + \alpha). \quad (2.13)$$

Раскладывая

$$\cos(\delta + \alpha) = \cos \delta \cos \alpha - \sin \delta \sin \alpha \quad (2.14)$$

и учитывая малость угла α , т.е. принимая $\cos \alpha = 1$ и $\sin \alpha = \alpha$, получаем

$$\alpha \sin \delta = \left(1 - \frac{n_1}{n_0}\right) \cos \delta. \quad (2.15)$$

Для $\delta \neq 0$

$$\alpha = \left(1 - \frac{n_1}{n_0}\right) \operatorname{ctg} \delta. \quad (2.16)$$

Далее преобразуем

$$1 - \frac{n_1}{n_0} = \frac{(n_1 - 1) - (n_0 - 1)}{n_0}. \quad (2.17)$$

Используя соотношение (2.4) и (2.17), выразим $1 - \frac{n_1}{n_0}$ через перепады давлений и температур:

$$1 - \frac{n_0}{n} = \frac{3A}{2Rn} \left(\frac{P}{T} - \frac{P_0}{T_0} \right). \quad (2.18)$$

В силу малости выражения, стоящего в скобках, заменим его дифференциалом функций (P/T) :

$$\frac{P}{T} - \frac{P_0}{T_0} = \Delta \left(\frac{P}{T} \right)_{P_0, T_0} = \frac{P_0}{T_0} \left(\frac{\Delta P}{P_0} - \frac{\Delta T}{T_0} \right). \quad (2.19)$$

Теперь зависимость (2.16) приобретает вид

$$d = \frac{3A}{2Rn} \frac{P_0}{T_0} \left(\frac{\Delta P}{P_0} - \frac{\Delta T}{T_0} \right) \operatorname{ctg} \delta. \quad (2.20)$$

Зависимость (2.20) имеет вид, аналогичный (2.9), за исключением множителя $\operatorname{ctg} \delta$, который может принимать значения как меньше, так и больше 1, что подтверждает тезис влияния резких изменений показателя преломления на погрешности высокоточных угловых измерений.

При планировании экспериментов с лазерной технологической системой важно получить верхнюю оценку на возможные угловые отклонения пучка в модели с резкой границей. Этому соответствует случай $\delta = 0$. Формальный переход к $\delta = 0$ в (2.20) из-за принятого в (2.16) ограничения $\delta \neq 0$ недопустим, поэтому обратимся вновь к закону преломления (2.11); $\delta = 0$ означает, что $\beta = 90^\circ$. Последнее приводит к простому соотношению

$$\cos d = \frac{n_0}{n}. \quad (2.21)$$

Используя тригонометрическое тождество и малость угла d , имеем

$$\cos 2 \frac{d}{2} = 1 - 2 \sin^2 \frac{d}{2} = 1 - \frac{d^2}{2}. \quad (2.22)$$

Поэтому

$$d = \sqrt{2 \left(1 - \frac{n_0}{n} \right)}. \quad (2.23)$$

Еще раз воспользовавшись преобразованиями (2.17), (2.18), (2.19), приходим к следующей верхней оценке угла d :

$$d = \sqrt{2 \frac{3A}{2Rn} \frac{P_0}{T_0} \left(\frac{\Delta P}{P_0} - \frac{\Delta T}{T_0} \right)}. \quad (2.24)$$

или, проведя замену $3A/(2R) = 1,2 \cdot 10^{-4}$ К/мм рт.ст., $n \approx 1$, $P_0 = 760$ мм рт.ст., $T = 298$ К, $\Delta T/T_0 \gg \Delta P/P_0$, для приближенных числовых оценок d получаем простое выражение

$$\alpha = \left(1,41 \cdot 10^{-3} \frac{\rho \alpha_0}{K^{1/2}} \right) \sqrt{\Delta T} = \left(294 \frac{\mu \lambda_0 c}{K^{1/2}} \right) \sqrt{\Delta T} . \quad (2.25)$$

Как видим, разность температур всего в 1 К может приводить к отклонениям пучка на единицы угловых минут.

Верхняя оценка для α представляет собой описание явления полного внутреннего отражения на границе двух сред. Рассматриваемая геометрия в расположении траектории пучка и границы раздела может реализовываться, когда лазерный пучок распространяется над нагретой панелью прибора, вблизи теплового экрана и т.п. При этом можно предсказать и такие явления, как неоднородные отклонения различных зон в поперечном сечении пучка, что приведет к перераспределению плотности мощности по сечению, т.е. к искажению формы пучка.

Таким образом, исходя из допустимых отклонений траектории с помощью выражений Д (2.9), (2.10), (2.20), (2.24) или (2.25), выработаются требования к параметрам состояния среды вдоль трассы. Другой вывод, который может быть сделан из рассмотренной модели, состоит в необходимости: а) исследования с помощью датчиков распределений температур и давлений; б) последующих оценок на базе экспериментального материала погрешностей или поправок; в) разработки плана мероприятий по снижению уровней дестабилизирующих факторов.

Следует помнить, что на показатель преломления воздуха наряду с температурой и давлением в производственных условиях могут влиять примеси газов и паров, содержание которых в стандартной атмосфере пренебрежимо мало. Параметры стандартной атмосферы на среднем уровне моря следующие:

давление $P_c = 1013250$ Па;

температура $T_c = 288,15$ К;

плотность $\rho_c = 1,2250$ кг/м³;

фазовый показатель преломления $n_c = 1,000292$.

Так, для $\lambda = 589,3$ Н·м; $n_{N_2O}(P_c, T_c) = 1,000515$, $n_{CO_2}(P_c, T_c) = 1,001768$; $n_s(P_s, T_s) = 1,001111$.

Применение лазерных технологических систем связано с измерениями малых деформаций и смещений, где эталоном или мерой служит длина волны электромагнитного излучения. Длина электромагнитной волны в среде λ определяется фазовым показателем преломления n (он входит и в закон преломления (2.11)):

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} , \quad (2.26)$$

где λ_0 - длина волны в вакууме.

Фазовый показатель преломления сухого воздуха зависит от длины волны и при стандартных условиях в видимом и ближнем ИК-диапазонах может быть рассчитан с помощью выражения

$$n_{15,760} = 1 + \frac{1}{10^6} \left(64,348 + \frac{29498,1}{446 - 10^6/\lambda_0^2} + \frac{255,4}{41 - 10^6/\lambda_0^2} \right), \quad (2.27)$$

где λ_0 нужно представлять в н.м.

Для других температур и давлений существует формула пересчета

$$n_{t,p} = (n_{15,760} - 1) \times \frac{P[1 + (1,049 - 0,015t) \cdot 10^6 P]}{720,883(1 + 0,003661t)}, \quad (2.28)$$

где P - в мм рт.ст., а t - в градусах Цельсия.

В импульсных светоизмерителях роль фундаментальной постоянной выполняет групповая скорость света v_g , величина которой в вакууме совпадает с фазовой $c = 299792456,2$ м/с. Групповая скорость света в воздухе будет меньше, чем в вакууме. Уменьшение групповой скорости в воздухе характеризуется групповым показателем преломления n_g :

$$v_g = \frac{c}{n_g}. \quad (2.29)$$

На величину группового показателя преломления большое влияние оказывает присутствие в воздухе водяных паров. Влияние влажности на величину группового показателя преломления учитывает эмпирическая формула

$$(n_g - 1) \cdot 10^8 = D_s \left(2371,34 + 68393,7 \frac{130 + \sigma^2}{130 - \sigma^2} + 4547,3 \frac{38,9 + \sigma^2}{38,9 - \sigma^2} \right) + D_w (648,317 + 174,174\sigma^2 - 3,5575\sigma^4 + 0,61957\sigma^6). \quad (2.30)$$

Здесь D_s и D_w вклад сухого воздуха и водяного пара соответственно:

$$D_s = \frac{P_s}{T} \left[1 + P_s \left(37,9 \cdot 10^{-8} - \frac{9,325 \cdot 10^4}{T} + \frac{0,25844}{T^2} \right) \right], \quad (2.31)$$

$$D_{\omega} = \frac{P_{\omega}}{T} \left[1 + P_{\omega} (1 + 3,7 \cdot 10^{-4} P_{\omega}) \left(-2,37321 \cdot 10^{-3} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2,29366}{T} + \frac{710,792}{T^2} + \frac{7,75141 \cdot 10^4}{T^3} \right) \right], \quad (2.32)$$

где $\sigma = 1/\lambda_0$ - волновое число в вакууме; P - парциальное давление сухого воздуха; P_{ω} - парциальное давление водяных паров.

В эмпирических формулах (2.30), (2.31), (2.32) единицы измерения: давление - мбар, температура - К, λ_0 - мкм.

Для практического применения громоздких выражений (2.27), (2.28) и (2.30)-(2.32) целесообразно разработать программы для ЭВМ. Пример программы расчета фазового показателя преломления, фазовой скорости света и длины волны на языке Вейсик и результаты ее работы приведены в приложении 4.

При запуске программы необходимо ввести: длину световой волны в вакууме, давление воздуха, температурный интервал и приращение температур.

Пример программы расчета группового показателя преломления и групповой скорости света и результаты ее работы приведены в приложении 5-8.

Когда погрешности, вызванные атмосферными условиями, превышают допустимые значения, следует переходить к измерениям в вакууме. Реализация вакуумных измерений осуществима, например, для изделий космического назначения, так как испытания в термобарокамерах являются необходимым этапом их предполетной подготовки.

2.4. Лазерная технологическая система для измерения деформаций крупногабаритных изделий

Оценка деформаций изделий под влиянием эксплуатационных нагрузок является одной из актуальных технических проблем, решение которой сопутствует всем стадиям жизненного цикла изделия - от проекта до серийного образца и изменения его характеристик в процессе функционирования. Если на стадии проектирования преобладают расчетные и модельные оценки, то уже создание опытного образца сопровождается, как минимум, разработкой методик его испытаний, в том числе и на деформации.

В настоящее время аэрокосмические комплексы наблюдения за земной поверхностью представляют собой прибыльную ветвь космической индустрии. Естественно стремление разработчиков аппаратуры наблюдения

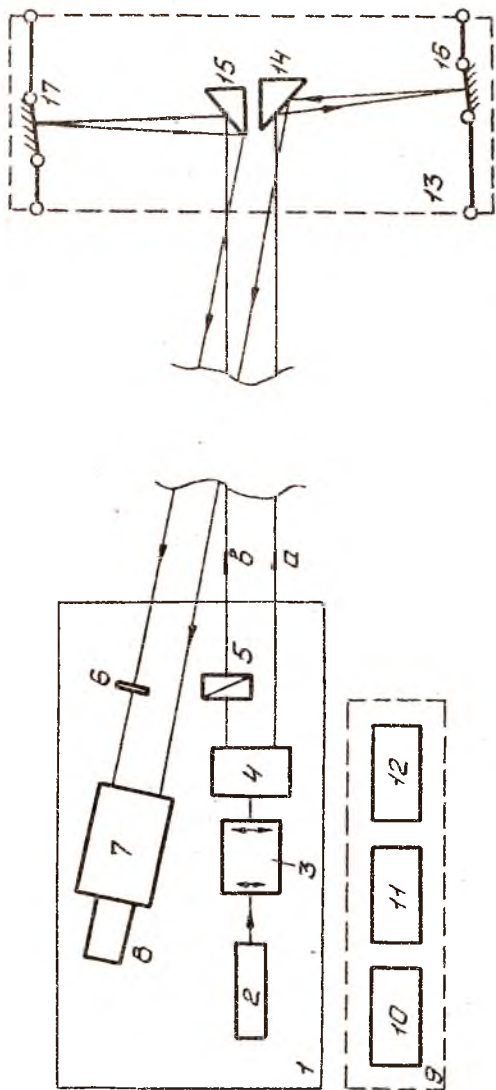
к повышению ее разрешающей способности и уменьшению погрешностей привязки координат наблюдаемого участка поверхности к земным или звездным ориентирам. Совершенство аппаратуры наблюдения заключается не только в элементной базе, но и в стабильности формы корпусной ее части, подвешиваемой как механическим, так и температурным воздействием. Другое решение деформационных задач состоит в прогнозировании смещений с тем, чтобы иметь возможность ввести соответствующие поправки в алгоритм восстановления изображений.

Для исследования термомеханических деформаций крупногабаритных изделий с характерным размером ~ 10 м была спроектирована лазерная технологическая информационно-измерительная система, базирующаяся на триангуляционных методах измерения смещений. Принцип ее функционирования состоит в том, что с сечениями корпусной части изделия, смещения между которыми необходимо измерить, жестко связаны зеркала. Смещения сечений вызывают смещения зеркал, а вместе с ними направлений распространения лазерных пучков, отраженных зеркалами.

Оптическая схема прибора приведена на рис. 2.13. Источником света служит гелий-неоновый лазер ЛГН-2С1 с высокочастотной накачкой и непрерывной мощностью излучения 1 мВт в режиме ТЕМ₀₀. Диаметр пучка лазерного излучения по уровню 0,9 мощности составляет 1,3 мм на расстоянии 0,5 м от торца лазера. Расходимость пучка на уровне 0,9 мощности $\leq 1,5 \cdot 10^{-3}$ рад. От лазеров с разрядом на постоянном токе он выгодно отличается низким напряжением электропитания (≤ 27 В) и малыми уровнями создаваемых электропомех, что важно для работы электронных схем обработки изображений.

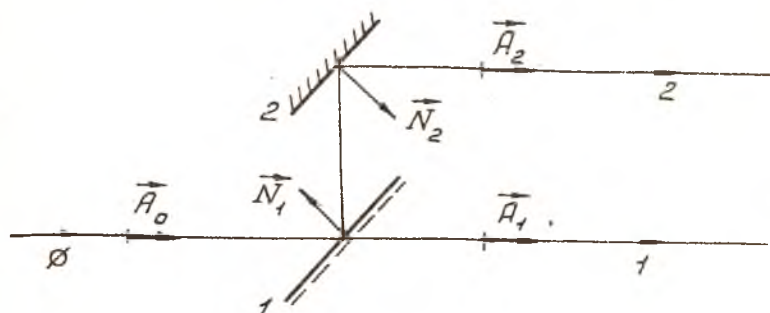
С помощью двухлинзового коллиматора пучок расширяется. Малая линза имеет подвижку вдоль оптической оси с целью минимизации диаметра пучка на приемном объективе, а следовательно, и вдоль всей трассы. Далее по ходу пучка расположен расщепитель 4. В базовом варианте прибора применяется двухзеркальный расщепитель пучка, одно из зеркал которого полупрозрачно. Поляризатор служит для выравнивания интенсивностей пучков.

Далее оба пучка через отверстие попадают внутрь корпусной части изделия и поворачиваются пентапризмами на 90° . Здесь используется свойство пентапризм поддерживать 90° ориентацию пучков при небольших угловых смещениях самой пентапризмы, которые могут иметь место, так как пентапризмы также закреплены на корпусной части. После отражения от зеркал, и расположенных на торцах изделия, лучи попадают в поле зрения объектива, который формирует изображение на фоточувствительном слое ПЗС-матрицы.



Р. к. с. 2, 13. Схема лазерной технологической системы для измерения пероформации крупнообработанных изделий: 1 - оптико-электронный блок; 2 - лазер ЛДП-202; 3 - коллиматор; 4 - расщепитель пучка; 5 - поляризатор; 6 - линза; 7 - делитель; 8 - ПС; 9 - телемер КТМ-1; 10 - электронный блок; 11 - блок ввода-вывода изображений; 12 - микросхемы ДВК-2; 13 - источник питания; 14, 15, 16, 17 - зеркала

Можно показать, что принятая оптическая схема нечувствительна к малым флуктуациям ОДН, т.е. взаимная ориентация пучков сохраняется и угловое смещение их друг относительно друга зависит лишь от взаимного углового смещения зеркал.



Р и с. 2.14. Светоделитель, собранный из двух зеркал: ϕ – первоначальный луч; 1 – траектория преломленного луча; 2 – траектория отраженного луча

Рассмотрим пример со светоделителем, собранным из двух зеркал, первое из которых полупрозрачное (рис. 2.14). Пренебрегаем преломлением луча в полупрозрачном зеркале и будем считать, что пучки параллельны. Ориентацию пучков и нормалей к зеркалам зададим соответствующими единичными векторами – ортами $\vec{A}_0, \vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{N}_1$ и \vec{N}_2 . Так как $|\vec{A}_0| = |\vec{A}_1| = |\vec{A}_2| = 1$, то угол между лучами φ можно найти через значение его косинуса:

$$\cos \varphi = (\vec{A}_1, \vec{A}_2) = (\vec{A}_0, \vec{A}_2). \quad (2.33)$$

Орт второго луча, который образуется в результате двух отражений пучка, выражается через орт начального пучка следующим образом:

$$\vec{A}_2 = \vec{A}_0 \cos 2\sigma + 2\vec{p}(\vec{A}_0, \vec{p}) \sin^2 \sigma - [\vec{A}_0, \vec{p}] \sin 2\sigma, \quad (2.34)$$

где \vec{p} – орт направления ребра, образованного пересечением плоскостей зеркал; σ – угол между зеркалами, причем

$$\vec{p} = -\frac{[\vec{N}_1, \vec{N}_2]}{\sin \sigma}; \quad \cos \sigma = -(\vec{N}_1, \vec{N}_2). \quad (2.35)$$

Чтобы найти угол φ между пучками, воспользуемся выражениями (2.33) и (2.34):

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= (\vec{A}_0 \vec{A}_0) \cos 2\delta + 2(\vec{A}_0 \vec{p})(\vec{A}_0 \vec{p}) \sin^2 \delta - ([\vec{A}_0 \vec{p}] \vec{A}_0) \sin 2\delta = \\ &= \cos 2\delta + 2(\vec{p} \vec{A}_0)^2 \sin^2 \delta, \end{aligned} \quad (2.36)$$

так как $(\vec{A}_0 \vec{A}_0) = |\vec{A}_0|^2 = 1$, $([\vec{A}_0 \vec{p}] \vec{A}_0) = 0$.

Поскольку \vec{p} и \vec{A}_0 — орты, то, обозначив угол между ними ψ , будем иметь

$$(\vec{p} \vec{A}_0)^2 = \cos^2 \psi. \quad (2.37)$$

Флуктуации ОДН и есть флуктуации угла ψ . Тогда можно представить ψ в виде суммы

$$\psi = \psi_0 + \Delta\psi, \quad (2.38)$$

где ψ_0 — среднее значение угла между \vec{p} и \vec{A}_0 ; $\Delta\psi$ — амплитуда флуктуаций.

Воспользовавшись выражением для косинуса суммы двух углов, получаем

$$(\vec{p} \vec{A}_0)^2 = \cos^2 \psi_0 \cos^2 \Delta\psi - \frac{1}{2} \sin^2 \psi_0 \sin 2\Delta\psi + \sin^2 \psi_0 \sin^2 \Delta\psi. \quad (2.39)$$

Так как флуктуации ОДН гелий-неоновых лазеров не превышают 1 угл. мин, то можно принять $\cos \Delta\psi \approx 1$, $\sin 2\Delta\psi \approx 2\Delta\psi$ и $\sin^2 \Delta\psi \approx 0$. Тогда

$$\cos \varphi = \cos 2\delta + 2\cos^2 \psi_0 \sin^2 \delta - 2\sin 2\psi_0 \sin^2 \delta \Delta\psi. \quad (2.40)$$

Проанализируем выражение (2.40). Видно, что флуктуации ОДН (угол $\Delta\psi$) в первые два слагаемых не входят. Третье же слагаемое при установке светоделительных зеркал в параллельное состояние с погрешностью не более 1 угл. мин, т.е. угла между векторами $180^\circ - \epsilon < (\vec{N}_1, \vec{N}_2) < 180^\circ + \epsilon$, имеет величину равную $3 \cdot 10^{-11}$. Таким образом, в принятой оптической схеме светоделителя $\cos \varphi$ флуктуирует с амплитудой меньше, чем $3 \cdot 10^{-11}$. Следовательно, несмотря на флуктуации ОДН, лучи 1 и 2 остаются параллельными друг другу.

В дальнейшем необходимо выявить возникновение разъюстировки оптической схемы из-за нестабильности пространственного положения ОДН, зависящей от каждого оптического элемента. Если какой-то из оптических элементов окажется чувствительным к флуктуациям ОДН, то следует либо подобрать его нечувствительный аналог, либо стабилизировать положение ОДН лазерного излучателя.

Алгоритм измерений взаимных угловых смещений пучков следующий. ПЗС-матрица располагается в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием F . При таком расположении угловые смещения пучков $\Delta\varphi$ преобразуются в линейные Δl . Связь между угловыми и линейными смещениями задается простым соотношением

$$\Delta l = F \Delta\varphi.$$

В принципе возможны как параллельная, так и последовательная схемы формирования опорного и измерительного пучков на фоточувствительном слое ПЗС-матрицы. Преимущества последовательной схемы: большой динамический диапазон по пространству, включающий все поле зрения и простое программное обеспечение, так как обрабатывается кадр, на котором запечатлен лишь один пучок. Основной недостаток последовательной схемы — ограничения временного частотного спектра флуктуаций ОДН длительностью двух последовательных кадров, что в телевизионном стандарте составит 12,5 Гц или 80 мс. В параллельной схеме, наоборот, возникают сложности в пространственном разделении пучков, хотя время съема информации ограничено длительностью лишь одного кадра.

В разработанной лазерной технологической системе для измерения деформаций крупногабаритных изделий была принята последовательная схема. Заслонка 6 поочередно (см. рис. 2.12) перекрывает при измерениях один из двух пучков. За координаты пучков в системе отсчета, связанной с ПЗС-матрицей, принимаются координаты их энергетических центров, так как положение энергетических центров может быть определено с погрешностью меньшей, чем размер одного фоточувствительного элемента ПЗС-матрицы.

Если измерять координаты пучков с точностью по размеру одного фоточувствительного элемента, то для используемой в лазерной системе ПЗС-матрицы К1200ПМ7 с фоточувствительной ячейкой 24×21 мкм и объективом МТО-11СА ($F = 1000$ мм) будем иметь угловое разрешение $(24 \cdot 10^{-3}) : 10^{-3}$ порядка 5 угл.с. Последнее значение сравнимо с разрешением визуальных измерений, хотя сохраняются преимущества объективности и отсутствия марок специального вида.

Координаты энергетического центра рассчитываются с помощью выражений

$$x_0 = N_x \frac{m_{10}}{m_{00}}; \quad y_0 = N_y \frac{m_{01}}{m_{00}}, \quad (2.41)$$

где N_x и N_y — максимальное число отсчетов вдоль соответствующих

осей координат; m_{00}, m_{10}, m_{01} - двумерные моменты распределения плотности мощности лазерного излучения в изображении.

Под двумерным моментом понимается величина вида

$$m_{pq} = \frac{1}{T_x^{p+1} T_y^{q+1}} \iint_S x^p y^q \mathcal{J}(x, y) dx dy, \quad (2.42)$$

где $\mathcal{J}(x, y)$ - распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка; S - площадь области, в которой значения $\mathcal{J}(x, y) \geq R$ (R - порог чувствительности средства измерения); T_x, T_y - максимальные размеры области S вдоль соответствующих осей координат.

Оценка значения величины m_{pq} с помощью матричного фотоприемника определяется соотношением

$$\hat{m}_{pq} = \frac{1}{N_x^{p+1} N_y^{q+1}} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{\ell=1}^{N_y} k^p \ell^q \hat{\mathcal{J}}(k, \ell), \quad (2.43)$$

где N_x, N_y - максимальное число отсчетов вдоль соответствующих осей координат; k, ℓ - номер отсчета в соответствующем направлении; $\hat{\mathcal{J}}(k, \ell)$ - значение интенсивности света на элементе с номером (k, ℓ) .

У матрицы K1200M7 имеется квадратный растр с числом $N_x = N_y = N = 256$. Физический смысл момента нулевого порядка m_{00} - средняя освещенность матричного фотоприемника, т.е.

$$m_{00} \approx \hat{m}_{00} = \frac{\mathcal{J}_0}{N^2}, \quad (2.44)$$

где \mathcal{J}_0 - интенсивность излучения, попадающая на фотоприемник.

Если сделать естественное предположение, что энергетический центр расположен вблизи центральной части растра, т.е. точки с координатами $k = \ell = N/2$, то

$$m_{10} = m_{01} \approx \hat{m}_{10} = \hat{m}_{01} = \frac{\mathcal{J}_0}{2N^2}. \quad (2.45)$$

Среднее квадратичное отклонение измеренных координат энергетического центра от его истинного положения для координаты определяется (для координаты y аналогично):

$$S_{x_0}^2 = \left(\frac{N_x}{m_{00}} \right)^2 S_{10}^2 + \left(\frac{m_{10}}{m_{00}^2} N_x \right)^2 S_{00}^2 - \frac{m_{10}}{m_{00}^3} N_x^2 k [m_{10}, m_{00}], \quad (2.46)$$

$$S_{10}^2 = \frac{\sigma^2(N_x+1)(2N_x+1)}{6N_x^3 N_y} + \frac{\mathcal{J}_R^2}{6N_x^2 N_y^2} \left[N_y + \frac{(N_x+1)(2N_x+1)}{2N_x} \right]; \quad (2.47)$$

$$S_{00}^2 = \frac{\sigma^2}{N_x N_y} + \frac{J_R(N_x + N_y)}{6N_x^2 N_y^2};$$

$$K[m_{10}, m_{00}] = \frac{\sigma^2(N_x + 1)}{2N_x^2 N_y^2}. \quad (2.48)$$

В выражениях (2.46) - (2.48):

S_{10} - среднее квадратичное отклонение в измерении момента m_{10} ;

S_{00} - то же для момента m_{00} ; σ - средняя квадратичная погрешность измерения интенсивности в точке, т.е. погрешность измерения интенсивности одним элементом матричного фотоприемника; J_R - порог чувствительности матричного преобразователя.

Упростим выражения (2.46) - (2.68) путем подстановок:

$$N_x = N_y = N, \quad N_x + 1 \approx N, \quad 2N_x + 1 \approx 2N, \quad (2.49)$$

так как $N = 256 \gg 1$. Кроме того, предполагаем, что интенсивность нормирована на единицу, т.е.

$$\hat{J}_{\max}(k, l) = 1, \quad (2.50)$$

а число уровней квантования сигнала с каждого элемента ПЭС-матрицы равно M . Тогда можно принять

$$\sigma = J_R = \frac{1}{M}. \quad (2.51)$$

В упрощенной форме выражения (2.46) - (2.48) примут следующий вид:

$$S_{10}^2 \approx \frac{1}{M^2} \left(\frac{1}{3N^2} + \frac{1}{3N^3} \right) \approx \frac{1}{3M^2 N^2}; \quad (2.52)$$

$$S_{00}^2 \approx \frac{1}{M^2 N^2}; \quad (2.53)$$

$$K[m_{10}, m_{00}] \approx \frac{1}{2M^2 N^2}. \quad (2.54)$$

Подставив (2.52) - (2.54) в (2.46), получим:

$$S_{x0}^2 = \frac{1}{3M^2} \left(\frac{N^2}{J_0} \right)^2.$$

Частное \mathcal{J}_0/N^2 представляет собой среднюю освещенность одного фоточувствительного элемента фотоприемника. Учитывая условие нормы — ровки (2.51), считаем, что средняя освещенность одного фоточувствительного элемента составляет 0,5 от максимальной, т.е. $\mathcal{J}_0/N^2 = 0,5$, что не нарушает общности рассуждений. В итоге имеем

$$S_{x_0} = \frac{2}{\sqrt{3} M} \quad (2.56)$$

Таким образом, повышая разрешение по интенсивности каждого фоточувствительного элемента, получаем выигрыш в погрешности измерения координат энергетического центра пучка. Если при бинарной обработке $M = 2$ и $S_{x_0} \approx 1$, то восприятие 4,8 или 16 градаций интенсивности улучшает пространственное разрешение положения энергетического центра до долей одной ячейки ПЗС-матрицы.

Следовательно, при проектировании лазерных технологических систем с объективной регистрацией световых полей целесообразно закладывать многоградационную обработку сигнала, повышая пространственное разрешение за счет яркостного.

В разработанной в СИАУ лазерной технологической системе быстродействующий АЦП КТ108.ВВ1 в телевизионном стандарте частот смены кадров реализует $M = 8$. Тогда согласно выражению (2.56) имеем $S_{x_0} = 0,14$, $\Delta l = 24$ мкм. $S_{x_0} = 3,5$ мкм, что с объективом МТ0-ИІСА ($F = 1000$ мм) позволило достичь субсекундного разрешения в измерении угловых деформаций крупногабаритных изделий.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Условные обозначения	3
Введение	5
1. Принципы построения лазерных систем	6
1.1. Классификация лазерных систем	6
1.2. Генерация и детектирование лазерных сигналов	8
1.3. Отражательные характеристики целей	36
1.4. Прохождение лазерного излучения через среды	55
2. Проектирование технологических лазерных систем	66
2.1. Системы с опорной линией	71
2.2. Системы с опорной плоскостью	76
2.3. Влияние срезы на погрешность измере- ний лазерных технологических систем	103
2.4. Лазерная технологическая система для из- мерения деформаций крупногабаритных изделий	111

Учебное издание

М о р д а с о в Василий Иванович
Г р и ш а н о в Владимир Николаевич

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ
АВИАЦИОННОГО И КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

(Часть I)

Учебное пособие

Редактор Л.Я.Чеголаева
Техн.редактор Г.А.Усачева
Корректор Н.С.Куприанова

Лицензия ЛР № 020301 от 28.II.91 г.

Подписано в печать 18.03.96 . Формат 60x84 I/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 6,97. Усл.кр.-отт. 7,09. Уч.-изд.л. 7,2.

Тираж 300. Заказ 89.

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П.Королева.

443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство СГАУ.

443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.