

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 II)

Учебное пособие

Самара 1995

УДК 621.378:681.5:528.5

Проектирование лазерных систем авиационного и космического назначения: Учеб. пособие в 2 ч. Ч. 2 / В. И. Мордашов, В. Н. Гришанов; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1995. 171 с.

ISBN 5-230-16981-8

Подробно освещено содержание обязательных разделов дипломного и курсового проектирования лазерных систем навигационного, локационного и лидарного типов: оптических систем передающих и приемных устройств, определения мощности принимаемого сигнала, модуляторов, сканеров, отыскания режимов работы и выбора конструкции лазера. Большое внимание уделено анализу вероятности возникновения ошибок информационных параметров лазерных систем. Рассмотрены условия устойчивости сопровождения целей локационными системами. Изложен порядок проектирования лидаров климатического мониторинга и экологического контроля. Описан порядок выбора характеристик нестандартной базы лазерных систем: порога чувствительности оптико-электронных преобразователей, оптических элементов и объектов различного назначения.

Предназначено для студентов факультета двигателей, выполняющих дипломный и курсовой проекты по специальности "Лазеры", инженеров машиностроительных предприятий, конструкторов авиационной и космической техники, слушателей ФПК. Подготовлены на кафедре АСЭУ.
Табл. 17. Ил. 71. Библиог.: 31 назв.

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

Рецензенты: А.Н.Бекренев, В.В.Котляр

ISBN 5-230-16981-8



Самарский государственный аэрокосмический ун-т, 1995

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ*

3.1. Лазерные гироскопы

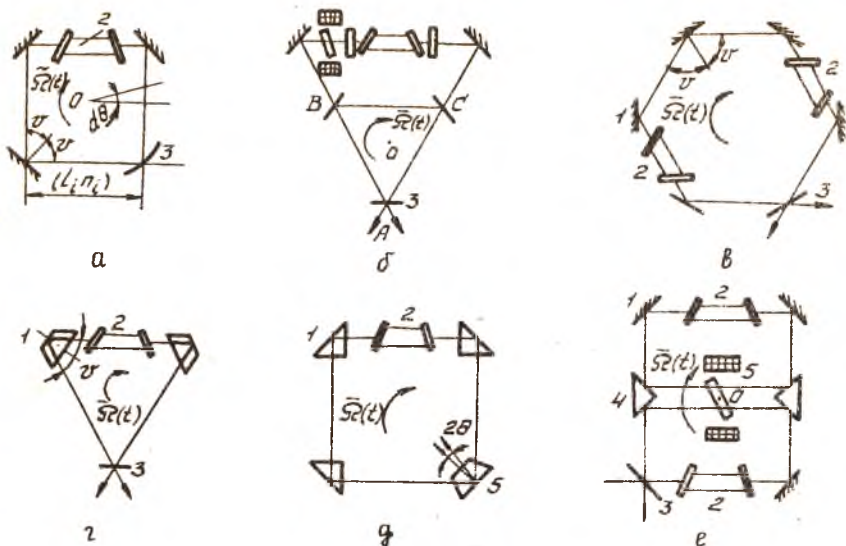
Выходная характеристика. В лазерном гироскопе (ЛГ) носителем информации об угловой скорости относительно инерциального пространства являются электромагнитные колебания, параметры которых изменяются в зависимости от величины и направления вращения. Если кольцевому резонатору (рис. 3.1), частично или полностью заполненному активной средой, передавать вращение с угловой скоростью $\Omega(t)$, то в замкнутом контуре по общему генерационному каналу уже кольцевого оптического квантового генератора (КОКГ) будут распространяться две встречные волны излучения с разными угловыми скоростями: $\omega_1 = \omega_0 + \Omega(t)$; $\omega_2 = \omega_0 - \Omega(t)$, причем угловая скорость светового пучка в резонаторе много больше угловой скорости вращения самого резонатора, $\omega_0 \gg \Omega(t)$. Создавая условия для интерференции части энергии встречных световых пучков в специальном оптическом смесителе, направим суммарный пучок излучения на квадратичный фотодетектор. На выходе из системы получим разностную частоту биений в виде последовательности импульсов, частота которых пропорциональна проекции вектора угловой скорости $\vec{\Omega}(t)$ на нормаль к плоскости распространения встречных волн:

$$F_p = 4S\Omega(t)\cos\beta/(\lambda_0 L_p) = K_{gx}\Omega(t)\cos\beta, \quad (3.1)$$

где S - площадь кольцевого резонатора, см^2 ; L_p - периметр резонатора, см ; β - угол наклона вектора угловой скорости вращения КОКГ относительно нормали к контуру, рад .

Отсюда следует, что разностная частота на выходе линейно зависит от угловой скорости $\Omega(t)$ с масштабным коэффициентом $K_{gx} = 4S/(\lambda_0 L_p) = \text{const}$, т.е. происходит явление, называемое в физике эффектом Саньяка: сдвиг интерференционной картины в результате сложения направленных навстречу друг другу лучей от источника, размещенного на вращающемся основании. Это идеальная картина, которая показывает, что основным достоинством КОКГ является практически линейная статическая характеристика. На самом деле случайные изменения размеров резонатора, анизотропия плазмы, флуктуация и взаимная связь встречных волн и, наконец, изменение внешних условий приводят к расстройке резонатора, к нестабильности параметров КОКГ. Все это в конечном счете сказывается на чувствительности и точности измерения $\vec{\Omega}(t)$. Особенно это заметно, когда необходимо

* Материалы главы составлены при участии д.т.н., проф. Сухова Г.М.



Р и с. 3.1. Оптические схемы основных типов кольцевых резонаторов: а - четырехзеркальный с активной средой; б - треугольный без активной среды в основном контуре; в - многозеркальный с активной средой; г - треугольный призмный с активной средой; д - четырехпризмный с активной средой; е - дифференциальный: 1 - зеркало (призма); 2 - кювета с активной средой; 3 - выходное зеркало; 4 - элемент связи; 5 - элемент разности частот (невзаимный элемент); ν - угол падения фронта волны; $(l_i n_i)$ - оптическая длина i -го участка резонатора

измерить малые угловые скорости, т.е. когда частоты встречных волн могут быть близкими. В этом случае наблюдается явление синхронизации, увеличения или захвата частот, которое ограничивает некоторую область нечувствительности КОКГ к угловой скорости или так называемую зону захвата ($2\Omega_0$). Зависимость разностной частоты от $\Omega(t)$ с учетом расстройки резонатора в окрестности зоны захвата можно представить в следующем виде:

$$F_p = K_{ex} \sqrt{\Omega^2(t) - \Omega_0^2} \quad (3.2)$$

Это уравнение является статической или выходной характеристикой (ВХ) лазерного гироскопа. Постоянная $K_{ex} = 4S/(\lambda_0 L_p)$ является крутизной ВХ. На рис. 3.2 кривая 2 изображает расчетную ВХ, описываемую уравнением (3.2). Реальная ВХ находится в заштрихованной области 3, так как разностная частота на выходе КОКГ является функцией его параметров: относительной разности добротностей (разнодобротности) для встречных из-

лучений $\Delta Q_{1,2}$, расстройки резонатора $\{\nu\}_{1,2}$ относительно положения резонансной частоты генерации на доплеровском контуре усиления, разности интенсивности встречных излучений $\Delta I_{1,2}$, ширины спектральной линии излучения δ_ν и ширины резонансной кривой резонатора

$\Delta \nu_p$, дрейфа частиц активной среды, величины давления газовой смеси и ее компонентов, модового состава излучения и др. Кроме наличия значительной зоны нечувствительности, реальная ВХ характеризуется сдвигом угловых скоростей (дрейфом) $\Omega_{гр}$ и отклонением крутизны характеристики K_B от идеальной величины $4S/(\lambda_0 L_p)$. Например, для современных ЛГ с периметром

$L_p = 100$ см, работающих на длине волны $\lambda_0 = 0,63$ мкм, величина зоны захвата $2\Omega_0 \approx 15 \cdot 10^{-4}$ рад/с, а дрейф $\Omega_{гр} \approx (1 \dots 1,5) \cdot 10^{-7}$ рад/с. Минимальная величина зоны захвата тщательно выполненных КОКГ составляет 50...100 Гц. На рис. 3.2 показана петля гистерезиса ВХ, обусловленная зависимостью разности показателей преломления и коэффициентов рассеяния встречных излучений ($\Delta n_{1,2}, \Gamma_{1,2}$) от состояния плазмы в резонаторе КОКГ. Гистерезис проявляется в том, что выход из зоны захвата происходит при большем значении $\Omega(t)$, чем вход в эту зону: $\Omega'_0 > \Omega_0$.

Диапазон измеряемых угловых скоростей определяется соотношением

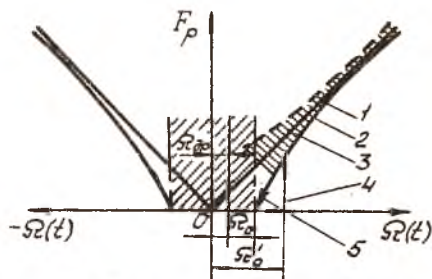
$$\Omega_{\max} - \Omega_{\min} \leq \frac{c\lambda}{16S}, \quad (3.3)$$

где $\Omega_{\min} \approx \Omega_0$ - половина зоны захвата; например, для ЛГ с площадью резонатора $S = 100$ см² и $\lambda = 0,6 \cdot 10^{-4}$ см, $\Omega_{\max} - \Omega_{\min} \approx 1100$ рад/с.

Нелинейность ВХ определяют по изменению величины масштабного коэффициента (крутизны ВХ). При изменении $\Omega(t)$ определяют относительное изменение крутизны ВХ:

$$h_0 = \frac{\Delta K_{B_0}}{K_{B_0}} = \frac{(F_n - F_p) \sqrt{F_n^2 - F_0^2}}{F_n \sqrt{(F_n - F_p)^2 - F_0^2}} - 1, \quad (3.4)$$

где $K_{B_0} = 4S/(\lambda_0 L_p)$ - крутизна ВХ в точке разнеса частот; F_0 - резонансная частота, соответствующая зоне захвата; F_n - частота подставки (разнеса частот).



Р и с. 3.2. Выходные характеристики (ВХ) лазерного гироскопа: 1 - идеальная; 2 - расчетная; 3 - область возможного нахождения реальной ВХ; 4 - гистерезис ВХ; 5 - зона захвата

Для типовых ЛГ нелинейность ВХ составляет менее 10^{-4} при измерениях $\Omega(t)$ в пределах $5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^3$ рад/с. Поскольку на выходе КОКГ время распространения, фаза, интенсивность и частота встречно бегущих волн зависят от угловой скорости, то все существующие ЛГ можно классифицировать как по параметру выходного электромагнитного поля, так и по типу измерительного устройства, определяющего тот или иной информативный параметр.

Имеются четыре основных типа ЛГ: временные, фазовые, амплитудные и частотные. Практический интерес представляет частотный ЛГ с прямоугольным резонатором КОКГ площадью 1 м^2 , работающий на частоте $5 \cdot 10^{14}$ Гц. Он имеет чувствительность $4 \cdot 10^5$ Гц на каждый радиан в секунду $\Omega(t)$ и регистрирует время запаздывания встречных волн примерно до 10^{-16} с. Несомненные достоинства частотных методов регистрации объясняют преимущества частотных ЛГ перед датчиками $\Omega(t)$ других типов.

Параметры резонатора. В КОКГ часто применяется простейшая форма резонатора в виде треугольника (см. рис. 3.1), в вершинах которого расположены два непрозрачных и одно полупрозрачное зеркало. Последнее используется для вывода части энергии контура с целью получения информации о частоте колебаний в нем. Кроме того, в реальном резонаторе происходят потери энергии при отражении и по некоторым другим причинам. Поэтому для поддержания генерации в реальном резонаторе должна присутствовать активная среда, которая преобразовывала бы электрическую энергию в электромагнитные колебания и обеспечивала высокую монохроматичность и когерентность излучения. Этим требованиям в полной мере удовлетворяют газовые лазеры.

В настоящее время в ЛГ в качестве активной среды используется в основном смесь двух газов: гелия и неона, атомы которых имеют близкие энергетические уровни. При возбуждении активной среды тлеющим разрядом атомы гелия переходят на уровни 2^3S и 2^1S , которые являются метастабильными, т.е. переход с них на нормальный уровень маловероятен, и поэтому возможно накопление возбужденных атомов гелия. Сталкиваясь с нормальными атомами неона, атомы гелия отдают им свою энергию, а сами без излучения возвращаются в нормальное состояние. Эти столкновения приводят к возникновению инверсной заселенности уровней неона $2S$ и $3S$.

Переход возбужденных атомов на более низкие энергетические уровни сопровождается излучением энергии. Внешнее воздействие стимулирует одновременный переход значительного числа атомов, вызывая индуцированное излучение. Такое излучение когерентно и имеет достаточно узкий спектр частот (естественное уширение составляет около 15 мГц). В гелиево-неоновой смеси индуцированное излучение возможно с длинами волн $0,63$; $1,15$; $3,39 \text{ мкм}$. Для лазерного гиromетра в настоящее время оптимальным считается $\lambda_n = 0,63 \text{ мкм}$.

Следует отметить, что в кольцевом оптическом квантовом генераторе бегущие волны, направленные встречно, могут иметь отличающиеся между собой частоты. При наложении этих волн образуются устойчивые стоячие волны, однако местоположение узлов и пучностей остается неопределенным и не зависит от положения резонатора. При вращении резонатора относительно инерциального пространства картина стоячих волн остается неподвижной, что следует из постулата постоянства скорости света и принципа относительности.

Спектр частот резонатора определяется временем прохождения излучения по замкнутому контуру КОКГ:

$$J = \frac{c_s}{\sum l_i n_i} ; \quad \sum l_i = L_{\text{рез}} \quad (3.5)$$

где J - целое число; $l_i n_i$ - длина и показатель преломления среды i -го участка резонатора; $L_{\text{рез}}$ - периметр резонатора; c_s - скорость света. Соотношение (3.5) является условием существования генерации в КОКГ, так как при его выполнении сдвиг фазы бегущей волны при прохождении замкнутого контура будет кратным 2π рад.

Принципиально в резонаторе могут одновременно существовать несколько типов бегущих волн, для которых число J отличается на единицу. Такой режим работы КОКГ называется многомодовым. Разность частот между соседними модами составляет

$$\Delta\nu_m \approx c_s / L_{\text{рез}} \quad (3.6)$$

При $L_{\text{рез}} = 1$ м соседние моды отстоят друг от друга на 300 мГц. Взаимодействие между различными модами приводит к появлению нежелательных эффектов. К ним относятся синхронизация частот межмодовых биений, изменение глубины модуляции стоячих волн и др. В лазерных гиromетрах стараются реализовать одномодовый режим работы КОКГ. Селекция мод основана на создании условий, при которых увеличиваются потери для нежелательных мод.

Резонатор КОКГ обеспечивает не только когерентность индуцированного излучения, но и его высокую монохроматичность. Благодаря резонатору резко сужается ширина спектра излучения.

Добротность резонатора определяется соотношением

$$Q = 2\pi \mathcal{E}_0 / \mathcal{E}_r \quad (3.7)$$

где $\mathcal{E}_0$ - энергия, запасенная в резонаторе;

$$\mathcal{E}_r = \mathcal{E}_0 \rho_n \frac{c_s}{L_{\text{рез}}} T_d \quad (3.8)$$

- энергия, теряемая в резонаторе за цикл времени T_p .

Здесь ρ_n - коэффициент суммарных потерь; $\mathcal{E}_0 \rho_n$ - потери энергии за один проход в резонаторе; $L_{рез}/c_s$ - время прохода резонатора.

Подставляя (3.8) в (3.7) и учитывая, что $T_p = 1/\nu_0$, получаем

$$Q = 2\pi \frac{L_{рез} \nu_0}{c_s \rho_n} = 2\pi \frac{L_{рез}}{\lambda_n \rho_n}. \quad (3.9)$$

Исходя из величины добротности резонатора, находим ширину спектра резонатора:

$$\Delta \nu_{рез} = \frac{\nu_0}{Q} = \frac{c_s \rho_n}{2\pi L_{рез}}. \quad (3.10)$$

Теоретическая связь между шириной спектра резонатора и шириной линии излучения определяется соотношением

$$\Delta \nu_n \approx \frac{8\pi h \nu}{P} \Delta \nu_{рез}^2, \quad (3.11)$$

где P - мощность излучения на данной моде; $h\nu_0$ - энергия кванта.

Примем $\rho_n = 1\%$; $L_{рез} = 0,54$ м; $\lambda_{ио} = 0,63$ мкм; $P = 8,85 \cdot 10^3$ кВт; $\Delta \nu_n = 0,007$ Гц.

Ширина линии излучения, определяемая из соотношения (3.11), должна рассматриваться как предельно достижимая величина. В реальных условиях из-за нестабильности резонатора и других причин ширина линии будет больше.

При неподвижном относительно инерциального пространства КОКГ обе бегущие волны, распространяющиеся в резонаторе в противоположных направлениях, имеют одинаковую частоту, определяемую (3.5), и одинаковое время прохождения по замкнутому контуру. Для вращающегося КОКГ найдем связь между изменением времени прохождения по замкнутому контуру и эквивалентным изменением параметра контура. Пусть плоский замкнутый контур, расположенный в плоскости чертежа (рис. 3.3), вращается с угловой скоростью Ω_n , вектор которой перпендикулярен плоскости контура.

Выделим на контуре произвольный отрезок АВ шириной $dL = R_k d\theta$. При перемещении бегущей волны I из точки А на расстояние dL за время $dt = dL/c_s$ точка В займет положение В₁, сместившись на угол

$$d\varphi = \Omega_n dt = \Omega_n dL/c_s. \quad (3.12)$$

Чтобы попасть в точку В₁, бегущая волна должна пройти дополнительный отрезок контура, равный $R_k d\varphi$. На это потребуется дополнительное время

$$d\tau = \frac{1}{c_s} R_\kappa d\varphi. \quad (3.13)$$

Для обхода всего контура бегущей волне потребуется дополнительное время

$$\tau = \frac{1}{c_s} \oint R_\kappa d\varphi. \quad (3.14)$$

Подставляя (3.12) в (3.14) и выполняя интегрирование, получаем

$$\tau = 2\pi R_\kappa^2 \Omega_n / c_s^2 = 2S_\kappa \Omega C_s^{-2}, \quad (3.15)$$

где S_κ - площадь контура.

Эквивалентное изменение периметра контура для бегущей волны I составляет

$$\Delta L_1 = \tau c_s = 2S_\kappa \Omega_n C_s^{-1}. \quad (3.16)$$

Вследствие изменения периметра контура на величину ΔL_1 произойдет перестройка резонатора и частота бегущей волны I будет равна

$$\nu_1 = \frac{c_s \nu}{L_{\text{рез}} + \Delta L_1}, \quad (3.17)$$

а девиация частоты с учетом (3.5) и (3.16) составит

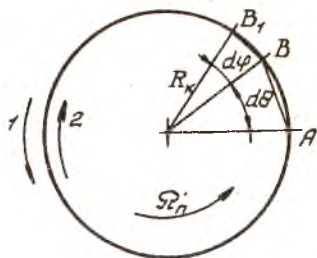
$$\Delta \nu_1 = \nu_1 - \nu \approx - \frac{2S_\kappa \nu}{L_{\text{рез}} c_s} \Omega_n. \quad (3.18)$$

В силу изотропности КОКГ $|\Delta \nu_1| = |\Delta \nu_2|$ знаки девиации будут разноименными, так как для бегущей волны 2 эквивалентное изменение периметра будет отрицательным.

Таким образом, при вращении КОКГ в инерциальном пространстве внутри резонатора имеются две встречные бегущие волны, отличающиеся одна от другой частотами. Как известно, при наложении таких волн друг на друга возникают биения, частота которых

$$F_p^0 = |\nu_1 - \nu_2| = 2|\Delta \nu| = \frac{4S_\kappa}{\lambda_n L_{\text{рез}}} \Omega_n \quad (3.19)$$

пропорциональна угловой скорости. Полученное выражение (3.19) является лишь первым приближением для идеального резонатора. Следует отметить, что частота биений F_p^0 определяется только величиной проекции Ω_n угловой скорости на нормаль к контуру резонатора.



Р и с. 3.3. Схема кольцевого резонатора: 1, 2 - бегущие волны

Для выделения частоты биений встречные волны, выходящие через одно из зеркал резонатора, совмещаются специальной оптической системой на катоде фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Падающие на фотокатод лучи имеют малый угол расхождения ε и образуют интерференционную картину, которая может быть описана выражением

$$J = J_0 [1 + \cos(2\pi \varepsilon x / \lambda_n + F_p^0 t + \varphi_0)] ; \quad (3.20)$$

где φ_0 - некоторый постоянный сдвиг фаз; $\varepsilon = 2n_1 \theta_n$; n_1 - показатель преломления призмы; θ_n - отклонение угла при вершине призмы от 90° .

Расстояние между интерференционными полосами равно λ_n / ε . При $\lambda_n = 0,633$ мкм и $\theta_n = 15''$ это составляет 3 мм.

Из выражения (3.20) видно, что при $F_p^0 = 0$ интерференционная картина стационарна. Когда КОКГ вращается, интерференционная картина перемещается по фотокатоду со скоростью, определяемой частотой биений. Используя фотокатод с размером чувствительной площадки, много меньшим расстояния между интерференционными полосами, можно определить частоту биений, измеряя скорость прохождения максимумов интенсивности интерференционной картины через фотокатод ФЭУ. Это осуществляется путем преобразования синусоидального сигнала, снимаемого с ФЭУ, в последовательность прямоугольных импульсов, причем за каждый период изменения интенсивности интерференционной картины формируется один импульс. Подсчитав число импульсов в единицу времени, тем самым определим частоту биений F_p^0 , которая будет представлена в цифровом виде.

Измерение частоты биений возможно также аналоговыми методами, но, как правило, они дают недостаточную точность измерения и поэтому применяются сравнительно редко.

Для перехода от частоты биений к измеряемой угловой скорости ЛГ необходимо знать его масштабный коэффициент, который в идеальном случае определяется из (3.19):

$$K_{\kappa\omega} = 4S / (\lambda_n L_{\text{рег}}) , \quad (3.21)$$

где $K_{\kappa\omega}$ - измеряется в Гц/(рад/с).

Таким образом, лазерный гиометр является измерительным преобразователем угловой скорости с частотным выходом. С помощью масштабного коэффициента определяют, какая частота появляется на выходе ЛГ при единичной угловой скорости на входе. Например, для треугольного резонатора со стороной 18 см и при $\lambda_n = 0,633$ мкм $K_{\kappa\omega} = 2,62 \cdot 10^4$ Гц/(рад/с). Из (3.21) видно, что с увеличением размеров резонатора масштабный коэффициент увеличивается.

ЛГ может также использоваться для измерения угла поворота основания, на котором установлен КОКГ. Действительно, за время t , в течение которого производится подсчет числа импульсов, КОКГ повернется на угол

$$\Delta = \int_0^t \Omega_n dt,$$

а число импульсов будет

$$N_p^0 = \frac{1}{T_p} = \int_0^t F_p^0 dt. \quad (3.22)$$

Подставляя (3.19) и (3.21) в (3.22) и сравнивая полученный результат с (3.21), находим

$$N_p^0 = K_{\kappa\delta} \Delta = K_{\kappa\delta} \int_0^t \Omega_n dt.$$

В случае использования ЛГ в качестве измерительного преобразователя угла поворота его масштабный коэффициент будет определять число импульсов при повороте на единичный угол. Это число может оказаться дробным, хотя ведется подсчет только целого числа импульсов, поэтому на практике удобнее вместо (3.22) пользоваться выражением

$$N_p^0 = \Delta / \Delta, \quad (3.23)$$

где $\Delta = K_{\kappa\delta}^{-1}$ - цена импульса лазерного гиromетра.

Для рассмотренного выше числового примера $\Delta = 6,0777 \cdot 10^{-6}$ рад/имп или $\Delta = 1,25$ угл. с/имп. следует отметить, что число импульсов N_p^0 не зависит от флуктуаций угловой скорости, что может оказаться весьма существенным при решении некоторых навигационных задач.

Состав лазерного гироскопа. При эксплуатации ЛГ флуктуации внешних и внутренних возмущений, особенно в том случае, когда они не контролируются, приводят к значительным погрешностям при измерении $\Omega(t)$. К группе внешних возмущений относятся вибрации, удары, флуктуации температуры, давления и влажности, т.е. так называемые в практике приборостроения механические и климатические возмущения. Они ухудшают добротность резонатора Q , изменяют оптическую длину $\sum l_i n_i$, а также создают разнородность резонатора для встречных излучений $\Delta Q_{1,2}$, изменяя настройку частоты резонатора $\nu(\nu)_{1,2}$. К группе внутренних возмущений относят внешние и внутренние магнитные и электрические поля. Эти возмущения воздействуют на стабильность разностной частоты, создают разнородность генерационных каналов, а также изменяют во времени стабильность частоты излучения $S_0 - \frac{\delta\nu(t)}{\nu}$, уменьшение коэффициента отражения

зеркал, нарушение герметичности кюветы, старение элементов генерационного канала, изменение разрядного тока - все это вносит флуктуации выходной мощности $P_{\text{вых}}$, увеличение параметров обратного рассеяния $\Gamma_{1,2}$, $\Psi_{1,2}$, изменение оптической длины $(l_i, n_i)_{1,2}$ и разность коэффициента потерь в резонаторе $(\Delta k_{\text{пот}})_{1,2}$. Возникают также перекрестные связи. Влияние этих связей на выходную характеристику ЛГ различно, и регулирование одного какого-либо параметра приводит к изменению других параметров, которые должны стабилизироваться автономно. Для увеличения достоверности показаний ЛГ стабилизируют величины $Q_{1,2}$, $P_{\text{вых}}$, $\chi(\gamma)_{1,2}$, L_p .

В качестве примера приведем значения стабилизированных параметров в одном из ЛГ, имеющем $L_p = 45$ см; $\lambda_0 = 0,6328 \cdot 10^{-4}$ см; $P_{\text{нр}}/P_{\text{нр}} = 5:1$; $P = 400$ Па; $I_p = 30$ мА; $\chi(\gamma)_{1,2} = 0,25$; $F_n = 10$ кГц; $\Omega(t) = (5 \cdot 10^{-7} \dots 1,74)$ рад/с. Этот моноблочный ЛГ имеет погрешность $\Delta\Omega(t) = 5 \cdot 10^{-7}$ рад/с и обеспечивает стабилизацию параметров с точностью $\Delta\chi_0(t) \leq 0,5 \cdot 10^{-5}$ Гц; $\Delta G = 3 \cdot 10^{-5}$; $\Delta I_p \approx 5 \cdot 10^{-4}$ А.

Оптические схемы интерференционных смесителей излучения. Для выделения сигнала разностной частоты встречные излучения, выходящие через один из отражательных элементов кольцевого резонатора, совмещают в специальном оптическом устройстве (смесителе). Небольшая доля энергии встречных волн, несущая информацию о наличии $\Omega(t)$, интерферирует на рабочей грани оптического смесителя, образуя последовательность интерференционных полос, которые перемещаются в зависимости от величины и направления измеряемой угловой скорости. Число интерференционных максимумов, приходящихся на рабочую поверхность смесителя,

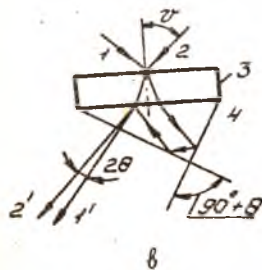
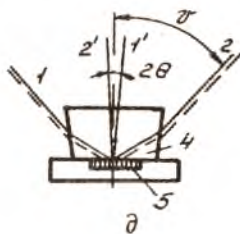
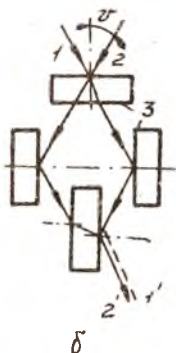
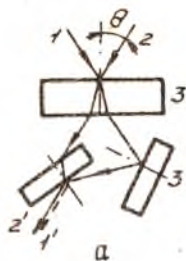
$$N_{\text{max}} \approx \frac{2n \sin \theta}{\lambda \sin \psi_{1,2}}, \quad (3.24)$$

где n - показатель преломления; θ - отклонение угла при вершине призмы от 90° ; $\psi_{1,2}$ - угол падения фронта волны, рад.

Различают три типа смесителей (рис. 3.4): зеркальные, призмные и голографические, причем по точности смещения излучения наиболее предпочтительной является призмная конструкция. При выходе из смесителя возможна интерференционная картина с периодом X_{max} (расстояние между двумя соседними максимумами).

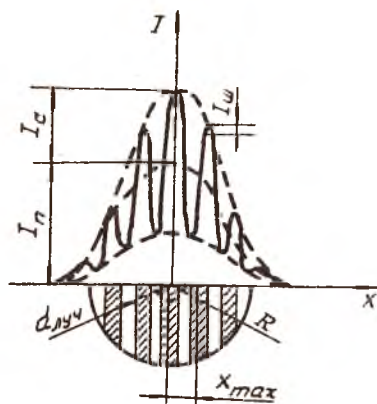
Для пространственной селекции интерференционной картина (рис. 3.5) перед смесителем устанавливают различной формы диафрагмы. Например, в датчиках перемещений и в ЛГ применяют оптически несимметричные диафрагмы.

Точность лазерного гироскопа. Реальную точность ЛГ с достаточной достоверностью можно получить только путем проведения исследований его



Р и с. 3.4. Схема оптических смесителей: а - трехзеркальный, $\Delta\theta = 10''$; б - четырехзеркальный, $\Delta\theta = 5 \dots 10''$; в - призмный, $\Delta\theta = 2 \dots 5''$; г - комбинированный, $\Delta\theta = 5''$; д - голографический, $\Delta\theta = 5''$; 1, 2 - встречные излучения; 1', 2' - интерферирующие излучения; 3 - зеркало; 4 - призма; 5 - голограмма; 2θ - угол между интерферирующими излучениями; i_B - угол Брюстера

работы в условиях, соответствующих условиям эксплуатации. Теоретически может быть получена оценка возможностей точности, определяемой уровнем технических флуктуаций выходного сигнала КОКГ. Эту величину можно рассматривать как потенциальную точность ЛГ, к которой можно приблизиться в идеальных условиях.



Р и с. 3.5. Интерференционная картина при смещении встречных излучений. Распределение интенсивности света на выходе оптического смесителя: $d_{\text{луч}}$ - диаметр луча; R - радиус диафрагмы; I_n - максимальное значение интенсивности постоянной составляющей в центре интерференционной картины; I_c - амплитудное значение интенсивности переменного сигнала разностной частоты; I_m - интенсивность аддитивных шумов

Естественные флуктуации, природа которых связана с внутренним механизмом генерации в КОКГ, определяют ширину спектральной линии излучения. Две близкие величины измеряемой угловой скорости дадут на выходе различающиеся между собой сигналы только в том случае, если соответствующие им частоты биений отличаются на величину, превышающую ширину спектральной линии. Таким образом, естественные флуктуации определяют разрешающую способность ЛГ, который с учетом (3.11) характеризуется соотношением

$$\Delta\Omega_0 = K_{\text{кв}}^{-1} \Delta\dot{\nu}_\lambda = \frac{2\pi\hbar c_s L_{\text{рез}}}{PS_k} \Delta\dot{\nu}_{\text{рез}}^2 \quad (3.25)$$

Из (3.25) видно, что разрешающую способность ЛГ можно повысить, увеличивая мощность излучения, а также размеры резонатора. При рассчитанных ранее значениях $K_{\text{кв}} = 2,62 \cdot 10^4$ Гц с/рад, $\Delta\dot{\nu}_\lambda = 0,007$ Гц, получим $\Delta\Omega_0 = 2,67 \cdot 10^{-7}$ с⁻¹.

Величина $\Delta\dot{\nu}_\lambda$ определяет предел целесообразного увеличения времени измерения частоты биений. Принимая $\Delta F = \Delta\dot{\nu}_\lambda$, получаем

$$t_{\text{из}} = 1/\Delta\dot{\nu}_\lambda \quad (3.26)$$

Полученное из соотношения (3.26) время измерения можно рассматривать как теоретическое максимальное значение. Практически реализовать его весьма сложно, так как для этого потребуются счетчик, имеющий емкость

$$N_m = \frac{F_n + F_p^0}{\Delta\dot{\nu}_\lambda} \quad (3.27)$$

При этом емкость счетчика может достигнуть восьми десятичных разрядов и более.

При оценке точности ЛГ необходимо также учитывать, что на полезный сигнал накладываются флуктуационные помехи, обусловленные наличием шумов фотодетектора, усилителя и других элементов тракта формирования и преобразования сигнала. В этом случае на конечном интервале времени измерения невозможно точное измерение параметров сигнала. Поэтому должна решаться задача получения оценки погрешности информативного параметра сигнала в соответствии с выбранным критерием, согласующегося с действительным его значением. Как правило, выходной сигнал КОКГ содержит лишь один неизвестный информативный параметр (частоту) и, в общем случае, несколько неизвестных информативных параметров (амплитуда, начальная фаза и т.д.).

В том случае, когда полезный сигнал имеет достаточную интенсивность и его энергия $\mathcal{E}$ значительно превышает спектральную плотность помех $\mathcal{E} \gg P_n$, а неинформативные параметры сохраняют постоянное значение, дисперсия оценки частоты биений КОКГ определяется соотношением

$$\sigma_F^2 = \frac{3}{4\pi^2 T_{\text{из}}^2 K}, \quad (3.28)$$

где $K = 2\mathcal{E}/P_n$ - отношение сигнал-помеха.

Если начальная фаза сигнала является величиной случайной, то в результате потери информации об одном параметре сигнала ширина корреляционной функции уменьшается, а дисперсия определения информативного параметра увеличивается:

$$\sigma_F^2 = \frac{3}{\pi^2 T_{\text{из}}^2 K}. \quad (3.29)$$

Исходя из (3.28), получаем оценку потенциальной точности лазерного гиromетра через среднеквадратическое отклонение угловой скорости:

$$\sigma_{\Omega} = K_{\text{кв}}^{-1} \sigma_F = \frac{\sqrt{3} \lambda_{\text{из}} L_{\text{рез}}}{4\pi S_k T_{\text{из}} \sqrt{K}}. \quad (3.30)$$

Из выражения (3.30) видно, что погрешность измерения будет уменьшаться при увеличении времени измерения, размеров резонатора и мощности сигнала. Первые два фактора оказывают аналогичное влияние на предельную точность лазерного гиromетра. Увеличение отношения сигнал-помеха существенно ограничено при использовании излучения с $\lambda_{\text{из}} = 0,63$ мкм, так как усиление активной среды на этой длине волны невелико. Это не позволяет выводить за пределы резонатора значительную часть энергии излу-

чения. Для расчетов в среднем принимают $K = 40$ дБ, тогда при $K_{кз} = 2,62 \cdot 10^4$ Гц/с/рад и $T_{из} = 10$ с получим $\beta_a = 1,9 \cdot 10^{-9}$ с $^{-1}$.

Схема лазерного гироскопа. Возможные варианты схем ЛГ представлены на рис. 3.1. Основным узлом ЛГ является кольцевой оптический квантовый генератор, который служит первичным преобразователем угловой скорости в частоту биений. Для того, чтобы обеспечить стабильную работу КОКГ в одномодовом режиме, необходимо поддерживать постоянной интенсивность бегущих волн, которая определяется усилением в активной среде. Это осуществляется с помощью системы поджига и накачки газового лазера, которая в момент запуска обеспечивает возбуждение атомов активной среды, а затем в процессе работы стабилизирует мощность накачки газового лазера. Стабилизацию мощности излучения можно выполнить, используя разомкнутую схему, и тогда задача сведется к стабилизации тока накачки заданной величины. Более эффективным является применение замкнутой системы регулирования с использованием в цепи обратной связи сигнала о мощности излучения.

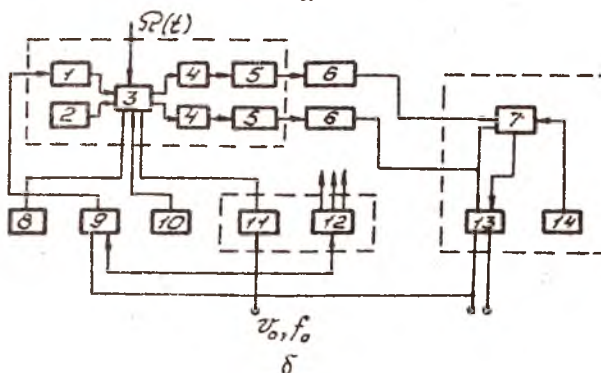
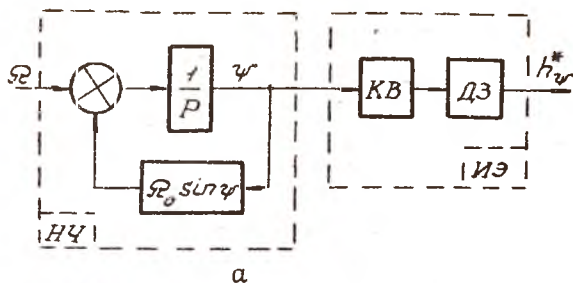
Динамическая модель лазерного гироскопа. Дискретная математическая модель лазерного гироскопа, позволяющая упростить анализ динамики ЛГ и с достаточной для практических расчетов точностью описывающая свойства реального ЛГ в статике и динамике. При построении модели предполагается, что преобразование сигнала разностной частоты в последовательность счетных импульсов осуществляется при помощи формирователей импульсов, в которых используются два фотоприемника со смещенными на четверть волны излучения чувствительными площадками для определения направления вращения (знака угловой скорости). Шаг квантования приращений $\Delta\psi$ мгновенной разности фаз $\psi(t)$ в этих схемах лежит в пределах от 2π до $\pi/2$.

При таком подходе с учетом статической зоны нечувствительности Ω_0 и при произвольной входной угловой скорости $\Omega(t)$ ЛГ можно представить в виде модели, структурная схема которой показана на рис. 3.6,а. Функциональное управление ЛГ осуществляется в соответствии со структурной схемой, изображенной на рис. 3.6,б. Динамика непрерывной части (НЧ) модели ЛГ описывается известным фазовым уравнением

$$\frac{d\psi}{dt} + \Omega_0 \sin \psi = \Omega(t), \quad (3.31)$$

а квантователь приращений (K_B) и дифференцирующее звено (ДЗ) образуют импульсный элемент (ИЭ), который переводит непрерывный сигнал $\psi(t)$ в последовательность δ -импульсов:

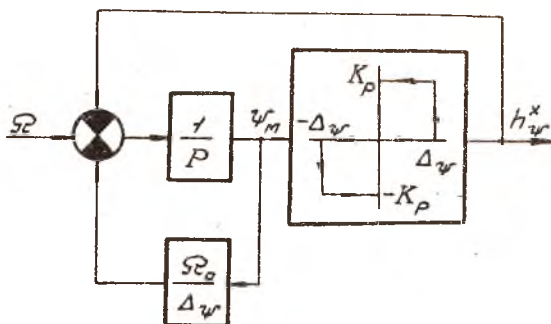
$$h_{\psi}(n) = \text{sign } \psi (|\psi| - \Delta\psi). \quad (3.32)$$



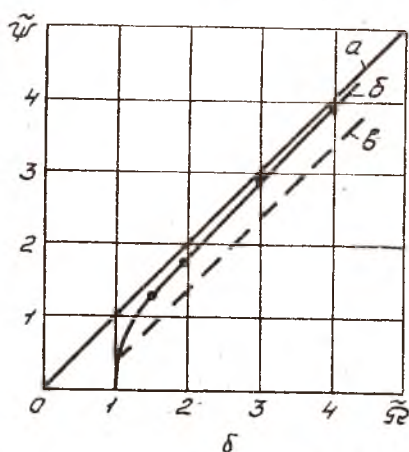
Р и с. 3.6. Структурные схемы лазерных гироскопов: а - обеспечение измерения разности фаз; б - функциональное управление гироскопом: 1 - система частотной подставки; 2 - система стабилизации периметра; 3 - КОКГ; 4 - фотодиоды; 5 - усилители; 6 - формирователи; 7 - система определения угловой скорости $\pm \Omega(t)$; 8 - система выравнивания добротности; 9 - система питания элемента разности частот; 10 - система стабилизации мощности; 11 - блок поджима; 12 - блок питания; 13 - реверсивный счетчик; 14 - система управления крутизной ВХ

Полученная дискретная модель лазерного гироскопа включает в себя нелинейное звено, описываемое (3.31), что существенно затрудняет ее практическое применение. Преобразуем структурную схему ЛГ, заменив нелинейное звено линейным в интервале изменения разности фаз на величину шага квантователя приращений $\Delta\psi$. Тогда вместо (3.31) получим

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{\Delta\psi} \Omega_0 \psi = \Omega(t) - \Delta\psi \operatorname{sign} \psi \delta(|\psi| - \Delta\psi). \quad (3.33)$$



а



Р и с. 3.7. Линеаризованная структурная схема (а) и статические характеристики лазерного гироскопа (б): $\tilde{\psi}_m$ - разность фаз модели; ---- идеальная; —•— с зоной нечувствительности шириной Ω_0 ; - - - приближенная

Используя (3.33) и заменяя импульсный элемент, линеаризованную дискретную модель лазерного гироскопа представим в виде, показанном на рис. 3.7, а. Отличительной особенностью линейной модели является то, что длительность импульса τ_n на выходе системы определяется параметром K_p . При $K_p \rightarrow \infty$ имеем последовательность δ -импульсов (функция Дирака), которые соответствуют идеальному импульсному элементу. Меняя величину K_p , можно получать прямоугольные импульсы желаемой длитель-

ности и, в частности, равные длительности импульсов на выходе реального ЛГ.

Статическая характеристика лазерного гиromетра, получаемая решением уравнения (3.33) при постоянной угловой скорости на входе $\Omega(t) = \Omega = \text{const}$, имеет зону нечувствительности шириной Ω_0 и описывается при усреднении на интервале $0 \dots 2$ выражением

$$\psi = \sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2} \quad (3.34)$$

Подставляя в (3.33) $\Omega < \Omega_0$, получаем, что приближенная модель лазерного гиromетра также обладает зоной нечувствительности, равной Ω_0 . Для постоянной угловой скорости $|\Omega| > \Omega_0$ на входе модели ЛГ из (3.33) определяем интервал времени t_n между двумя последовательными импульсами:

$$t_n = \frac{\Delta\psi}{\Omega_0} \ln \frac{|\Omega|}{|\Omega| - \Omega_0} \quad (3.35)$$

Усредняя (3.35) в интервале $0 \dots 2\pi$, получаем статическую характеристику приближенной модели лазерного гиromетра в виде

$$\dot{\psi}_m = \frac{\Omega_0}{\ln \frac{|\Omega|}{|\Omega| - \Omega_0}} \quad \text{при } |\Omega| > \Omega_0 \quad (3.36)$$

Анализируя (3.36), найдем, что при $|\Omega| \rightarrow \infty$ статическая характеристика модели ЛГ стремится к асимптотической зависимости $\dot{\psi}_m = \Omega$ (рис. 3.7,б), которая представляет собой идеальную статическую характеристику ЛГ. Вычисляя $\lim_{\Omega \rightarrow \Omega_0} \dot{\psi}_m = 0$, видим, что характеристика (3.34) подходит к зоне нечувствительности аналогично (3.36).

Переходя в выражениях (3.36) и (3.34) к относительным величинам

$$\tilde{\psi} = \dot{\psi} / \Omega_0 ; \quad \tilde{\psi}_m = \dot{\psi}_m / \Omega_0 ; \quad \tilde{\Omega} = |\Omega| / \Omega_0 ,$$

получаем

$$\tilde{\psi} = \sqrt{\tilde{\Omega}^2 - 1} \quad (3.37)$$

$$\tilde{\psi} = \left(\ln \frac{|\tilde{\Omega}|}{|\tilde{\Omega}| - 1} \right)^{-1} \quad (3.38)$$

При этом идеальная статическая характеристика ЛГ имеет вид

$$\tilde{\psi} = \tilde{\Omega} \quad (3.39)$$

Для сравнения на рис. 3.7,б по выражениям (3.37)-(3.39) построены характеристики ЛГ: статическая характеристика модели ЛГ лежит ниже характеристики, полученной на основании нелинейного уравнения (3.31).

Различие характеристик (3.37) и (3.38) оценим относительной погрешностью модели ЛГ:

$$\delta = \frac{\bar{\Psi} - \bar{\Psi}_m}{\bar{\Psi}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\Omega^2 - 1}} \left(\ln \frac{|\bar{\Omega}|}{|\bar{\Omega}| - 1} \right)^{-1}. \quad (3.40)$$

Погрешность (3.40) принимает свое максимальное значение $\delta_{\max} = 0,186$ при $\bar{\Omega} = 1,45$. График изменения $\bar{\Psi}$ представлен на рис. 3.7, б, из которого можно сделать вывод, что для характерных условий измерения $\Omega \gg \Omega_0$ приближенная модель лазерного гиromетра имеет достаточную для практических расчетов точность.

Преобразуем структурную схему, заменим линейную непрерывную часть (ЛНЧ) звеном с передаточной функцией

$$W_{\text{п.н.ч.}}(P) = \frac{T_{\Psi}}{T_{\Psi}P + 1}, \quad (3.41)$$

где $T_{\Psi} = \Delta_{\Psi} / \Omega_0$ - постоянная времени, численно равная интервалу между двумя последовательными импульсами при

$$|\Omega| \approx 1,58 \Omega_0 (\ln |\Omega| (|\Omega| - \Omega_0)^{-1} - 1).$$

Кроме того, ограничимся случаем получения на выходе δ -импульсов, что обеспечивается применением идеального импульсного звена.

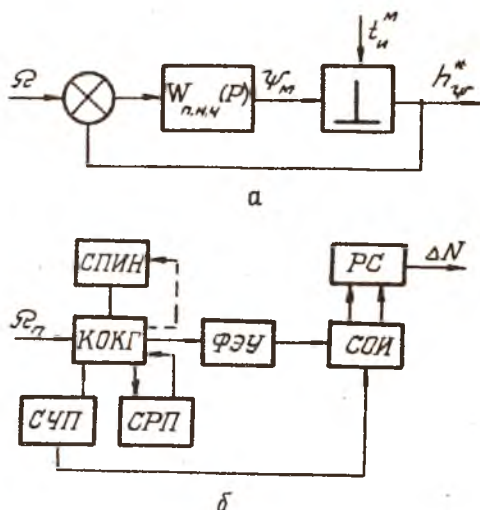
Тогда структурная схема лазерного гиromетра будет иметь вид, представленный на рис. 3.8. Особенностью этой дискретной системы является переменный период сбрасывания идеального импульсного элемента, который определяется входной угловой скоростью. После каждого срабатывания импульсного элемента на выходе лазерного гиromетра появляется один импульс. Последовательность импульсов имеет переменную частоту следования друг за другом. В таком виде ЛГ представляет собой цифроаналоговый преобразователь с частотно-импульсной модуляцией сигнала. В отличие от ранее рассмотренных структурных схем дискретная система является замкнутой за счет единичной обратной связи. Следует также отметить, что импульсный элемент в системе расположен после линейной непрерывной части. В этом случае, как известно, импульсная передаточная функция замкнутой системы в общем виде не может быть получена.

Используя z -преобразование, выходной сигнал ЛГ с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ) представим в виде

$$h_{\Psi}^*(z) = \frac{z \{ \Omega(P) W_{\text{л.н.ч.}}(P) \}}{1 + z \{ W_{\text{л.н.ч.}}(P) \}}. \quad (3.42)$$

Переносим входное воздействие за импульсный элемент, введем эквивалентную угловую скорость

Р и с. 3.8. Блок-схема (а) и структурная схема лазерного гироскопа, обеспечивающая частотно-импульсную модуляцию сигнала (б): КОКГ - кольцевой оптический квантовый генератор; СПИН - система поджига и накачки; СЧП - система регулирования периметра; СЧП - система частотной подставки; ФЭУ - фотозлектронный умножитель; СОН - система обработки информации; РС - реверсивный счетчик; Ω_n - измеряемая угловая скорость; ΔN - число импульсов на выходе ЛГ



$$\Omega_3(z) = z \{ \Omega(P) W_{\text{л.н.ч.}}(P) \}. \quad (3.43)$$

Тогда вместо (3.42), используя передаточную функцию ЛГ по ошибке $G_{\text{ел.г.}}$, можно записать

$$h_{\psi}^*(z) = G_{\text{ел.г.}}(z) \Omega_3(z), \quad (3.44)$$

где

$$G_{\text{ел.г.}}(z) = \frac{1}{1 + z \{ W_{\text{л.н.ч.}}(P) \}} = \frac{z - \exp(-t_n/T_{\psi})}{2z - \exp(-t_n/T_{\psi})}. \quad (3.45)$$

Рассмотрим частные случаи. Пусть ЛГ имеет за счет частотной подставки смещенную рабочую точку $\Omega_n = m_n \Omega_0$ ($m_n \gg 1$). Выходная угловая скорость имеет постоянную величину $\bar{\Omega} = \text{const}$. Интервал времени t_n между двумя последовательными импульсами будет постоянным по величине и равным $m_n = 50$.

$$t_n = \frac{\Delta \psi}{\Omega_0} \ln \frac{|\Omega_n + \bar{\Omega}|}{|\Omega_n + \bar{\Omega}| - \Omega_0} \approx T_{\psi} \ln \frac{m_n}{m_n - 1} = 2 \cdot 10^{-2} T_{\psi}. \quad (3.46)$$

Эквивалентная угловая скорость определяется выражением

$$\Omega_3(z) = (\Omega_n + \bar{\Omega}) z \{ W_{\text{л.н.ч.}}(P) \} = (\hat{\Omega}_n + \bar{\Omega}) \frac{z}{z - \exp(-t_n/T_{\psi})}. \quad (3.47)$$

Подставляя (3.45) и (3.47) в (3.44), с учетом (3.46) получаем выходной сигнал ЛГ

$$h_{\Psi}^*(z) = \frac{z}{2z-1} (\Omega_n + \bar{\Omega}). \quad (3.48)$$

Импульсная передаточная функция ЛГ с ЧИМ для постоянной угловой скорости на входе оказывается аналогичной по своим частотным свойствам пассивному интегрирующему звену.

Пусть теперь ЛГ измеряет угловую скорость, величина которой находится в зоне нечувствительности. На коротком интервале времени, соизмеримом по величине с t_n , представим входную угловую скорость в виде

$$\Omega(t) = \Omega_n + \varepsilon_n t, \quad (3.49)$$

где $\Omega_n = \text{const}$ - начальное значение скорости; ε_n - угловое ускорение.

Эквивалентную угловую скорость вычислим для единичного значения ускорения:

$$\Omega_3(z) = z \left\{ \frac{1}{p^2} \frac{T_{\Psi}}{T_{\Psi} p + 1} \right\} = \frac{t_n T_{\Psi} z}{(z-1)^2} - \frac{T_{\Psi}^2 z (1 - e^{-t_n/T_{\Psi}})}{(z-1)(z - e^{-t_n/T_{\Psi}})}. \quad (3.50)$$

Учитывая, что вблизи зоны нечувствительности $t_n \gg T_{\Psi}$, упростим:

$$\Omega_3(z) \approx \frac{t_n^2 z}{(z-1)^2 (z - e^{-t_n/T_{\Psi}})}. \quad (3.51)$$

Подставляя (3.45) и (3.51) в (3.44), находим выражение для выходного сигнала при $\Omega_n = 0$ и $\varepsilon_n = 1$:

$$h_{\Psi}^*(z) = \frac{t_n^2 z}{(z-1)^2 (2z - e^{-t_n/T_{\Psi}})}. \quad (3.52)$$

При тех же предположениях z -изображение входной угловой скорости будет

$$\Omega(z) = z \left\{ \frac{1}{p^2} \right\} = \frac{t_n z}{(z-1)^2}. \quad (3.53)$$

Из (3.52) и (3.53) получим импульсную передаточную функцию ЛГ для угловой скорости, растущей пропорционально времени:

$$G_{\text{ЛГ}}(z) = \frac{t_n}{2z - e^{-t_n/T_{\Psi}}}. \quad (3.54)$$

Передаточная функция (3.54) представляет собой импульсную передаточную функцию ЛГ как интегратора угловой скорости с экстраполятором нулевого порядка на выходе.

При моделировании на ЭВМ систем автоматического управления, в которых применяется ЛГ, для определения момента появления первого импульса, свидетельствующего о выходе ЛГ из зоны синхронизации, а также последующих импульсов, можно применить следующую методику расчета. Интервалы времени t_n^M между импульсами на выходе непрерывной линейной части модели могут быть определены решением уравнения

$$\Psi(t) = \int_0^{t_n^M} \Omega(t-\tau) e^{-\frac{\Omega_0}{\Delta\psi} \tau} d\tau. \quad (3.55)$$

Подставляя (3.49) в (3.55) и приравнявая шагу квантователя, находим

$$\Delta\psi = \left(1 - e^{-\frac{\Omega_0 t_n^M}{\Delta\psi}}\right) \left(\frac{\Omega_n}{\Omega_0} - \frac{\varepsilon_a \Delta\psi}{\Omega_0^2} + \frac{\varepsilon_a}{\Omega_0} t_n^M\right). \quad (3.56)$$

Выражение (3.56) является нелинейным уравнением и решения в явном виде не имеет, но допускает численное решение одним из известных методов с заданной точностью. Для удобства выражение (3.56) можно представить в форме

$$\frac{\Omega_n}{\Omega_0} = \frac{\Delta\psi - \varepsilon_a \Omega_0^{-1} t_n^M}{1 - \exp(-\Omega_0 \Delta\psi^{-1} t_n^M)} + \frac{\varepsilon_a \Delta\psi}{\Omega_0^2}. \quad (3.57)$$

Если $\Omega_n > \Omega_0$, то расчет можно начинать с $t = 0$. Получив значение t_n^M , удовлетворяющее (3.57), рассчитываем по (3.49) значение скорости, которое принимается за новое начальное значение при расчете момента появления следующего импульса. Если $\Omega_n = \Omega_0$, то расчет начинаем со времени $t_0 = (\Omega_0 - \Omega_n)/\varepsilon_a$, когда входная угловая скорость достигает границы зоны нечувствительности. Далее шаговая процедура вычисления момента появления каждого последующего импульса повторяется.

Таким образом, рассмотренные математические модели ЛГ и сигнала на его выходе охватывают большинство из возможных режимов применения ЛГ в системах управления и стабилизации.

Приближенный расчет основных параметров. Ниже приводится перечень зависимостей, по которым можно произвести приближенный расчет основных параметров при проектировании лазерного гироскопа. Формулы приводятся в том порядке, в котором рекомендуется проводить расчет. Считается заданным состав газовой смеси, как правило He-Ne, и длина волны в центре кривой усиления $\lambda_0 = 0,6328 \cdot 10^{-4}$ см. Выбран одномодовый режим генерации и периметр резонатора L_p . Задан диапазон измеряемых скоростей $\Omega_{\min} \leq \Omega(t) \leq \Omega_{\max}$ и диапазон изменения температуры $\Delta T = \pm 50^\circ\text{C}$.

1. Пределы измерения разностной частоты, Гц:

$$(F_p)_{\min} = 4S\Omega_{\min}/(\lambda_0 L_p);$$

$$(F_p)_{\max} = 4S\Omega_{\max}/(\lambda_0 L_p).$$

2. Суммарная разностная частота, Гц,

$$F_p = (F_p)_{\max} + F_n.$$

Обычно для знакопеременной подставки принимается $F_n/F_p = 1/6 \dots 1/10$.

3. Подбирают тип подставки и величину нестабильности ее из расчета $\Delta F_n/F_n \leq 10^{-4}$, $F_n = c \ell_s RH/\pi \sum \ell_i n_i$. Выбирают также параметры и материалы ячейки Фарадея $L_p = \sum \ell_i n_i$ при напряженности магнитного поля H , отнесенного к H_z : $H/H_z \geq 100$, где $H_z = 0,2 \dots 0,5$ Э - напряженность магнитного поля Земли. В ячейке Фарадея рекомендуется применять пластинку из плавленного кварца толщиной $\ell_s \approx 0,2$ см с постоянной Верде $R = 0,68 \cdot 10^{-5}$ I/(Э·см).

4. Чувствительность ЛГ, рад/с,

$$\Omega_{\min} = \lambda_0 L_p (F_p - F_n)/(4S).$$

5. Ширина спектральной линии генерации и расстройка резонатора, Гц:

$$\Delta \nu_n = 8\pi(h\nu_0)\Delta \nu_p^2 / P_{\text{вых}},$$

$$\nu_{1,2}(\nu) = (\nu_{1,2} - \nu_0) / \Delta \nu_D,$$

где $\Delta \nu_D$ - ширина доплеровски уширенной спектральной линии, Гц; ν_0 - резонансная частота излучения, Гц; $\Delta \nu_p$ - ширина резонансной кривой, Гц.

6. Величина области захвата определяется приближенным значением

$$2\Omega_0 \approx c\lambda_0 \sqrt{\bar{G}_{\text{ср}}} / 8\pi S,$$

где $\bar{G}_{\text{ср}} = 10^{-2} \dots 10^{-1}$ - осредненный коэффициент обратного рассеяния.

7. Нормированный коэффициент усиления активного вещества (одномо-
довый режим излучения)

$$K = G/G_0 \approx \exp \left\{ - \left[(\nu - \nu_0) / (0,6\Delta \nu_D) \right]^2 \right\},$$

причем $\Delta \nu_n / \Delta \nu_D = 0,001 \dots 0,01$.

8. Выходная мощность излучения для гелий-неонового лазера

$$P_{\text{вых}} = (2 \dots 5) \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

9. Расходимость излучения, рад

$$\theta = 2,1 \sqrt{\lambda_0 / L_p} \left(2R_k / L_p - 1 \right)^{1/4},$$

где $R_k > 5L_p$ - радиус кривизны зеркал полуконфокального резонатора.

10. Добротность резонатора для встречных излучений

$$Q_{1,2} = 2\pi L_p / (k_{\text{пот}} \lambda_0).$$

11. Коэффициенты потерь в резонаторе при наличии подставки

$$k_{\text{пот}} = \delta_g + \gamma_g + \tau_\lambda,$$

где δ_g - коэффициент вносимых потерь; γ_g - коэффициент внутренних потерь в плазме; τ_λ - коэффициент потерь на отражение в зеркалах. Рекомендуемые значения: $k_{\text{пот}} < 0,04$; $\delta_g = 0,01 \dots 0,02$; $\tau_\lambda \approx 0,025$.

12. Расстояние между двумя соседними интерференционными максимумами, см, и число полос соответственно равны

$$\chi_{\text{max}} = \lambda_0 \sin \nu / 2\theta_n; N_{\text{max}} \leq a / \chi_{\text{max}}.$$

Обычно $\nu = 30$ или 45° ; $a = 0,1 \dots 0,3$ см; $2\theta \approx 1^\circ$, $n = 1,5$.

Выбирается фотоприемник с соответствующим диаметром входного луча, спектральной чувствительностью и постоянной времени. Обычно применяют кремниевые фотодиоды типа ФД.

13. Величина разрядного тока определяется в зависимости от параметров плазмы и приложенного на электроды напряжения $\Delta U \leq 1$ кВ:

$$j_p \approx v_{\text{пл}} \mu P d^2 / 1,4 \sqrt{M} \Delta U,$$

где $v_{\text{пл}}$ - скорость движения плазмы, м/с; μ - динамическая вязкость, П-с; M - атомная масса газовой смеси.

Рекомендуется выбирать нестабильность $\Delta j_p / j_p \leq 1 \cdot 10^{-3}$, давление газовой среды $P \approx 667$ Па. При этом разрядный ток находится в пределах $10 \dots 30$ мА.

14. Величину диаметра газоразрядной трубки (диаметр канала) можно рекомендовать исходя из технологических возможностей изготовления каналов в моноблоке: $d \approx 0,25 \dots 0,3$ см.

15. Пределы приращения параметра, см, в зависимости от диапазона изменения температуры:

$$\Delta L_p = L_{p0} \alpha_T \Delta T.$$

Для кварца $\alpha_T = 5 \cdot 10^{-7}$, для ситалла $\alpha_T = 1 \cdot 10^{-8}$.

16. Усредненное значение погрешности измерения частотомером разностной частоты КОКГ

$$\Delta \bar{F}_p \approx [0,5 T_3 (P_{\text{вых}} / P_{\text{ш}})]^{-0,5}$$

17. Максимально допустимый угол разъюстировки отражательных элементов (зеркал, призм), рад

$$\Delta \sigma = \pm d / (5\sqrt{3} \ell_k),$$

где ℓ_k - длина стороны контура, см.

18. Диаметр площади рабочей поверхности зеркала, см, размеры которой обусловлены дифракционными потерями:

$$D_3 \leq 40 \lambda_0 L_p / d.$$

19. Допуск на угловое смещение выходного зеркала в плоскости контура, рад

$$\Delta \xi \leq \Delta X / 2 \ell_k.$$

При линейном смещении $\Delta X < 10^{-3}$ см.

3.2. Лазерные системы посадки

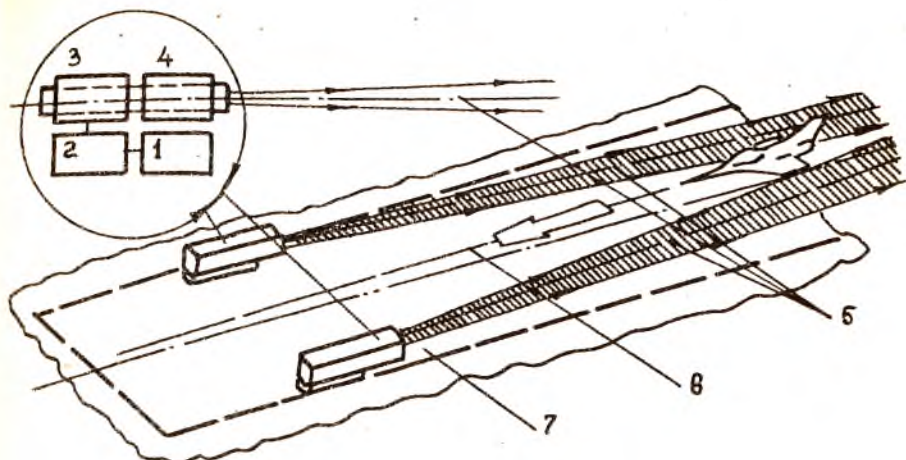
В состав лазерного маяка (рис. 3.9) входят: блок управления, источник питания, излучатель, блок перископический. Принцип действия маяка заключается в создании двух сканирующих под углом к оси взлетно-посадочной полосы (ВПП) лазерных лучей, воспринимаемых летчиком в виде проблесков определенной частоты. Последовательное расположение двух маяков на продолжении оси ВПП позволяет экипажу определить положение ЛА относительно курсовой плоскости при выполнении захода на посадку.

Основой маяка являются два излучателя. Каждый излучатель установлен на платформу. Платформы устанавливаются на грунт по обе стороны продолжения оси ВПП. Сканирование лучей проводится в секторе $2-7^\circ$ по горизонтали и $2-7^\circ$ по вертикали вверх от оси ВПП. Излучение маяка воспринимается визуально в виде точечных проблесков, благодаря сканированию их лучей в заданном секторе. Управление лучами маяка производится дистанционно с пульта управления, установленного на электростанции.

Входной лазерный маяк предназначен для расширения зоны действия системы лазерной посадки "Координата-Л". Он обеспечивает летный экипаж информацией о положении летательного аппарата относительно курсоглисадной группы лазерных маяков. Входной маяк выполнен для эксплуатации в полевых условиях при температуре окружающей среды от 223 К до 323 К ($\pm 50^\circ\text{C}$).

Его технические характеристики:

Напряжение электропитания, В	220 $\pm$ 10%
Частота напряжения электропитания, Гц	50 $\pm$ 2%
Источник лазерного излучения	газовый лазер "Амазонка"
Мощность лазерного излучения, мВт	≥ 35
Время непрерывной работы, ч	≤ 24



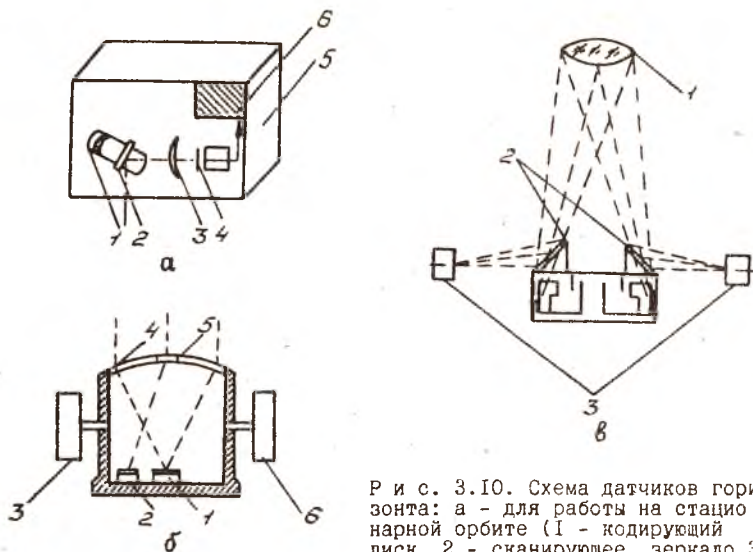
Р и с. 3.9. Состав лазерного маяка: 1 - блок управления; 2 - источник питания; 3 - излучатель; 4 - блок перископический; 5 - световой поток; 6 - направление полета; 7 - взлетно-посадочная полоса

3.3. Датчики горизонта

Для нахождения горизонта (рис. 3.10) можно использовать любую часть оптического спектра излучения Земли: ультрафиолетовую (УФ), видимую или ИК, так как оптический контраст между Землей и окружающим ее менее ярким фоном космического пространства существует в любой части спектра. Однако использовать отраженную от Земли солнечную энергию в УФ, видимом или в коротковолновом ИК участке спектра менее удобно, так как в этом случае условия построения вертикали при нахождении спутника на освещенной и неосвещенной Солнцем стороне Земли резко отличаются. Кроме того, граница между освещенной и неосвещенной сторонами может восприниматься как ложный горизонт.

Более широкое распространение получил способ построения вертикали с использованием собственного ИК (температурного) излучения Земли, позволяющий наблюдать диск Земли независимо от положения Солнца. Этот способ построения вертикали по ИК горизонту Земли получил название "ИК вертикали".

Несмотря на то, что земная атмосфера простирается над поверхностью Земли до высот, измеряемых сотнями километров, ее плотность резко уменьшается с увеличением высоты, так что приблизительно 85% атмосферной массы лежит ниже высоты 16 км. Основная часть содержащихся в атмосфере во-



Р и с. 3.10. Схема датчиков горизонта: а - для работы на стационарной орбите (1 - кодирующий диск, 2 - сканирующее зеркало, 3 - линза, 4 - фильтр, 5 - приемник, 6 - блок электроники); б - следящего типа (1 - мозаика термоэлементов, 2 - кремниевые фотоэлементы, 3 - моментный двигатель, 4 - кремниевая линза; 5 - призма, направляющая излучение Солнца на фотоэлементы, 6 - преобразователь угла поворота в напряжение); в - следящего типа без вращающихся деталей (1 - объектив, 2 - зеркала, 3 - приемники излучения)

дых паров, играющих большую роль в ее излучении, и около 50% атмосферной массы лежат в слое ниже 6 км. Высота ИК горизонта и стабильность его положения зависят от спектрального участка, в котором проводится наблюдение. Большие высоты и более высокая стабильность относятся к участкам спектра, соответствующим полосам поглощения атмосферы, меньшие высоты и стабильность - к измерениям в области "окон пропускания" атмосферы.

Эффективный горизонт Земли при наблюдении на участке интенсивной полосы поглощения CO_2 около 15 мкм при измерении на уровне 0,5 от интенсивности излучения в надир лежит примерно на 27 км выше, чем при наблюдении на длине волны 11 мкм. Следовательно, ИК горизонт на длине волны 15 мкм лежит значительно выше облаков и его положение не зависит от высоты облачности и метеорологических условий. В то же время в "окне прозрачности" атмосферы 8...12 мкм высота горизонта зависит от высоты облачности. Изменения высоты горизонта на длине волны 15 мкм оцениваются в 5-8 км и на 23 мкм (вращательная полоса поглощения водяных паров)

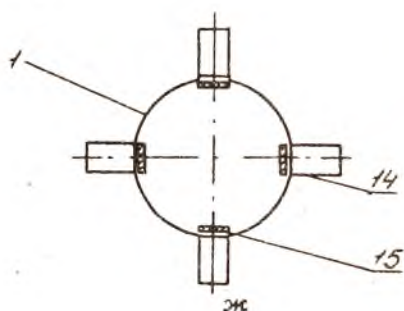
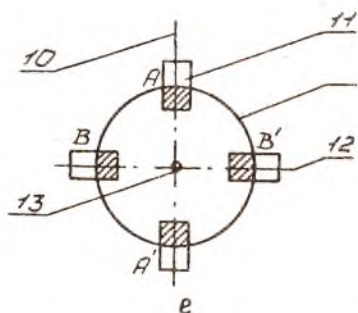
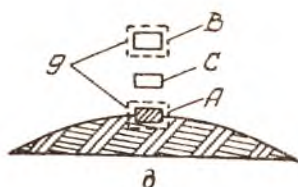
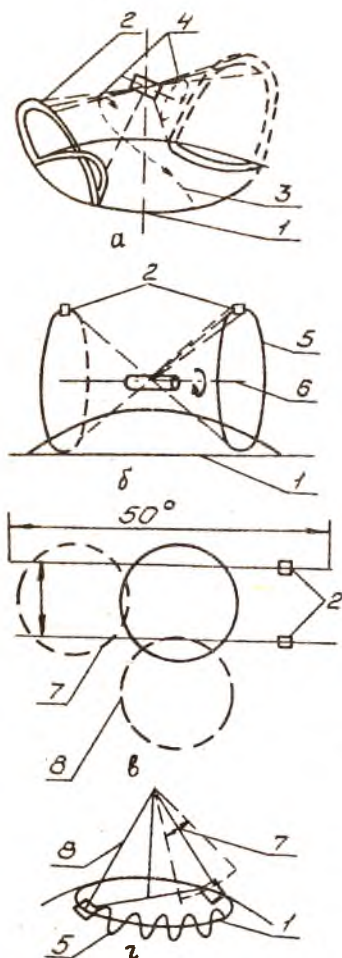
- 4-8 км. Для длин волн 12 и 18 мкм в районе "окон прозрачности" изменения охватывают всю тропосферу примерно до 18 км на экваторе. В связи с этим для получения минимальной ошибки определения местной вертикали, обусловленной неустойчивостью горизонта, используются датчики, работающие, как правило, в диапазоне спектра 14-16 мкм.

Типы датчиков горизонта. Существуют несколько типов датчиков горизонта, применяемых для построения вертикали: сканирующие, следящие и радиационно-балансные. В сканирующих датчиках горизонта используется сканирование узким мгновенным углом зрения по траектории сканирования обычно конической, пересекающей горизонт. Схема сканирования изображена на рис. 3.11,а. Для получения информации об ориентации по двум осям применяются две оптические сканирующие головки, ориентированные по этим двум осям. При прохождении мгновенного поля зрения через ИК горизонт возникают импульсы. Сигналы управления формируются путем обработки длительностей или фаз образующихся импульсов, сравниваемых с опорными импульсами.

На космических аппаратах (КА), стабилизированных вращением, могут использоваться датчики рассмотренного типа, но не имеющие вращающихся частей. Схема сканирования таких датчиков показана на рис. 3.11,б. Сканирование мгновенным углом зрения осуществляется за счет вращения самого КА. В датчиках сканирующего типа обычно применяются термисторные болометры или пирозлектрические детекторы, обладающие малой постоянной времени (1-5 мс) и низким уровнем шумов (эквивалентная мощность шумов $1,5 \cdot 10^{-10}$ Вт при частоте сканирования 15 Гц). В типовом широкоугольном сканирующем датчике, работающем по схеме, изображенной на рис. 3.11,г, сканирование осуществляется при помощи германиевой призмы, вращаемой синхронным мотором, по конусу с углом раствора 110° , мгновенным углом зрения $2 \times 8^\circ$. Скорость вращения призмы 30 об/мин. Приемник излучения - иммерсионный термисторный болометр.

Чувствительные элементы при переходе линии визирования через горизонт Земли вырабатывают импульсные сигналы, обусловленные тепловым контрастом между излучением Земли и космическим фоном. За один оборот зеркала линия визирования датчика дважды проходит через горизонт. Оба датчика вырабатывают сигналы рассогласования, пропорциональные углам между перпендикулярами к центрам хорд, соединяющих точки пересечения линий визирования с линией горизонта и осью летательного аппарата, которая должна совпадать с местной вертикалью.

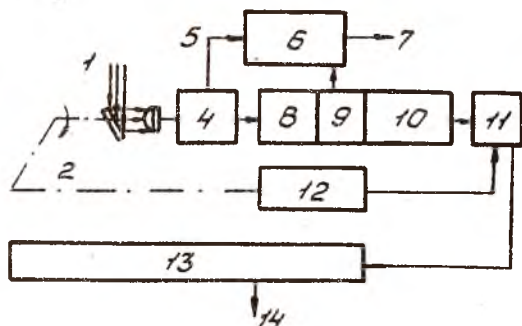
Структурная схема датчика вертикали по одному углу приводится на рис. 3.12. Прямоугольные импульсы с чувствительного элемента после усиления и ограничения подаются на фазовый детектор, в котором они сравниваются с фазой импульсов генератора опорного напряжения. Импульсы гене-



Р и с. 3.11. Схема работы датчиков: а - с коническим сканированием; б - со стабилизированным вращением; в - синхронного КА; г - следящего типа; д - следящего типа без вращающихся деталей; е - радиационно-балансового типа при непостоянной высоте орбиты; ж - того же

типа при постоянной высоте орбиты: 1 - тепловой горизонт Земли; 2 - мгновенный угол зрения; 3 - направление полета; 4 - направление сканирования; 5 - линия сканирования; 6 - ось вращения; 7 - угол качания; 8 - среднее положение линии визирования; 9 - поле зрения фотоэлементов; 10 - ось тангажа; 11 - поле зрения детектора; 12 - ось крена; 13 - местная вертикаль; 14 - поле зрения основного детектора; 15 - поле зрения компенсационного детектора

ратора опорного напряжения синхронизируются при вращении зеркала импульсами от электромагнитного снимающего устройства. После фазового детектора сигнал рассогласования усиливается усилителем постоянного тока. В схеме предусмотрена блокировка датчика в том случае, если в его поле зрения попадает Солнце. Масса датчика 1,5 кг, потребляемая мощность 4 Вт. Точность ориентации $\pm 0,5^\circ$.



Р и с. 3.12. Структурная схема датчика вертикали: 1 - ИК лучи; 2 - вращающееся зеркало; 3 - иммерсионный болометр; 4 - предварительный усилитель; 5 - сигнал от Солнца; 6 - блок обнаружения данных с выхода датчика; 8 - широкополосный усилитель; 9 - центрирующая цепь; 10 - фазоинвертор и ограничитель; 11 - фазовый детектор; 12 - генератор опорных импульсов; 13 - усилитель постоянного тока; 14 - сигнал рассогласования

У сканирующего датчика (рис. 3.10, а) для работы на стационарной орбите сканирование осуществляется в пределах угла 50° одновременно и параллельно двумя мгновенными полями зрения, разнесенными на 12° . Сканирование обоими мгновенными полями зрения осуществляется за счет качания плоского зеркала при помощи вибратора с электромагнитным приводом (рис. 3.11, в). Компенсация нелинейности закона движения мгновенными полями зрения во времени происходит за счет обработки сигнала по углу поворота сканирующего диска с муаровым растром, с которого снимаются отсчеты, пропорциональные углу поворота сканирующего зеркала в моменты переходов мгновенного поля зрения через ИК горизонт. Выходные сигналы определяются в результате сравнения временных промежутков между импульсами, возникающими при входе и выходе поля зрения с диска Земли, с опорным импульсом (отклонение по тангажу), а также сравнения промежутков между обоими импульсами для двух полей зрения (отклонения по крену). Размеры датчика $10,8 \times 11,4 \times 17,8 \text{ см}^3$, масса 1,8 кг. Потребля-

емия мощность 5 Вт. Диаметр входного зрачка объектива 38 мм. Мгновенное поле зрения $1,1 \times 1,1^\circ$. Рабочий спектральный диапазон 14,1...15,8 мкм. Линейная зона работы датчика по тангажу $\pm 10^\circ$ и по крену $\pm 2,5^\circ$. Точность определения вертикали (в районе нуля) $\pm 0,05^\circ$ (при среднеквадратических отклонениях).

Следящие датчики горизонта объединяют в себе обычно несколько головок, следующих непосредственно за линией горизонта Земли. Измеряется угол между оптическими осями следующих головок и опорной осью и рассчитывается положение осей тангажа и крена. В одних случаях следящие головки расположены через определенные угловые интервалы по азимуту, например через 120° , и следят за какой-нибудь точкой горизонта, в других случаях головки осуществляют сканирование в азимутальном направлении и следят за линией горизонта.

Схема слежения одним из следящих датчиков горизонта показана на рис. 3.11,г. Датчик имеет головку с небольшим полем зрения (обычно $1 \times 1^\circ$), которая осуществляет нутационные колебания оптической оси относительно горизонта в пределах угла около 5° с частотой около 20 Гц. Кроме того, происходит медленный разворот головки в пределах угла $80-90^\circ$ вдоль линии горизонта. Датчик такого типа имеет точность меньше $0,15^\circ$, масса датчика 6 кг, потребляемая мощность 6 Вт.

Датчик горизонта следящего типа для автоматической ориентации КА одновременно работает с двумя датчиками, размещенными в одноосном кардановом подвесе, позволяющем производить поисковое сканирование полем зрения по углу возвышения. Схема расположения полей датчика показана на рис. 3.11,д. В качестве объектива используется кремниевая линза, в фокальной плоскости которой расположены три термоэлемента. При помощи электронной коммутирующей схемы термоэлементы подсоединяются на вход синхронного демодулятора. Поле зрения термоэлемента А касается ИК горизонта Земли, а поля В и С направлены в космос. Датчик замеряет уровень лучистого потока Земли относительно космоса при последовательном подключении к демодулятору термоэлементов А и В. Для исключения помех от Солнца используются кремниевые фотоэлементы, поля зрения которых наложены на поля зрения термоэлементов А и В. В случае попадания изображения Солнца в поля зрения А или В по сигналу фотоэлемента, нечувствительного к излучению Земли, поле зрения В заменяется на поле зрения С, расположенное на 1° ниже. Углы поворота рамы карданового подвеса считаются электронным преобразователем "угол-напряжение" и в виде электрических сигналов подаются в логический блок для вычисления углового отклонения осей летательного аппарата.

В модифицированном приборе следящего типа имеются три идентичных

датчика, объединенных в систему слежения за ИК горизонтом. Датчики имеют плоское следящее зеркало, параболический зеркальный объектив, оптический фильтр с полосой пропускания в диапазоне длин волн 14-16 мкм и детектор. Следящее зеркало закреплено на концах двух пар биметаллических пластин. Вторые концы пластин закреплены на основании. При изменении температуры пластин меняется угол наклона зеркала. Пластины нагреваются при пропускании через них электрического тока. Для удлинения пути электрического тока в пластинах сделаны продольные прорезы. Концы пластин заделаны в фишки из стекловолокна.

Для определения положения следящего зеркала относительно КА используется высокоточная считывающая система, содержащая считывающее зеркало, соединенное со следящим зеркалом стойками. Считывающая система имеет также систему линз и масок. Для освещения масок используется неоновая лампа. Свет, прошедший через маски, поступает на четыре фотозлемента.

Детектор датчика представляет собой систему из трех термопар на одном основании, фиксирующих сигнал зоны горизонта под углом около 3° . При этом, если одна крайняя термопара направлена на 3° выше горизонта, выходной сигнал равен сумме сигналов крайних термопар минус сигнал от средней термопары. Ширина поля зрения средней термопары в два раза больше ширины поля зрения крайних. Выходной сигнал равен нулю, когда средняя термопара направлена на середину перепада излучения у горизонта. При сдвиге от этого положения возникает сигнал, амплитуда которого зависит от величины, а знак от направления сдвига. Сигнал также равен нулю, когда все термопары направлены только на космос или на Землю. Постоянный поток термопар модулируется прерывателем, а затем усиливается, выпрямляется и поступает на фазовый инвертор, подающий сигнал на ту или другую пару биметаллических пластин следящего зеркала. Преимуществом прибора считается высокая точность при отсутствии постоянно движущихся частей и подшипников. Прибор имеет режим калибровки и измерения.

В одном из датчиков следящего типа (см. рис. 3.10, в) без вращающихся частей для сканирования используется качание зеркал под воздействием электромагнита. Отсутствие вращающихся частей позволяет увеличить срок службы датчика и избавиться от решения довольно сложной проблемы сохранения смазки в подшипниках в условиях почти абсолютного вакуума, имеющего место в космосе. Образец датчика имеет массу менее 230 г. Незначительное потребление электроэнергии (10 мВт) позволяет уменьшить массу аппаратуры и занимаемый ею объем за счет сокращения необходимых для ее питания солнечных батарей и аккумуляторов.

Колебательное устройство используется для качания четырех маленьких зеркал, при помощи которых осуществляется обзор Земли в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Зеркала укреплены на симметрично установленных плоских пружинах, соединенных одним концом со звуковой катушкой, а другим с корпусом. На рис. 3.10, в показаны два зеркала, позволяющие просматривать пространство в одном направлении. Изображение Земли образуется линзовым объективом в плоскости изображения, показанной на рисунке. Небольшие же участки изображения краев Земли при помощи зеркал создаются на приемных площадках ИК детекторов, изготовленных из антимонида индия. При колебаниях звуковой катушки зеркала синхронно качаются, чем достигается просмотр горизонта Земли у диаметрально противоположных краев и получение импульсов на выходе ИК детекторов.

В функциональной схеме сравнения импульсов и получения управляющих сигналов по одному направлению частота следования импульсов соответствует скорости сканирования. Однако если просматриваемый объект (Земля) не находится на оптической оси, то длительности импульсов от противоположных детекторов не равны. На выходе ограничителей сигналы имеют постоянный уровень независимо от яркости объекта, чувствительности фотоэлементов или коэффициента усиления разных каналов. Далее происходит выпрямление и фильтрация импульсов и получение постоянного напряжения, пропорционального длительности импульсов.

Постоянное напряжение подается на дифференциальный усилитель, вырабатывающий сигнал рассогласования, который равен нулю, если объект находится на оптической оси. В остальных случаях вырабатывается сигнал, величина и знак которого зависят от положения объекта относительно оптической оси. Генератор звуковых колебаний вырабатывает переменное напряжение определенной фиксированной частоты, равной резонансной частоте колебаний сканирующего устройства, что позволяет затрачивать минимальное количество энергии на обеспечение сканирования. Сигналы генератора подаются на усилитель мощности. Автоматическая регулировка усиления (АРУ) позволяет обеспечивать необходимую амплитуду колебаний при сканировании. На автоматический регулятор усиления подаются сигналы рассогласования и выпрямленные напряжения со всех детекторов. Счетно-решающее устройство определяет оптимальный режим колебаний зеркал. Большая амплитуда сканирования имеет место при значительной величине сигнала рассогласования по одному или обоим каналам. Сканирование с максимальной амплитудой происходит в том случае, если сигналы рассогласования и выпрямленные напряжения равны нулю. Это возможно, если в поле обзора нет Земли и необходима большая амплитуда колебаний для ее поиска.

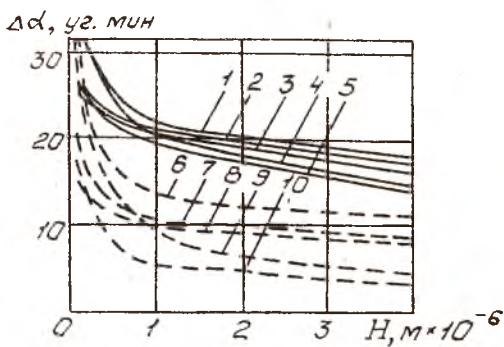
При малых сигналах рассогласования амплитуда колебаний зеркал уменьшается, что позволяет повысить точность определения направления на центр Земли при нахождении его примерно на оптической оси системы.

Радиационно-балансные датчики служат для непосредственного определения местной вертикали как направления на центр диска Земли. Изображение Земли проектируется на систему неподвижных ИК детекторов. Сигнал рассогласования по каждой оси пропорционален разности сигналов в соответствующей паре противоположных детекторов. При одинаковой чувствительности детекторов и равномерной яркости диска планеты ошибка ориентации равна нулю при ориентации на центр диска. Схема расположения полей зрения детекторов изображена на рис. 3.11,е. При постоянной высоте орбиты, например геостационарной, применяется схема рис. 3.11,ж, при которой используются дополнительные участки поля зрения ниже линии горизонта (радиационно-компенсационные поля зрения), что позволяет уменьшить ошибку ориентации при малых углах рассогласования.

Основным достоинством радиационно-балансных датчиков считается отсутствие подвижных частей, малое энергопотребление, небольшая масса и высокая надежность. В качестве детектора в датчиках такого типа применяются обычно терморпары, вырабатывающие собственный термоток. Один из типичных радиационно-балансных датчиков использует в качестве детектора антимонидно-висмутовые терморпары. Точность ориентации датчика $\pm 0,3^\circ$. Масса 1,5 кг, потребляемая мощность 3 Вт. У разрабатываемых датчиков планируется точность до $\pm 0,1^\circ$.

К радиационно-балансным датчикам близки и корреляционные датчики. В последних производится сравнение не самих сигналов, а корреляционных функций сигналов, снимаемых в каждой паре детекторов.

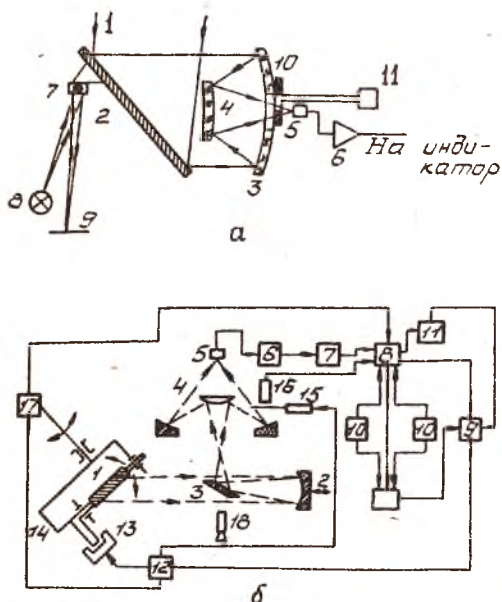
Точность определения ИК вертикали зависит от ошибки выбранного метода построения вертикали (методическая ошибка), т.е. от типа датчика и приборной ошибки, зависящей от конструктивных параметров конкретного разработанного образца (рис. 3.13).



Р и с. 3.13. Зависимость угловой ошибки определения местной вертикали от высоты полета КА для различных типов датчиков: 1, 2 - радиационно-балансные; 3, 4 - следящие; 5, 6 - сканирующие; 7, 8 - следящие за горизонтом Земли по всему кругу; 9, 10 - корреляционные

3.4. Тепловизионная техника

Разновидности тепловизионных приборов. Тепловизионные приборы подразделяются на низкоскоростные, среднескоростные и быстродействующие.



Р и с. 3.14. Структурная схема тепловизоров: а - "Опти-терм": 1 - излучение от объекта; 2 - сканирующее зеркало; 3 - параболическое зеркало; 4 - гиперболическое зеркало; 5 - приемник излучения; 6 - предусилитель; 7 - плоское зеркало; 8 - источник света; 9 - регистрирующая пленка; 10 - модулятор; 11 - двигатель; б - "Рубин-3": 1 - сканирующее зеркало; 2 - зеркальный объектив; 3 - плоское зеркало; 4 - конденсатор; 5 - приемник излучения; 6 - предусилитель; 7 - фильтр; 8 - блок усиления; 9 - регистрирующее устройство; 10 - аттенуаторы; 11 - цифровые анализаторы; 12 - синхронизаторы; 13 - генератор колебаний; 14 - торсион; 15 - абсорбатор; 16 - фотодиод; 17 - привод; 18 - визир

Представителями низкоскоростных тепловизоров является тепловизор "Опти-терм" (США) и отечественный тепловизор "Рубин-3" (рис. 3.14). Эти приборы используют одноэлементный приемник. В тепловизоре "Опти-терм" применен неохлажденный полупроводниковый болометр, в тепловизоре "Рубин-3" - фотосопротивление из сурьмянистого индия, охлаждаемое жидким азотом. "Опти-терм" образует кадр в течение 30 с и обладает высоким температурным разрешением $0,05^{\circ}\text{C}$, а "Рубин-3" сканирует кадр в течение 40 с при 240 строках на кадр; температурное разрешение его $0,1^{\circ}\text{C}$.

Система регистрации изображения тепловизора "Опти-терм" предусматривает жесткую синхронизацию качающегося зеркала, сканирующего кадр, со световым пятном от источника света, проецируемым на обратную сторону сканирующего зеркала, отражаясь от которого, луч

производит запись сигнала на фотопленке. При этом степень почернения пленки зависит от уровня сигнала, вырабатываемого приемником при сканировании, что позволяет создать на снимке картину распределения температуры на рассматриваемом объекте.

Дальнейшее совершенствование тепловизионной аппаратуры - в направлении обеспечения ее быстродействия с целью возможности наблюдения процессов в реальном масштабе времени, улучшения характеристик тепловизионной аппаратуры по угловому и температурному разрешению. Для тепловизоров с одноэлементным приемником модернизация состояла в увеличении скорости сканирования путем применения вращающихся зеркальных многогранников или строчной и кадровой разверток на двух вращающихся пропускающих призмах (как это было осуществлено в шведском тепловизоре АГА-680) и с помощью сканирующего зеркала и вращающейся пропускающей призмы из монокристалла (в отечественном тепловизоре БТВ-1).

Тепловизор АГА-680 включает два блока: тепловизионную камеру и видеоблок. Тепловизионная камера имеет на входе объектив из поликристаллического кремния. Сканирующие призмы изготовлены из германия. Восьмигранная призма, вращающаяся с частотой 200 об/с, осуществляет строчную развертку, а кадровая с частотой 2 об/с обеспечивает частоту сканирования 16 Гц, достаточную для наблюдения движущихся объектов в реальном масштабе времени с помощью ВКУ на ЭЛТ. Изображение объекта наблюдается в виде картины, состоящей из светлых и темных участков; светлые участки соответствуют теплым участкам объекта, темные - холодным. Температурное разрешение тепловизора 0,2°C при температуре объекта наблюдения 300 К. Приемник тепловизора АГА-680 - фотосопротивление из антимолибдита индия, охлаждаемое жидким азотом, что обеспечивает эксплуатацию тепловизора в течение 4 ч.

Тепловизор ТВ-03 (БТВ-1), предназначен для определения локального перегрева биологических объектов. Он отличается хорошей разрешающей способностью по температуре, равной 0,2°C, и быстродействием - 16 кадр/с. В его комплект входят две насадочные линзы для уменьшения рабочего расстояния до минимального 0,8 м и увеличения его в 1,3 раза. При этом плоскость предмета располагается на расстоянии 170-240 мм от вершины поверхности линзы. Третья линза, изготавливаемая из германия, обеспечивает поле зрения 13x13 мм (для локальных областей). Индикатором служит ЭЛТ типа II ЛК1Б, на которой воспроизводится тепловой сигнал. Тепловизор имеет электронное устройство для измерения температуры в выбранной точке поля, наблюдаемой в тепловизор. Кроме того, в тепловизоре ТВ-03 имеется ВКУ цветного изображения наблюдаемой картины, необходимое для лучшего различения минимальных перепадов температур. При этом цветовая индикация обеспечивает высокое разрешение с большей скоростью, чем чернобелая, что снижает утомляемость оператора при массовых профилактических осмотрах. Разрешающая способность повышается также за счет выбора соседних цветов, что делает изображение более контрастным. Располагая

Ю-цветным изображением, оператор имеет возможность передавать значительные перепады температуры, которые между отдельными цветами достигают $0,2^{\circ}\text{C}$.

Приведем примеры других тепловизоров. Тепловизор "Радуга МТ" с цветовым изображением с частотой кадров 25 Гц, достаточной для воспроизведения движущихся картин при поле зрения 20×18 град, мгновенном угле 7 угл.мин и температурном разрешении $0,2^{\circ}\text{C}$. Прибор "Радуга МТ" имеет ВКУ с цветовым градуировочным клином, а на черно-белом ВКУ отмечаются диапазон регистрируемых температур, номер кадра и температура в точке.

Области применения тепловизоров. Так, в процессе производства и при эксплуатации электрических машин большой мощности появляются дефекты в виде нарушения лаковой изоляции между листами активной стали, что вызывает локальный нагрев статоров турбогенераторов и синхронных компенсаторов. Тепловизор-дефектоскоп "Статор-1" позволил обнаруживать дефекты еще в процессе изготовления электрических машин и при проведении профилактических ремонтов на тепловых электростанциях. Это обеспечило в короткий срок выявление дефекта изоляции и его устранение, а следовательно, и экономию значительных средств. Тепловизор-дефектоскоп "Статор-1" обеспечивает температурное разрешение 1°C при окружающей температуре $+20^{\circ}\text{C}$ и линейное разрешение не более 5 мм для статоров диаметром до $1,5$ м и 10 мм для статоров диаметром до 3 м. Диапазон расстояний при дефектоскопии статоров электрических машин в пределах от 45 см до $1,5$ м, при этом мощность, потребляемая тепловизором, не превышает 300 Вт.

Большое значение в технике неразрушающего дистанционного контроля имеет способ проверки опорной и подвесной изоляции, а также контактных соединений на подстанциях и на высоковольтных линиях, когда с помощью тепловизионной аппаратуры проверяется состояние высоковольтных изоляторов на линиях электропередач. Применение этого метода позволяет вести дистанционный контроль, не прибегая к обесточиванию линий. Исследования показали, что для дефектоскопии контактных соединений нет необходимости применять сложные тепловизионные приборы. Такие работы могут осуществляться более простым устройством чувствительностью $0,1^{\circ}\text{C}$, имеющим выход на стрелочный прибор.

Развертка по кадру в этой аппаратуре может осуществляться движением самого носителя-самолета. Выполнение задач тепловизионной развертки и наблюдения реализуется системой RS-700, действующей в диапазоне $8-14$ мкм, где атмосферные помехи минимальны. Система использует в качестве детектора теллурид кадмия и ртуть, что и в тепловизионных приборах для сухопутных войск, и систему охлаждения замкнутого типа по циклу Стир-

линга. Детекторная матрица этой аппаратуры состоит из шести элементов: в два ряда по три элемента в каждом. Температурная чувствительность аппаратуры $0,3^{\circ}\text{C}$ при линейном разрешении $1,5...2$ мрад. Общее поле зрения при движении носителя составляет 120 град. Запись изображения ведется на пленку, а также рассматривается наблюдателем на ЭЛТ ВКУ.

Изучение природных ресурсов Земли с помощью тепловизионной самолетной аппаратуры осуществляют самолетным тепловизором для географических исследований "Вулкан" и авиационным тепловизором для самолетов и патрульных вертолетов для обнаружения очагов пожара "Тайга-2". Тепловизор "Вулкан" располагает двумя тепловизионными каналами, действующими в спектральной области $3,2...5,2$ и $8...14$ мкм. Температурная чувствительность тепловизора $0,25$ К, а угловое разрешение $5...7$ угл.мин. Эффективное поле обзора 80 град. Тепловизор "Тайга-2" имеет только один канал с длиной волны от $3,2$ до $4,7$ мкм с более низкими по характеру выполняемых задач характеристиками: температурным разрешением $2,5$ К и угловым -20 мин. Однако поле обзора этого тепловизора достаточно велико - 120 град, что существенно облегчает выполнение задач по разведке очагов пожаров.

Метеорологические спутники также оснащаются сканирующими радиометрами, как принято называть эти приборы в космической терминологии. Так, метеоспутники "Нимбус-У", "Химавари", "Метеосат" имеют ИК-радиометры, ведущие наблюдение метеобстановки на фоне Земли в видимом и ИК-спектрах, в том числе многоканальные, передающие изображение Земли в ближней ИК-области ($0,8...1,1$ мкм) и двух дальних областях - $8,3...9$ и $10,2...11,2$ мкм. При этом первый канал ведет съемку воды, суши и растительности, второй предназначен для определения горных пород, а третий обеспечивает получение данных о температуре и влажности почвы. Инфракрасным радиометром был оснащен также космический аппарат "Аполлон", который исследовал излучение поверхности Луны с селеноцентрической орбиты. Аналогичную информацию передают на Землю ИСЗ "Метеор", действующий на круговой орбите, удаленной от Земли на расстояние $625-630$ км. ИК-радиометры, установленные на ИСЗ "Метеор", сканируют поверхность Земли в узком поле с мгновенным значением $1,5 \times 1,5$ град, что обеспечивает регистрацию полосы шириной около 1100 км в спектральной области $8-12$ мкм, отвечающей максимуму излучения Земли и атмосферы. Орбитальная станция "Салют-4" имела на борту ИК-телескоп-спектрометр ИТС-К, предназначенный для измерения внеатмосферных спектров излучения Луны в области $1-8$ мкм. Наведение его осуществлялось визиром с электронно-оптическим преобразователем.

Спектральное разрешение прибора $0,2...0,3$ мкм, линейное - 8×16 угл.мин.

3.5. Приборы ночного видения

Принцип преобразования невидимого излучения в поток электронов, а затем с помощью электролюминофоров в видимый глазом человека свет открывает широкие возможности для создания средств регистрации и наблюдения процессов, происходящих за пределами спектральной чувствительности человеческого зрения.

Интенсивные работы в области электрооптики привели к освоению в производстве электронно-оптических преобразователей (ЭОП) и усилителей яркости изображения (УЯИ) для приборов ночного видения, астрономии, низкоуровневого телевидения, рентгеноскопии, исследований в области высоких энергий и ядерной физики. Быстродействие ЭОП (до 10^{-12} с) делает их незаменимыми в аппаратуре регистрации быстротекущих процессов в качестве затворов. Низкоуровневое телевидение УЯИ с успехом применяется для дистанционного контроля в ядерных исследованиях.

Схема ЭОП для визуальной регистрации невидимого изображения довольно проста (с современной точки зрения). В вакуумном стеклянном цилиндре на один из торцов (назовем его входным) наносится полупрозрачный светочувствительный слой из окиси серебра, легированного цезием (кислородно-цезиевый серебряный фотокатод), с выведенным наружу проводником. Противоположный торец покрывается изнутри слоем люминофора, на который наносится полупрозрачный металлизированный экран, соединенный с проводником, выведенным наружу. Если на фотокатод такого преобразователя, называемого стананом Холста, направить поток ИК-лучей или сфокусированное объективом изображение какого-либо предмета в ИК-лучах, то его кванты вырывают из фотокатода электроны, которые под действием ускоряющего поля, создаваемого высоким напряжением, направляются к экрану, где в месте соударения электронов с люминофором возникает свечение, наблюдаемое глазом.

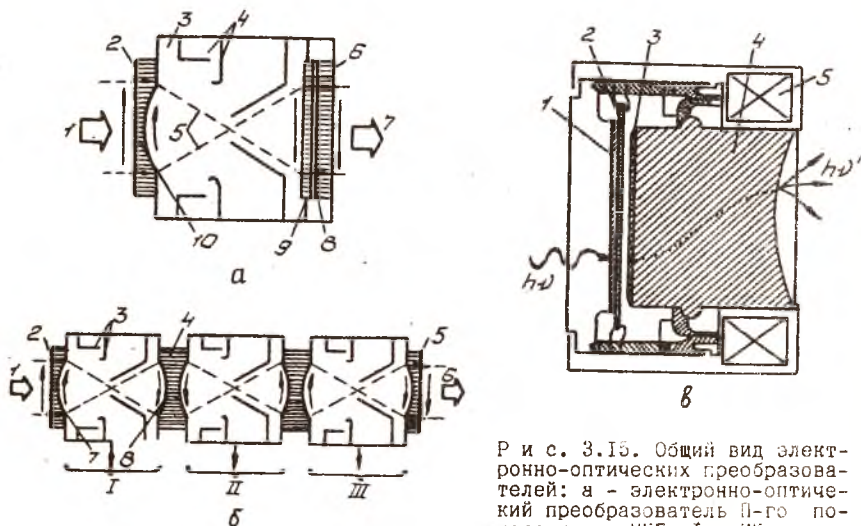
Таким образом, процесс преобразования ИК-излучения в видимое происходит по следующей схеме: высвобождение электрона из светочувствительной мишени (фотокатода) в результате ее взаимодействия с фотоном ИК-излучения - перенос электрона к экрану электрическим полем - люминесценция, обратный эффект, в котором электрон, бомбардирующий люминесцентный экран, создает фотон. Это процесс, называемый двойным преобразованием, выражается таким образом: $h\nu_1 \rightarrow e \rightarrow h\nu_2$, где $h\nu_1$ и $h\nu_2$ - энергии падающего и вылетающего фотонов с частотами ν_1 и ν_2 ; h - постоянная Планка, равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Реальные ЭОП, применяемые в ПНВ - это довольно сложные в конструктивном и техническом отношении электровакуумные приборы. Физические

процессы, происходящие в них, практически не отличаются от описанных выше, с той лишь разницей, что ЭОП со сферическим фотокатодом представляет собой отработанный образец, пригодный для использования в различных областях техники. Процесс преобразования в этом ЭОП, называемом по современной терминологии трубкой нулевого поколения, начинается с вылета фотоэлектронов из катодного слоя при проецировании на него ИК-излучения. Количество освобожденных фотоэлектронов зависит от плотности и интенсивности излучения на фотокатод, а их поток в целом оказывается промодулированным в пространстве картиной, заложенной в потоке излучения, воспринятом объективом. Ускорение вылетающих из фотокатода фотоэлектронов происходит под действием электрического поля, образованного высоким напряжением, приложенным к экрану трубки: фотоэлектроны получают энергию. Под действием фотоэлектронов, бомбардирующих экран, возникает свечение люминофора экрана, но уже в видимой области, которое можно наблюдать невооруженным глазом. При этом изображение на экране по распределению светлых и темных мест отвечает картине, спроецированной на фотокатод, но по энергетическим характеристикам интенсивность на выходе трубки (экране) будет в 20-50 раз больше, чем интенсивность излучения на ее входе. Такое усиление называется фотонным, т.е. световым.

Пассивные приборы ночного видения. Основой создания пассивных приборов ночного видения (ПНВ) послужил все тот же электронно-оптический преобразователь, основными элементами которого служат фотокатод, фокусирующая система и экран. Люминесцентный экран, главными характеристиками которого являются светоотдача и высокая разрешающая способность, был отработан достаточно полно и резервов на улучшение не имел. Ускоряющее напряжение и электронная линза также не сулили большого успеха при модернизации, поэтому основные усилия по повышению чувствительности ЭОП были направлены на создание фотокатода с повышенной квантовой эффективностью из новых материалов. Поиски новых материалов привели почти одновременно с разработкой фотокатода **SI** к новому фотокатоду **SII** на основе щелочно-земельных металлов - калия, натрия и цезия с добавкой сурьмы, в результате чего удалось повысить квантовый выход по сравнению с **SI** почти в три раза. Несмотря на это, **SII** не нашел применения в ЭОП, так как его спектральная характеристика имеет максимум в области длины волн 0,4...0,6 мкм, не представляющей интереса для ночного видения. В то же время этот фотокатод отличается от фотокатодов кислородно-цезиевого типа незначительной величиной термоэлектронной эмиссии при температуре выше нуля градусов, в то время как кислородно-цезиевый фотокатод обеспечивал высокую эффективность и отсутствие теплового шума только при охлаждении, что было совершенно неприемлемо для переносных приборов.

Активные приборы ночного видения. В результате интенсивных разработок были созданы ЭОП-трубки модульной конструкции с фотокатодами и экранами диаметром 18, 25 и 40 мм. Новые трубки являются переходом к технологии ПНВ активного типа от пассивных ПНВ, использующих усиление яркости изображения. Изображенная на рис. 3.15, а трубка представляет собой однокамерный преобразователь или однокамерную трубку. Ускоряющее напряжение такой трубки 15 кВ. Ее конструкция на первый взгляд довольно проста, но для того чтобы ее осуществить, потребовалось не одно десятилетие исследований в самых разных областях.



Р и с. 3.15. Общий вид электронно-оптических преобразователей: а - электронно-оптический преобразователь II-го поколения на МКП: 1 - ИК-излучение; 2 - волоконно-оптическое входное окно; 3 - вакуум; 4 - фокусирующие электроды; 5 - пучок электронов; 6 - волоконно-оптическое выходное окно; 7 - видимый свет; 8 - экран; 9 - микроканальная пластина (МКП); 10 - фотокатод; б - трехкамерный ЭОП из трех усилителей, соединенных световодом; 1 - ИК-излучение; 2 - волоконно-оптическое входное окно; 3 - фокусирующие электроды; 4 - волоконно-оптическая соединительная плата; 5 - волоконно-оптическое выходное окно; 6 - свет (выход); 7 - фотокатод; 8 - фосфорный экран; в - электронно-оптический преобразователь III-го поколения с фотокатодом на арсениде галлия: 1 - фотокатод; 2 - микроканальная пластина; 3 - экран; 4 - волоконно-оптический элемент поворота изображения на 180° ; 5 - торoidalный источник питания

Промышленный образец трубки при внутреннем увеличении (катод-экран) меньше единицы обеспечивает коэффициент усиления около 80, что делает возможным наблюдение в ПНВ на ее основе только в лунную ночь, да и то в том случае, когда рассматриваемый предмет находится на открытом мес-

те. В менее благоприятных условиях прибор с такой трубкой не обеспечивает решение задач ночного видения, поэтому начались поиски новых путей с целью достижения коэффициента усиления не менее 10000. Одним из таких путей стал простой на первый взгляд, но весьма сложный в технологическом отношении способ каскадного усиления, реализованный в фотумножителях. Так, соединяя выходной экран одной модульной трубки с входным фотокатодом другой, можно (при условии хорошего оптического контакта) получить значительное усиление яркости спроецированного на входной фотокатод первой трубки слабо освещенного изображения. ЭОП (трубка) такого вида называется двухкамерным или однокаскадным, так как первая камера является преобразователем ИК-изображения в видимое, а вторая - каскадом усиления яркости изображения. Трехкамерный преобразователь (рис. 3.15,б) носит название двухкаскадного, так как имеет два каскада усиления. Коэффициент усиления повышается с числом каскадов: если однокамерная трубка-преобразователь имеет коэффициент усиления около 80, то двухкамерная с усилением яркости изображения (УЯИ) в виде одной камеры - уже 4000. Трехкамерная трубка имеет коэффициент усиления порядка 50000, что дает возможность реализовать на ее основе ПНВ для наблюдения ночью без подсветки целей ИК-прожектором, т.е. абсолютно пассивное наблюдение, ничем себя не демаскирующее. Сравнительные характеристики усилителей яркости I-го поколения приведены в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

Характеристики усилителей яркости I-го поколения

Характеристика	Тип усилителя		
	однока- мерный	двухка- мерный	трехка- мерный
Коэффициент усиления	80	4000	50000
Разрешающая способность, лин/мм	65	40	25
Искажение, %	6	14	17
Полезное поле на выходе (диаметр), мм	25	24	23

Толчком к поиску новой технологии послужили описанные выше недостатки УЯИ I-го поколения - чрезмерная величина яркости в условиях засветок и большие габаритные размеры трубок, обусловленные технологией, не изменившейся со временем ЭОП нулевого поколения.

Новая технология вместо каскадной системы УЯИ предложила способ умножения электронного потока, образованного воздействием внешнего излучения на фотокатод взамен применявшегося в УЯИ I-го поколения спо-

соба сообщения фотоэлектронам ускорения путем приложения высокого напряжения. При этом электронный поток не подвергался фокусировке и проецированию на фосфорный экран, а прямо при вылете фотоэлектронов из фотокатода направлялся непосредственно на близлежащую пластину, называемую микроканальной и представляющую собой диск с огромным числом микроскопических каналов, являющихся фотоэлектронными умножителями, путем возбуждения в каналах эффекта вторичной электронной эмиссии аналогично процессу, имеющему место в различного рода фотоумножителях, применяемых в оптико-электронных приборах.

Микроканальная пластина, называемая сокращенно МКП, содержит 1 миллион 760 тысяч микроскопических каналов ($5000 \text{ на } 1 \text{ мм}^2$) диаметром 12 мкм каждый. Конечно, геометрические размеры и число микроканалов варьируются в широких пределах в зависимости от назначения. При попадании первичного электрона, вылетающего из фотокатода, на внутреннюю поверхность микроканала, состоящую из полупроводникового материала, возникает некоторое количество вторичных электронов, которые, ударяясь о стенки, вызывают лавинный процесс умножения, в результате чего при соударении электронного потока с экраном возникает свечение, яркость которого в десятки тысяч раз превышает яркость ИК-излучения на фотокатоде трубки. Источником энергии, вызывающим лавинный процесс умножения, является электрическое поле, образованное приложенным к экрану и МКП высоким напряжением. При этом необходимо отметить, что приложенное здесь высокое напряжение (около 1 кВ) в десятки раз меньше напряжения, необходимого для питания камер УЯИ I-го поколения. Длина канала МКП около 45 его диаметров. Каналы имеют наклон, чтобы вылетевший из фотокатода электрон не пролетел вглубь, а ударяясь о край, многократно отражался от него, образуя лавинный процесс. В отличие от УЯИ I-го поколения ускоряющее напряжение вследствие незначительного промежутка между МКП и экраном создает однородное электрическое поле, что обеспечивает воспроизведение изображения после МКП без фокусировки, а это существенно сокращает осевую длину трубки. Так как коэффициент усиления не зависит от размера канала, его диаметр выбирается в зависимости от заданной величины разрешающей способности, чтобы расстояние между центрами микроканалов составляло от 10 до 15 мкм. Уменьшение расстояния может улучшить разрешение, но тогда уменьшается прочность самой пластины, что недопустимо. Более эффективным способом повышения разрешающей способности является использование увеличительной электронной оптики перед МКП, например 20/30, за счет использования большого количества микроканалов в формировании изображения. Кроме того, в этом случае существенно уменьшается коэффициент шума. Входное окно трубки с УЯИ 2-го поколения представляет со-

бой пластину из оптического волокна с нанесенным на внутреннюю сторону фотокатодом, используемым в трубках с УЯИ 1-го поколения. Люминесцентный экран трубки 2-го поколения состоит из фосфора типа 10-15, излучающего в области 0,55 мкм, отвечающей максимальной спектральной чувствительности глаза.

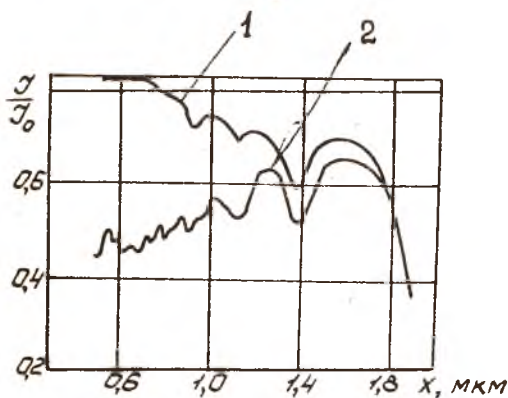
Существует два типа трубок УЯИ 2-го поколения. Первый напоминает по конструкции однокамерный ЭОП нулевого поколения с фотокатодом и электронной фокусирующей линзой с той лишь разницей, что в трубке с УЯИ 2-го поколения электронный поток с фотокатода поступает непосредственно на МКП, в то время как в трубке нулевого поколения он фокусируется электронной линзой на экран ЭОП. Усиленный микроканальной пластиной поток электронов ускоряется интенсивным однородным электрическим полем, образованным в узком вакуумном промежутке, и бомбардирует люминесцентный экран, на котором возникает видимое изображение. Такой усилитель имеет усиление по световому потоку до 1000 раз при коэффициенте усиления от 10000 до 50000, что обеспечивает возможность создания ПНВ, действующих при низких освещенностях. Трубки такого вида выпускаются в различных модификациях: с одинаковыми диаметрами на входе и выходе - 18 или 25 мм и с отношением входного и выходного диаметров 20:30 или 50:40, т. е. с увеличением или уменьшением в зависимости от требований к разрешающей способности и полю зрения.

Второй тип усилителя 2-го поколения использует перенос электронного изображения дважды: от фотокатода на вход МКП и с выхода МКП на люминесцентный экран. Такой эффект достигается особыми приемами в технологии и конструкции трубки с помощью высокого вакуума (технология вакуумного переноса). Трубки, изготовленные по такой технологии, называются слоистыми и отличаются высокой компактностью. С помощью слоистой трубки изображение в ПНВ воспроизводится без искажений размеров входа и выхода, т.е. происходит только усиление яркости изображения. В случае необходимости трубка снабжается на выходе волоконно-оптическим элементом, обеспечивающим поворот изображения на 180°, что позволяет существенно уменьшить длину ПНВ. Поворотное устройство имеет малую осевую длину и небольшие потери в пропускании света. Образец трубки имеет диаметр 18 мм при коэффициенте усиления 10000. Слоистые трубки легки, компактны и применяются в приборах, главным качеством которых является портативность, например, в очках ночного видения. Слоистые трубки имеют осевую длину 40 мм и диаметр (с крепежными кольцами) 36 мм, в то время как длина трехкамерной трубки 1-го поколения более 200 мм. УЯИ 2-го поколения обладает еще одним бесценным качеством: они менее чувствительны к засветкам. При попадании светящегося тела в поле зрения ПНВ 2-го поколения засветка носит локальный характер и возникает в пределах

углового размера источника света, не создавая ореола, как в ПНВ 1-го поколения. Что же касается дальности действия, то ПНВ 2-го поколения обеспечивают наблюдение целей на дальности, превышающей дальность действия

ПНВ 1-го поколения в 1,5 раза в лунную ночь и в 1,8 раза в звездную (рис. 3.16).

Новинкой в трубке 3-го поколения является высокоэффективный фотокатод (рис. 3.15, в), основанный на отрицательном сродстве к электрону элементов III и V групп периодической системы Менделеева, - цезиево-галлиевый арсенид, или, как его чаще называют, арсенид галлия. Арсенид галлия, используемый в качестве фотокатода, представляет собой монокристалл, обработан-



Р и с. 3.16. Спектральные характеристики излучения в ночное время: 1 — лунный свет; 2 — звездный свет

ный цезием и кислородом, в результате чего фотоэлектроны, образующиеся при поглощении квантов света арсенидом галлия, достигают поверхности на границе с вакуумом в отличие от фотокатодов-предшественников, где большинству электронов не удавалось осуществить выход в вакуум, что уменьшало эмиссию и эффективность УЯИ в целом. Преимущества нового фотокатода состоят в том, что эмиссия фотоэлементов увеличивается почти в четыре раза по сравнению с фотокатодами 2-го поколения за счет использования спектрального излучения с длиной волны около 0,9 мкм, что обеспечивает высокое разрешение целей в этой спектральной области, где контраст достигает максимальной величины, а значит, и увеличение дальности обнаружения и опознавания целей на природных фонах. ПНВ с усилителем 3-го поколения отличается от ПНВ 2-го поколения большей эффективностью фотокатода при освещенности 10^{-3} лк и менее за счет продвижения в область с длиной волны 0,9 мкм, в то время как ПНВ с УЯИ 2-го поколения обеспечивают работу при более высоких освещениях. Сравнительные характеристики трубок 2-го и 3-го поколений приведены в табл. 3.2.

В УЯИ 3-го поколения микроканальная пластина монтируется на расстоянии десятых долей миллиметра от фотокатода с ускоряющим напряжением около 1000 В, что обеспечивает высокую компактность трубки, а следовательно, и возможность использования ее в очках ночного видения. Труб-

Т а б л и ц а 3.2

Характеристики трубок 2-го и 3-го поколений

Характеристика	2-е поколение	3-е поколение
Тип фотокатода	S20ER	GaAs
Чувствительность, мкА/лм	275	1250
Интегральная чувствительность, мА/Вт, к потоку с длиной волны:		
0,83 мкм	20	100
0,88 мкм	7	70
Коэффициент усиления	70000-15000	20000-35000
Отношение сигнал/шум	6,5:1	17:1
Разрешающая способность, лин/мм	28	36

ка ТНЭ313, выпущенная фирмой "Томсон", имеет длину 30,4 мм и диаметр 36,8 мм и снабжена встроенным источником питания. Большую часть трубки занимает оборачивающая волоконная система, применяемая также и в трубках 2-го поколения. Срок службы трубки ТНЭ313, а также разрабатываемых новых типов трубок с двуслойной фокусировкой несколько тысяч часов. Трубки 3-го поколения, применяемые в очках для экипажа вертолета, дают возможность видения ночью почти в 100% случаев по времени в течение года, обеспечивая выполнение боевых операций более чем в 80% случаев при ЕНО, создаваемой светом звезд, в то время как ПНВ 2-го поколения решают те же задачи и в тех же условиях с 30% надежностью.

4. ЛАЗЕРНЫЕ ЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

4.1. Измерение координат целей

Одним из главных достоинств лазерных локационных систем является возможность оперативного высокоточного измерения угловых координат и дальности до цели при сравнительно небольших габаритах и массе самой системы. Общим для них является использование импульсного режима зондирования, позволяющего однозначно и точно измерять дальность до цели.

Лазерная локационная система космического базирования для обнаружения целей на дальности до 120 км в поле зрения 10°, измерения расстояния до цели и ее угловых координат, вычисления их производных по

времени и выдачи сигналов управления на двигательную установку космического аппарата для сближения и стыковки содержит помимо лазерной локационной системы уголкового отражателя, лазерный маяк для обнаружения цели и оптико-электронную следящую систему.

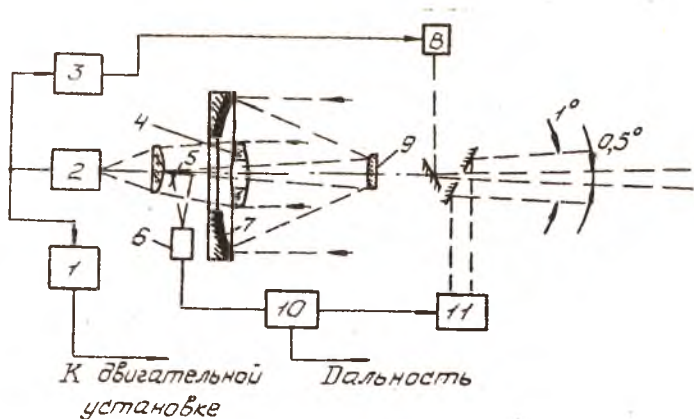
Импульсный лазер - полупроводниковый арсенидгаллиевый лазер, работающий на длине волны 0,9 мкм, предназначается для работы по уголкового отражателя на дальностях от 3 до 120 км и управляется системой большой дальности. В этом режиме ошибка измерения дальности составляет $\pm 0,5\%$ и на дальности 3 км не превышает 30 м, угол расходимости излучения импульсного лазера составляет 0,5°, а мощность в импульсе излучения 300 Вт при длительности импульса 0,1 мкс.

Лазер непрерывного действия - арсенидгаллиевый диод, работающий на длине волны 0,9 мкм, имеет среднюю мощность излучения 40 мВт, а угол расходимости 1°. Лазерный луч модулируется по интенсивности импульсами в форме меандра с частотой следования 3,747 МГц. В обоих лазерах предусмотрена возможность уменьшения мощности излучения для предотвращения на малых дальностях насыщения фотоприемных устройств. Приемный оптический тракт локационной системы состоит из двух телескопов, смонтированных один внутри другого по коаксиальной схеме.

Внутренний телескоп имеет угол поля зрения 10° и предназначается для поиска и обнаружения цели (рис. 4.1). Излучение лазерного маяка, установленного на цели, фокусируется на чувствительную поверхность диссектора, выходной сигнал которого содержит информацию об угловом положении цели в поле зрения локационной системы. Входной объектив внутреннего телескопа имеет диаметр 9,5 см и относительное отверстие 1:0,95. Выходной сигнал диссектора обрабатывается системой обнаружения и сопровождения I с целью формирования сигналов управления двигательной установкой и ориентации активного КА таким образом, чтобы цель попадала в поле зрения внешнего телескопа с шириной 1°.

Внешний телескоп состоит из главного зеркала диаметром 17,8 см и контррефлектора и имеет относительное отверстие 1:3,6. Как только цель попадает в его поле зрения, начинает работать импульсный лазер, излучение которого, отраженное от оптического уголкового отражателя, установленного на цели, с помощью светоделителя 5 одновременно фокусируется на чувствительную площадку диссектора 2 и на ФЭУ 6. Таким образом осуществляется одновременное измерение угловых координат цели и дальности до нее.

На дальностях от 3 до 120 км расстояние между активным и пассивным космическими аппаратами определяется измерением временной задержки между излученным импульсом лазера 3 и принятым отраженным импульсом, а



Р и с. 4.1. Схема лазерной локационной системы: 1 - система обнаружения; и сопровождения; 2 - диссектор; 3 - система большой дальности; 4 - внутренний телескоп; 5 - светоделиватель; 6 - ФЭУ; 7 - главное зеркало внешнего телескопа; 8 - импульсный лазер; 9 - контррефлектор внешнего телескопа; 10 - блок измерения дальности; 11 - лазер непрерывного действия

на дальностях до 3 км - фазовым методом с помощью лазера непрерывного действия II. В этом режиме ошибка измерения расстояния составляет 0,1 м, а частота модуляции интенсивности излучения лазера II...3,747 МГц (этой частоте соответствует длина волны 80 м). Для обеспечения точности измерения расстояния 0,1 м требуется определить фазу колебания с точностью около 1°. Для этого электрический сигнал с выхода ФЭУ смешивается в блоке измерения дальности 10 с сигналом гетеродина частотой 3,743 МГц, в результате чего формируется сигнал на промежуточной частоте 3,747 кГц, по которому и определяется фаза колебания. Флуктуации промежуточной частоты, вызванные эффектом Доплера, составляют около 1 кГц.

Во избежание неоднозначности, присущей фазовому методу, расстояние с точностью 30 м грубо измеряется импульсным лазером, а уточнение полученных данных в пределах 30 м осуществляется непрерывным лазером.

Точностные характеристики рассмотренной лазерной локационной системы приведены в табл. 4.1, а ее физические данные - в табл. 4.2

При работе на больших дальностях (3-120 км) для повышения помехозащищенности используется метод парных импульсов, который заключается в следующем. Импульсный лазер 8 (см. рис. 4.1) излучает последовательность парных импульсов с частотой следования 1 кГц и длительностью каждого импульса 0,1 мкс, причем два импульса в паре разделяются временным интервалом 1 мкс. В режиме обнаружения устанавливается единичный уро-

Т а б л и ц а 4.1

Характеристики лазерной локационной системы

Характеристика	Режим дальности	
	большой	малой
Дальность, км	3-120	0-5
Разрешающая способность по дальности, м	10	0,01
Скорость изменения дальности, м/с	50-120	0,3-50
Ошибка измерения:		
дальности, %	$\pm 0,5$	$\pm 0,1$
скорости, %	$\pm 0,2$	$\pm 0,03$
угловых координат, град	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
угловой скорости, мрад/с	$\pm 0,5$	$\pm 0,05$

Т а б л и ц а 4.2

Массовые характеристики и энергопотребление лазерной локационной системы

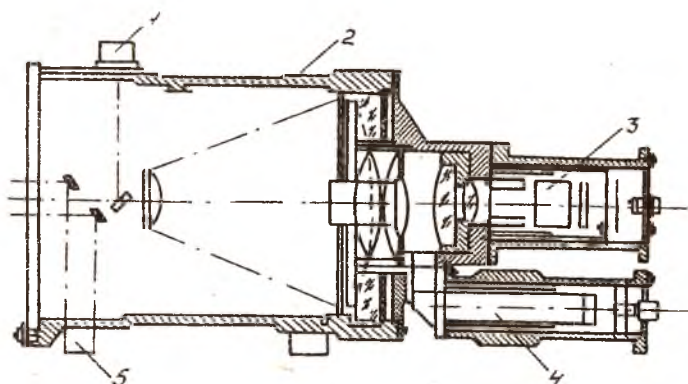
Блок	Масса, кг	Энергопотребление, Вт
Опτικο-механический	12,5	22,1
Электронной обработки	2,0	22,1
Дисплей	2,95	10,5

вень стробирующего сигнала, при котором фотоприемник открыт и регистрирует любой импульс - сигнальный или шумовой, если только этот импульс превышает заранее установленный пороговый уровень. Если на выходе фотоприемника регистрируется импульс, устройство стробирования закрывает фотоприемник, а через 1 мкс после этого генерируется открывающий строб-импульс длительностью 0,007 мкс. Если следующий импульс регистрируется в этот промежуток времени, то факт наличия полезного сигнала считается подтвержденным, а если за время строб-импульса второй импульс на выходе фотоприемника не регистрируется, то первый зарегистрированный импульс считается ложным (шумовым) и вся система возвращается в первоначальное положение.

При подтверждении факта наличия полезного сигнала устройство стробирования переходит в следящий режим и приблизительно через 0,9 мс генерирует открывающий строб-импульс длительностью 0,5 мкс. Если в это время импульс вновь регистрируется, следующий строб-импульс генерируется спустя 1 мкс после этого и т.д.

Вероятность ложной тревоги F в зависимости от порогового числа фотоэлектронов N , зарегистрированных в течение строб-импульсов, и от дальности локации, при которой принимаемый импульс лазерного излучения выбивает с фотокатода число фотоэлектронов, равное пороговому, вычисляется как вероятность последовательного появления двух одноэлектронных импульсов, разделенных временным интервалом в 1 мкс.

Испытания конструкции лазерной локационной системы (рис. 4.2) проходят как на малой (до 2 м), так и на большой (до 120 км) дальности. При испытаниях на малой дальности проводятся измерения двух типов: при первом - лазерный локатор устанавливается на подвижной тележке и постепенно удаляется от уголкового отражателя, причем дальность до уголкового отражателя с помощью лазерного локатора и контрольной стальной рулетки измеряется через 1 м; при втором - лазерный локатор устанавливается неподвижно на расстоянии 7 м от уголкового отражателя, который плавно передвигается по оптической скамье до расстояния 8 м, причем дальность измеряется через 1 см.

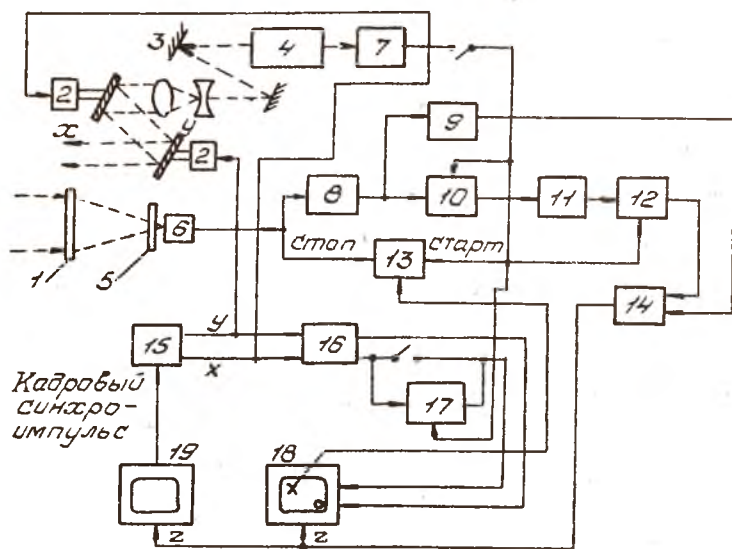


Р и с. 4.2. Конструкция лазерной локационной системы:
1 - импульсный лазер; 2 - корпус внешнего телескопа;
3 - диссектор; 4 - ФДУ; 5 - лазер непрерывного действия

Первые измерения на малой дальности выявили существенный недостаток лазерной системы, проявившийся в многократных отражениях принимаемого излучения от различных элементов оптического тракта локатора. Последнее приводило к большим ошибкам. Несмотря на то что эти отражения возникали на дальностях только меньше 10 м, в конструкцию лазерной локационной системы пришлось ввести дополнительные светопоглощающие бленды. Это сделало функционирование локатора вполне удовлетворительным.

Результаты измерений первого типа, выполненные на дальности до 22 м, показали среднее значение ошибки 5 см при среднем квадратичном отклонении $\pm 4,43$ см, а результаты измерений второго типа - среднее значение ошибки 3,5 см при среднем квадратичном отклонении $\pm 0,85$ см.

Другой вид многоцелевой лазерной локационной системы (рис. 4.3) имеет возможность одновременной работы по нескольким целям, позволяет определять относительную ориентацию космического аппарата, для чего на цели в определенном порядке устанавливаются четыре угловых оптических отражателя, угловые координаты и дальность которых измеряет лазерная система и по этим данным вычисляет углы ориентации цели относительно активного космического аппарата. Ошибка определения ориентации цели не превышает 1° . Все системы локатора работают при комнатной температуре без охлаждения.



Р и с. 4.3. Структурная схема многоцелевой лазерной локационной системы: 1 - линза Френеля; 2 - привод зеркал; 3 - сканирующие зеркала; 4 - лазерный передатчик; 5 - интерференционный фильтр; 6, 7 - фотодетекторы; 8, 12 - усилители; 9 - логарифмический усилитель; 10 - схема стробирования; 11 - расширитель импульсов; 13 - измеритель дальности; 14 - перестраиваемый усилитель; 15 - генератор развертки; 16 - фазовый компенсатор; 17 - генератор стереоизображения; 18 - видеотерминал со световым пером; 19 - видеоконтрольное устройство

Структурная схема многоцелевой лазерной локационной системы показана на рис. 4.3, а массовые, габаритные и энергетические характеристики ее отдельных блоков - в табл. 4.3.

Т а б л и ц а 4.3

Массовые, габаритные и энергетические характеристики
многоцелевой лазерной локационной системы

Блок	Габаритные размеры, см	Масса, кг	Потребляемая мощность, Вт
Оптико-механический	15,2x22,8x53,3	18	50 (от сети постоянного тока напряжением 28В)
Обработки	22,8x22,8x38,1	6,8	вместе с блоком обработки
Дисплеи данных	10,1x22,8x22,8	1,8	10

В качестве передающего устройства так же, как и в лазерной системе, применяется арсенидгаллиевый полупроводниковый лазер, характерной особенностью которого является способность генерировать излучение с длиной волны 0,9 мкм на одной поперечной моде EM_{00} (одномодовый режим генерации обеспечивается внешним по отношению к полупроводниковому кристаллу резонатором, состоящим из системы линз и зеркал). Лазер работает в импульсном режиме, генерируя импульсы излучения длительностью около 70 нс, временем нарастания переднего фронта 20 нс и частотой повторения импульсов 1 кГц.

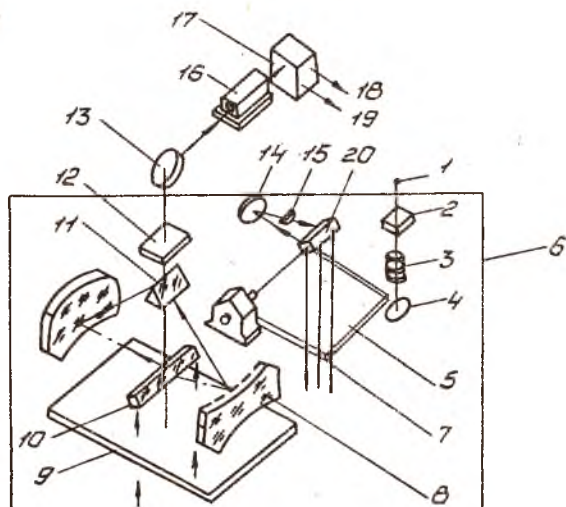
Приемный тракт локационной системы состоит из узкополосного интерференционного фильтра с шириной полосы пропускания 20 нм, многокомпонентного широкоугольного объектива диаметром 50 мм с относительным отверстием 1:0,95 и диссектора.

4.2. Получение изображений объектов

Лазерная локационная система для получения изображения земной поверхности с борта самолета использует принцип линейного сканирования местности, заключающийся в том, что излучение лазерного передатчика, расположенного на борту самолета, фокусируется на земной поверхности и с помощью сканирующего устройства периодически отклоняется в плоскости, перпендикулярной к направлению полета. Вследствие поступательного движения самолета лазерный луч просматривает последовательно все новые и новые участки местности. Синхронно с разверткой лазерного луча происходит отклонение оптической оси приемного канала системы, при этом в каждый момент времени отраженное излучение регистрируется фотоприемни-

ком на борту самолета, а получаемое изображение земной поверхности в форме видеосигнала записывается на магнитную ленту. Разрешающая способность локатора определяется размером лазерного пучка, сфокусированного на земной поверхности. В дневное время при достаточно большой интенсивности отраженного солнечного излучения отпадает необходимость подсветки местности лазерным лучом, в этом случае разрешающая способность определяется мгновенным углом поля зрения приемного канала системы: чем он меньше, тем разрешающая способность выше.

Лазерная локационная система (рис. 4.4) имеет лазерный передатчик, представляющий собой арсенидгаллиевый полупроводниковый лазер непрерывного действия, охлаждаемый жидким азотом до температуры 77 К и генерирующий излучение с длиной волны 0,85 мкм мощностью 1 Вт. Излучение арсенидгаллиевого лазера отражается от поверхности земли лучше, чем излучение аргонового и гелий-неонового лазеров. Кроме того, коэффициенты отражения растительного покрова и искусственных объектов (светло-зеленая краска) различаются на длине волны арсенидгаллиевого лазера более четко, чем на длинах волн аргонового и гелий-неонового лазеров.



Р и с. 4.4. Оптическая схема лазерной локационной системы: 1-лазерный передатчик; 2-входное окно передатчика; 3-объектив; 4-зеркало; 5-выходное окно; 6-корпус оптико-механического блока локатора; 7-двигатель; 8-первичное зеркало; 9-входное окно приемника; 10-сканер приемника; 11-призма; 12-выходное окно приемника; 13, 14-зеркала; 15-коллимирующая линза; 16-фотодетектор; 17-блок обработки; 18-выход видеосигнала; 19-выход синхросигнала; 20-сканер передатчика

Конструктивно лазерный передатчик выполняется в виде сосуда Дьюара, заполненного жидким азотом, одной заправки которого хватает на 5 ч непрерывной работы. На внутренней стенке сосуда Дьюара размещается арсенидгаллиевый диод. Ток возбуждения автоматически регулируется и выключается при достижении уровня азота ниже допустимого или при выходе частоты вращения сканера за заданные пределы.

Излучение лазерного передатчика, сфокусированное объективом и линзой, направляется к земле с помощью быстро вращающегося четырехгранного сканера, а отраженное от поверхности земли излучение одновременно направляется четырехгранным сканером через систему зеркал на фотодетектор. Сканеры крепятся на одной оси и приводятся во вращение питаемым от бортовой сети переменного тока частотой 400 Гц двигателем, с частотой вращения 24000 мин^{-1} . Все основные элементы оптико-механического тракта располагаются в герметическом корпусе, из которого откачивается воздух. Угол полного отклонения лазерного луча на выходе сканера составляет 136° . Для обеспечения синхронизации между углом поворота сканеров и видеосигналом часть излучения лазера, отраженная от сканера, поступает на специальный фотодиод, формирующий синхронизирующий импульс для запуска развертки очередной строки видеосигнала. Излучение, отраженное от поверхности земли, попадает на сканер и с помощью двух сегментов параболического первичного зеркала и призмы поступает через входное окно приемника и зеркало на фотодетектор - лавинный фотодиод, чувствительный к излучению ближнего инфракрасного и видимого диапазонов длин волн.

Синхронизирующий импульс, обозначающий момент начала цикла сканирования, через усилитель и пороговое устройство, отсекающее ложные (помеховые) импульсы, поступает на вход устройства компенсации вращения, устраняющее относительный сдвиг соседних строк изображения, вызванный вращением самолета вокруг его продольной оси. Так как вращение самолета эквивалентно дополнительному повороту сканеров при неизменном временном положении синхронизирующего импульса, то разные строки изображения могут начинаться (и кончаться) в разные моменты времени, приводя к искажению всего изображения. Для компенсации этого явления в момент поступления синхронизирующего импульса запускается генератор линейно изменяющегося напряжения, которое подается на один из входов компаратора. На другой его вход поступает напряжение с выхода датчика угла вращения самолета, пропорциональное значению этого угла в данный момент времени. При совпадении напряжений на входах компаратора на его выходе генерируется импульс, временное положение которого совпадает с истинным моментом начала сканирования данного участка местности. Этот

импульс поступает на вход формирователя строки, на выходе которого в этот момент возникает сигнал, разрешающий съем информации с фотодетектора. В течение разрешенного временного промежутка сигнал с фотодетектора усиливается усилителем и дополненный необходимыми импульсами синхронизации поступает в аппаратуру регистрации. Для получения необходимого динамического диапазона применяется устройство автоматической регулировки усиления.

Сканирующая лазерная локационная система на основе лазера на алюмоиттриевом гранате имеет устройство подобное системе, изображенной на рис. 4.4. Однако принцип действия системы заключается в том, что сфокусированный лазерный луч синхронно с разверткой видеоконтрольного устройства построчно сканировал поле зрения, а отраженное от объектов излучение регистрировалось фотодетектором, выходной сигнал которого модулировал яркость луча видеоконтрольного устройства, в результате чего на экране формируется изображение объекта.

Лазерный передатчик - лазер на алюмоиттриевом гранате фирмы **Hofobeam** - работал в непрерывном режиме, генерируя излучение с выходной мощностью 5 Вт, и в режиме модуляции добротности с частотой повторения импульсов до 25 кГц. Выходное излучение с переднего резонатора коллимировалось телескопом и направлялось сканирующими зеркалами на цель, причем диаметр лазерного пучка на выходе передатчика составлял 2,5 см. При работе в импульсном режиме уровень выходной мощности излучения и момент генерации импульса контролировались фотодетектором, установленным перед задним зеркалом резонатора. Зеркало строчной развертки (х) работало на частоте до 100 Гц и имело размеры $2,5 \times 2,5 \text{ см}^2$, зеркало кадровой развертки (у) работало на частоте до 2 Гц и имело размеры $2,5 \times 5,0 \text{ см}^2$, а максимальный угол поля сканирования составлял 0,17 рад.

Так как разрешающая способность системы определяется главным образом расходимостью лазерного луча, то применяется приемная оптика невысокого качества. Отраженное излучение собирается линзой Френеля I диаметром 25,4 см с фокусным расстоянием 20 см. Фотодетектор - кремниевый фотодиод диаметром 1 см - для ослабления влияния фонового излучения был снабжен установленным перед ним интерференционным фильтром. Угол поля зрения приемного канала локатора составляет 50 мрад, что приблизительно в три раза меньше максимального угла поля сканирования.

Схема обработки выходного сигнала фотодетектора зависит от режима работы лазерного передатчика. В режиме непрерывного излучения сигнал через усилитель и логарифмический усилитель, необходимый для увеличения динамического диапазона приемного канала, поступает на вход пере-

страиваемого усилителя, ширина полосы пропускания которого изменяется в зависимости от ширины спектра видеосигнала.

В режиме модуляции добротности лазерной передатчик генерирует импульсы длительностью 250 нс, поэтому усилитель имеет ширину полосы пропускания 3,5 МГц. Усиленный импульс через схему стробирования поступает на расширитель импульсов, на выходе которого формируется импульс длительностью 0,25...1,5 мкс с амплитудой, равной амплитуде входного импульса. Это вызывается необходимостью согласования длительности импульса с постоянной времени люминофора экрана видеоконтрольного устройства. Далее сигнал поступает в усилитель, коэффициент усиления которого увеличивается со временем по квадратичному закону, что позволяет выравнивать яркости близко и далеко расположенных объектов при их отражении на экране видеоконтрольного устройства. Так как амплитуда импульсов на выходе фотодетектора пропорциональна интенсивности отраженного от цели излучения, которая, в свою очередь, обратно пропорциональна квадрату расстояния до цели, то при неизменной мощности зондирующих импульсов амплитуда импульсов на выходе фотодетектора обратно пропорциональна квадрату времени их задержки. Для компенсации этого нежелательного явления используется усилитель, функция которого в импульсном режиме аналогична функции логарифмического усилителя в непрерывном режиме.

В импульсном режиме ширина полосы пропускания перестраиваемого усилителя, равная 3,5 МГц, позволяет пропускать сигнал без искажения на входы модуляторов яркости видеоконтрольного устройства и видеотерминала. Развертка луча видеоконтрольного устройства выполняется синхронно со сканированием лазерным лучом поля зрения системы, поэтому частота кадров не превышает 2 Гц, что крайне недопустимо при визуальном наблюдении. Для устранения этого неудобства параллельно видеоконтрольному устройству подключается видеотерминал, который позволяет преобразовывать медленную развертку в стандартную телевизионную, при этом обеспечивается синхронизация с генератором развертки.

В импульсном режиме схема обработки сигнала позволяет измерять дальность до цели традиционным старт-стопом методом. Измеритель дальности имеет счетную частоту 15 МГц, что соответствует разрешающей способности по дальности 10 м. Для выборочного измерения дальности до какой-либо одной точки на местности, соответствующей одному элементу изображения, используется световое перо. При прикладывании его к выбранному элементу изображения на экране видеоконтрольного устройства в момент прохождения луча развертки через данный элемент на выходе светового пера формируется импульс, включающий измеритель дальности.

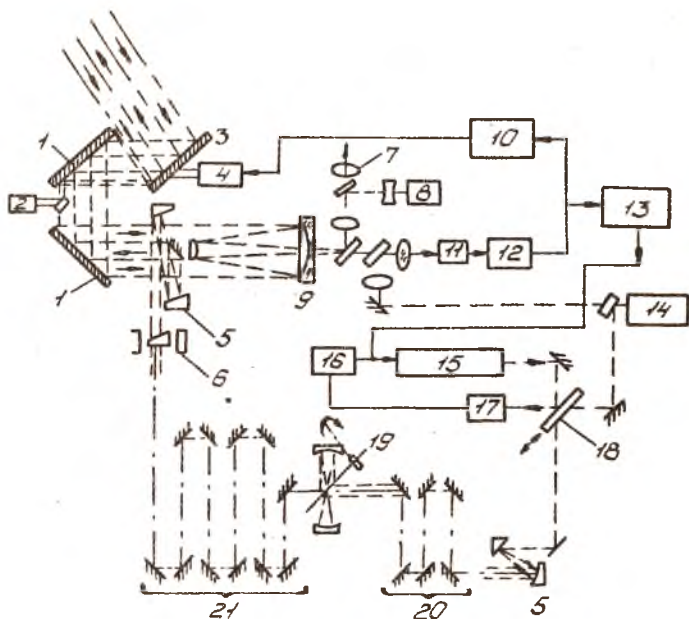
Характерной особенностью рассматриваемой лазерной локационной сис-

темы является наличие в ее схеме генератора стереоизображения, который формирует стереопару изображений на основе одного обычного изображения и информации о дальности до соответствующих предметов этого изображения. С этой целью в электрический сигнал строчной развертки (x) видеоконтрольного устройства добавляется сдвиг, обратно пропорциональный дальности до предмета, соответствующего данному элементу изображения. Сформированное таким образом изображение выглядит так, как будто наблюдатель находится сбоку от истинного положения системы. На следующем кадре генератор стереоизображения отключается и формируется обычное изображение. Два полученных изображения и составляют стереопару.

Лазерная локационная система испытывалась как в непрерывном, так и в импульсном режиме работы. В непрерывном режиме испытания проводились в лабораторных условиях на дальностях 60 и 100 м. Разрешающая способность превышала 0,1 мрад, что близко к дифракционному пределу для апертуры диаметром 2,5 см, равному 0,05 мрад. В импульсном режиме при пиковой мощности излучения передатчика 2 кВт дальность действия возрастала до нескольких километров.

Следует отметить, что в тех случаях, когда строб-импульс не устанавливается, качество регистрировавшегося изображения резко ухудшается из-за обратного рассеяния зондирующего излучения в атмосфере.

Рассмотрим лазерную локационную систему для слежения за движущимися КА. Данная система имеет когерентную обработку сигналов, работает по методу синтезированной апертуры (рис. 4.5), имеет высокостабильный лазерный передатчик со средней выходной мощностью 10 кВт на длине волны 10,6 мкм, что позволяет работать по КА, оборудованным угловыми оптическими отражателями на дальности до 6000 км и по диффузно отражающим целям на дальности около 1000 км. Излучение лазерного передатчика на выходе второго каскада усиления имеет ширину спектра всего 20 Гц за время 50 мс. Такая высокая монохроматичность излучения передатчика требуется для обеспечения эффективного когерентного (гетеродинного) детектирования отраженного от цели излучения. Лазерный пучок диаметром 4,5 см проходит через нутатор, расширяется стоящим за ним телескопом до диаметра 15 см и с помощью системы неподвижных зеркал и поворотного зеркала направляется на цель. Расходимость зондирующего излучения не превышает 0,6 угл. мин. В качестве средства внешнего целеуказания используется радиолокатор совместно с пассивным инфракрасным радиометром, а для облегчения поиска цели в поле ошибок целеуказания - телевизор. Кроме того, имеется окуляр визирного канала. При достаточно хорошем наблюдении для автоматического сопровождения используется пассивный пеленгатор.



Р и с. 4.5. Оптическая схема лазерной локационной системы:
 1 - неподвижное зеркало; 2 - телевизор; 3 - поворотное зеркало; 4 - привод зеркала; 5 - телескоп; 6 - нутатор; 7 - окуляр визирного канала; 8 - пассивный пеленгатор; 9 - главное зеркало приемного телескопа; 10 - устройство обработки; 11, 17 - фотодетекторы; 12 - предусилитель; 13 - устройство подстройки частоты; 14 - лазерный гетеродин; 15 - задающий генератор; 16 - устройство контроля частоты; 18 - вводный светоделитель; 19 - прерыватель; 20 - первый каскад усиления; 21 - второй каскад усиления

Лазерное излучение, отраженное от цели, собирается главным зеркалом приемного телескопа диаметром 0,48 м и фокусируется на чувствительную площадку фотодетектора (относительное отверстие приемного телескопа 1:7). Фотодетектор представляет собой фотодиод из $\text{HgS}-\text{Te}$, охлаждаемый жидким азотом, и имеет эквивалентную мощность шума около 19^{-19} Вт/Гц

Отраженное от цели лазерное излучение смешивается (интерferирует) на поверхности фотодетектора с излучением лазерного гетеродина, частота которого смещена относительно частоты принимаемого излучения на 5 МГц. В дальнейшем сигнал с выхода фотодетектора обрабатывается на промежуточной частоте 5 МГц. Взаимная стабильность частоты излучения лазерного гетеродина и лазерного передатчика настолько велика, что ампли-

туда флуктуаций промежуточной частоты на выходе фотодетектора не превышает 1 кГц в течение нескольких секунд. Это позволяет уменьшить ширину полосы пропускания тракта обработки до 1 кГц и обеспечить чувствительность около 10^{-16} Вт. Лазерный передатчик генерирует импульсы излучения длительностью около 1 мс, согласованные по ширине спектра их огибающей с шириной полосы пропускания тракта обработки. Угол поля зрения приемного канала системы составляет 0,5 угл. мин и определяется условием гетеродинного согласования излучения отраженного сигнала и лазерного гетеродина.

Лазерное излучение, отраженное от движущейся цели в направлении линии визирования, приобретает доплеровский сдвиг частоты, равный

$$f_A = 2f \frac{V}{c}, \quad (4.1)$$

где f - частота излучения; V - скорость цели; c - скорость света.

Для лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм доплеровский сдвиг частоты составляет 190 кГц на каждый 1 м/с скорости движения цели. Без компенсации этого сдвига промежуточная частота электрического сигнала на выходе фотодетектора, равная разности частот излучения лазерного гетеродина и отраженного сигнала, выйдет за пределы полосы пропускания фильтра, что может привести к остановке системы. Во избежание этого в системе непрерывно изменяется частота излучения лазерного передатчика так, чтобы значение промежуточной частоты все время совпадало с центральной частотой фильтра, равной 5 МГц. Для этого электрический сигнал с выхода фотодетектора приемного канала через предусилитель поступает в устройство подстройки частоты, в котором измеряется разность между мгновенным значением промежуточной частоты и центральной частотой фильтра, равной 5 МГц, и вырабатывается сигнал управления с амплитудой, пропорциональной этой разности. Сформированный таким образом сигнал поступает на пьезокорректор задающего генератора, изменяя частоту его излучения. Таким образом формируется обратная связь системы подстройки частоты, обеспечивающая заданное значение промежуточной частоты, равное 5 МГц, независимо от величины доплеровского сдвига. Диапазон перестройки частоты излучения задающего генератора составляет 50 МГц и ограничивается шириной полосы усиления усилителя.

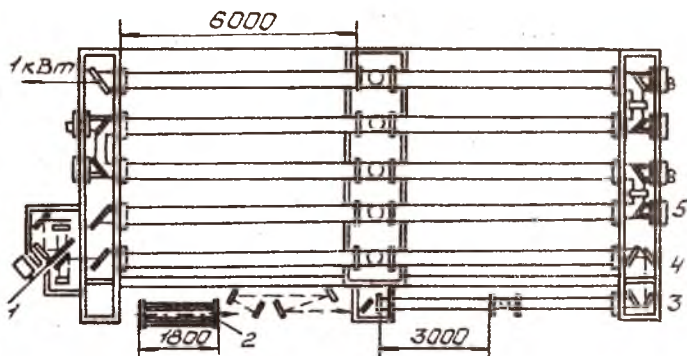
Также предусматривается возможность прямого контроля частоты задающего генератора, для чего часть его излучения с помощью специального вводного светоделителя отводится на фотодетектор, где смешивается с излучением лазерного гетеродина. На выходе фотодетектора возникает гармонический электрический сигнал, частота которого, равная разности между частотой излучения лазерного гетеродина и задающего генератора, измеряется устройством контроля частоты. Автоматическое сопровождение целей

по угловым координатам в активном режиме лазерной локационной системы ведется по методу равносигнальной зоны. Нутатор, представлявший собой оптический стержень КСГ, вращающийся вокруг продольной оси, придает зондирующему излучению коническое вращение. В результате этого в сигнале промежуточной частоты на выходе фотодетектора возникает амплитудная модуляция, параметры которой (амплитуда и фаза) содержат информацию об угловом положении линии визирования цели относительно равносигнального направления лазерного передатчика, которое совпадает с направлением оптической оси приемного канала системы. Устройство обработки измеряет параметры модуляции и по ним вырабатывает сигналы управления приводом поворотного зеркала, отклоняя его так, чтобы совместить равносигнальное направление с линией визирования цели.

При работе лазерной локационной системы по юстировочным сферам диаметром 1 м дальность сопровождения на горизонтальной трассе составляет 22 км, на вертикальной - 250 км. При этом атмосферные потери не превышают 1 дБ/км и обусловлены поглощением излучения с длиной волны 10,6 мкм молекулами воды и углекислого газа. При локации по уголковым оптическим отражателям ошибка углового сопровождения не превышает 2" на дальности 30 км.

Лазерный передатчик на основе CO_2 -лазера, выполненный по схеме "задающий генератор - усилитель", обеспечивает одновременно ширину спектра выходного излучения 20 Гц и среднюю мощность 1 кВт (рис. 4.6). Задающий генератор, работая в непрерывном режиме с выходной мощностью 10...25 Вт, имеет однододовое и плоскополяризованное излучение. Перед входом в первую ступень первого каскада усиления лазерный пучок расширяется с помощью телескопа до диаметра 13 мм. Разрядный промежуток первой ступени имеет длину 6 м и диаметр 2,5 см, а второй ступени - 12 м и 3,8 см соответственно. Во всех разрядных промежутках первого каскада усиления газовая смесь прокачивается с помощью единого газораспределительного устройства. Разрядные промежутки первой и второй ступеней имеют различные диаметры для того, чтобы облегчить юстировку оптического тракта и уменьшить отражение от стенок разрядных труб. Первый каскад усиления рассчитан на выходную мощность до 400 Вт при диаметре лазерного луча 3 см, однако при эксплуатации выходная мощность первого каскада не превышает 200 Вт. Увеличение диаметра луча с 13 мм до 3 см объясняется дифракционной расходимостью излучения.

Перед входом во второй каскад усиления размещается прерыватель, совмещенный с дополнительным коллимирующим телескопом; на выходе прерывателя лазерный луч имеет диаметр 4,5 см. Второй каскад усиления имеет общую длину разрядного промежутка 46 м и диаметр 5 см при коэффициенте



Р и с. 4.6. Конструкция лазерного передатчика: 1 - прерыватель; 2 - задающий генератор; 3, 4 - первый каскад усиления; 5 - второй каскад усиления

усиления слабого сигнала 60 дБ. При дальнейшем увеличении коэффициента усиления возникает опасность самовозбуждения усилителя, для предотвращения которой применяются специальные поглощающие диафрагмы на концах каждой из четырех разрядных секций. В разрядных трубах второго каскада также прокачивается газовая смесь со скоростью около 3 м/с при давлении 5...6 мм рт.ст. Выходная мощность лазерного гетеродина составляет около 1 Вт при длине резонатора 40 см. Для повышения стабильности частоты выходного излучения четыре продольных стержня, являющиеся основой несущей конструкции лазера, выполняются из суперинвара, а торцевые пластины, на которых крепятся выходные зеркала резонатора, - из гранита. Во избежание нагрева стержней от излучения разрядной трубки они помещаются в специальные теплоизолирующие кожухи. К задней торцевой пластине крепится вентиль для перезаполнения лазера и сферический резервуар для газовой смеси, позволяющий работать без обновления смеси в течение нескольких месяцев.

Каскадные усиления с продольным и поперечным разрядом размещаются в отдельных сосудах, характеризующихся нормальными (не повышенными) условиями оптической чистоты, а задающий лазер во избежание воздействия акустических шумов - в отдельном изолированном помещении на самостоятельном бетонном фундаменте и отделен от последнего гранитной плитой, гасящей высокочастотные вибрации. Изоляция каскада усиления с продольным разрядом от вибраций, амплитуда которых затухает по мере удаления вглубь от поверхности, достигается его размещением на сварной стальной раме, покоящейся на железобетонных колоннах, заделанных в

грунт значительно ниже его верхнего края. С этой же целью каскад усиления с поперечным разрядом, являющийся главным источником вибрации вследствие работы мощного компрессора, опирается железобетонными опорами именно на верхние слои грунта. Такая распределенная конструкция передающего устройства обеспечивает необходимую степень когерентности выходного излучения.

Сохранение взаимной соестировки оптических осей каскадов и сложения в пространстве оптической оси выходного излучения диктуется необходимостью точного измерения угловых координат цели и решается за счет размещения всей лазерной локационной системы на скальном грунте, хотя взаимная соестировка оптических осей сохраняется только в течение 10 мин, после чего происходит разъюстировка оптического тракта в результате тепловых процессов.

Большие скорости движения КА приводят к необходимости детектирования лазерных сигналов с частотным сдвигом до 1,5 ГГц относительно частоты зондирующего излучения, компенсировать который можно двумя путями: либо сдвигом частоты лазерного гетеродина, либо использованием сверхвысокочастотных фотодетекторов с понижением промежуточной частоты традиционными радиотехническими методами. В настоящее время второй путь считается более надежным и обработанным, хотя существуют и лазерные гетеродины с диапазоном перестройки частоты до 1 ГГц.

В случае модернизации данной лазерной локационной системы с целью увеличения ее потенциала: оптический тракт состыковывается с более крупным телескопом диаметром 1,2 м, уменьшается расходимость зондирующего излучения до 2" (по уровню 0,5) и поле зрения приемного канала, что приводит к увеличению дальности действия системы. В режиме автосопровождения цели вместо метода равноточностной зоны используется метод амплитудной квадрантной пеленгации, для чего из оптической схемы изъят нутатор, ослаблявший выходное излучение лазерного передатчика и снижавший надежность всей системы в целом, одноплощадный фотодетектор приемного канала заменяется четырехплощадочным.

Коммутируя определенным образом выходы А, В, С и D с площадок фотодетектора, стало возможным формирование сигналов, пропорциональных углам отклонения цели от оси приемного канала. Сигнал, пропорциональный амплитуде отраженного излучения, получается в результате суммирования сигналов с выходов всех четырех площадок. Таким образом, автоматическое сопровождение цели и измерение параметров отраженного сигнала становится одновременным. Фотодетектор с полосой пропускания 1,5 ГГц представляет собой четыре фотодиода из HgCdTe размером 0,3x0,3 мм каждый, разделенных изолирующим промежутком шириной 10 мкм. Развязка по

высокой частоте между соседними чувствительными элементами достигает 30 дБ на частоте 1,5 ГГц. Квантовая эффективность фотодиодов на низкой частоте составляет 50% с разбросом от площадки к площадке не более 5%, а с увеличением частоты до 1 ГГц уменьшалась до 20%, что соответствует чувствительности 10^{-19} Вт/Гц.

Кроме того, в оптическую схему между усилителем и главным телескопом вводится коммутатор, позволивший использовать оптико-механический тракт телескопа как для приема, так и для вывода излучения. Коммутатор представляет собой вращающийся диск с отверстиями, который четвертую часть рабочего времени пропускает на телескоп излучение передатчика, блокируя прохождение отраженного от цели излучения в тракт фотодетектора, а в остальное время перекрывает излучение передатчика, направляя отраженное от цели излучение в тракт фотодетектора. Промежуток времени, в течение которого происходит коммутация, не должен превышать время распространения излучения до цели и обратно. В свою очередь во избежание потерь лазерной энергии тракт передатчика должен быть открыт в течение всего лазерного импульса. Исходя из этого, длительность импульса выбирается 1...4 мс, что обеспечивает выполнение обоих условий на дальностях более 150...600 км соответственно.

Уменьшение ширины диаграммы направленности приемного и передающего каналов требует учета и компенсации угловой аберрации, равной

$$\theta = 2 \frac{V}{c}, \quad (4.2)$$

где V - тангенциальная составляющая скорости цели; c - скорость света.

При локации КА угловая аберрация составляет около $10''$, т.е. в пять раз превышает ширину диаграммы направленности передатчика. Поэтому перед фотодетектором приемного канала устанавливается поворотное зеркало, управляемое вычислителем и компенсирующее угловую аберрацию. Грубое сопровождение цели по угловым координатам выполняется опорно-поворотным устройством по командам, поступающим от радиолокатора (при этом амплитуда флуктуаций целеуказания равна $\sim 10''$), а точное сопровождение - подвижным зеркалом, которое отрабатывает не только ошибки целеуказания, но и атмосферные флуктуации наклона волнового фронта проходящей волны.

Рассмотрим более подробно построение силового оптического тракта лазерной локационной системы (рис. 4.6). Конструкция приемопередающего телескопа выполнена так, что его фокус расположен в точке пересечения диском коммутатора оптической оси системы и совпадает с точкой, в которой мощное излучение передатчика фокусируется дифракционным ответвителем. Главное зеркало телескопа диаметром 1,2 м и толщиной 20 см с отно-

покрыто слоями серебра и четырехфтористого тория (ThF_4). Вторичное выпуклое гиперболическое зеркало диаметром 16 см выполнено из металла, имеет внутреннюю систему охлаждения и допускает автоматическое угловое и линейное перемещения.

Угловое перемещение вторичного зеркала позволяет компенсировать ошибки сопровождения цели грубым контуром слежения и использовать само вторичное зеркало (в последнем варианте системы Firepond) в качестве исполнительного элемента точного контура углового сопровождения вместо подвижного зеркала в колена угломестной оси опорно-поворотного устройства (в первых вариантах системы). Кроме того, вторичное зеркало выполняет функции сканера в режиме поиска цели, формируя построчный квадратный растр в поле зрения $\pm 0,375$ мрад со скоростью 10 строк в секунду. Во избежание потерь энергии лазерного излучения при сканировании, которые возможны на краях поля зрения из-за виньетирования, диаметр лазерного пучка на главном зеркале телескопа должен быть около 1 м, а расходимость зондирующего излучения, определяемая в основном дифракцией, - около 10 мкрад. Линейное перемещение контролируется 16-рядным датчиком, что позволяет заранее фокусировать зеркало по имеющимся данным с дальности до цели.

Опорно-поворотное устройство телескопа выполнено по угломестно-азимутальной схеме с выводом излучения через угломестную ось по схеме Насмита. Выводное плоское зеркало, расположенное между главным и вторичным зеркалами под углом 45° к оси телескопа, имеет отверстие в центре, через которое небольшая часть излучения передатчика проходит на четырехплощадочный фотодетектор для контроля углового положения оптической оси зондирующего излучения относительно оси телескопа. Одновременно это отверстие способствует освобождению вторичного зеркала от избыточной мощностной нагрузки и устранению нежелательного отражения части зондирующего излучения обратно в тракт передатчика.

Главное зеркало телескопа не имеет внутренней системы охлаждения (как, например, вторичное зеркало), но его рабочая поверхность постоянно обдувается потоком очищенного воздуха, имеющего температуру окружающей среды. Газовоздушная прокачка силового оптико-механического тракта позволяет уменьшить расходимость и потери на поглощение зондирующего излучения и одновременно снизить тепловые нагрузки на оптические элементы тракта передатчика, который размещается в отапливаемом помещении и проложен в трубах, заполненных сухим азотом при атмосферном давлении и комнатной температуре. Молекулы азота не имеют сильных резонансов поглощения в области длин волн около 10 мкм, поэтому излучение CO_2 -ла-

духе. Так как прокачивать весь оптико-механический тракт азотом нецелесообразно ввиду значительного различия в температурах внутри помещения передатчика и неотапливаемого помещения телескопа, а также большого расхода азота при выбросе его в атмосферу через оптический тракт телескопа, внешняя часть оптико-механического тракта прокачивается очищенным воздухом, имеющим температуру окружающей среды, а внутренняя часть - азотом. В месте их соприкосновения установлено аэродинамическое окно, обеспечивающее минимальное искажение волнового фронта излучения. Это достигается тем, что в месте встречи двух газовых потоков, направленных навстречу друг другу, турбулентный слой однороден в поперечном направлении и расположен перпендикулярно к лазерному пучку.

В лазерной локационной системе выходные сигналы четырехплощадочного фотодетектора используются для замыкания системы углового сопровождения цели, поэтому каждый из четырех сигналов усиливается предварительным усилителем с полосой пропускания около 1,5 ГГц с последующей коммутацией их на высокой частоте для получения трех выходных сигналов: суммарного и двух разностных, пропорциональных рассогласованию по углу места и азимуту. Необходимым условием для такого преобразования на высокой частоте является фазовое согласование предварительных усилителей во всей их полосе пропускания с определением уровня шума в выходных сигналах фотодетектора.

4.3. Собственная частота колебаний устройства оптической визуализации

Назначением систем углового сопровождения устройств оптической визуализации (УОВ) является стабилизация ориентации оптической оси устройства относительно линии визирования, т.е. линии, соединяющей УОВ и наблюдаемый подвижный объект. Основным условием разработки устройств оптической визуализации является обеспечение их наименьшей собственной частоты колебаний. Системы углового сопровождения бывают активного и пассивного типов, с отображением наблюдаемого объекта или без его отображения. Активные системы используют подсветку объекта и допускают кодирование направлений в пространстве предметов. Коллимированное лазерное излучение позволяет получить в ряде случаев угловое разрешение в пространстве предметов лучше, чем λ/D , где λ - длина волны излучения, D - диаметр объектива. В пассивных системах угловое кодирование в основном осуществляется в пространстве изображений, поэтому в них формирование изображений обязательно. Если изображение лишь формируется, а не

воспроизводится, то эта задача эквивалентна работе с точечным источником излучения. Здесь для углового кодирования применяют различные растры.

Конструктивные особенности систем углового сопровождения УСВ. Информация об угловых координатах источника излучения содержится в амплитуде, фазе, частоте или комбинации перечисленных характеристик сигнала, поступающего для последующей обработки с выхода фотоприемника. Достоинства растрового кодирования - простота конструкции анализатора изображения. Основной недостаток - отсутствие адаптации к изменениям внешних условий, малая помехозащищенность. Так, например, непрерывная модуляция, обладая большей чувствительностью по сравнению с импульсной, уступает ей по точности определения положения источника излучения.

Прогресс в развитии растровых анализаторов изображения связан с разработкой пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) или оптических ПВМС управляемых транспарантов. Преодолен основной недостаток механического раstra - постоянство спектра собственных пространственных частот. С помощью ПВМС возможно синтезировать перестраиваемые растры для пространственно-частотной фильтрации, селекции динамических объектов, корреляторы изображений, но говорить о широком практическом применении их пока преждевременно.

Реальные перспективы в создании адаптивных устройств углового сопровождения, для которых быстродействие $\sim 10^{-2}$ с (телевизионный стандарт) достаточен, открывают системы с воспроизведением изображения. При этом выделяют три телевизионных способа слежения: краевой, центроидный и корреляционный.

Отслеживание границ объекта является наиболее простым способом и может быть применено соответственно в наиболее простой фоновой обстановке, когда сигнал от объекта существенно превышает сигнал от фона. Надежное сопровождение обеспечивается, как правило, только при отсутствии других контрастных объектов в поле зрения, используемом для формирования сигнала ошибки.

Центроидный способ слежения состоит в отыскании энергетического центра освещенности изображения и сопровождении его во времени. Способ адаптируется в сложной обстановке, позволяет учесть уровень окружающего фона освещенности, оптимизировать уровень и полярность видеосигнала, а в некоторых случаях даже исключить влияние фона.

В корреляционном способе угловые координаты объекта отыскиваются по максимуму двумерной корреляционной функции. Образ объекта наблюдения либо хранится в долговременной памяти устройства сопровождения, либо образец для последующего сравнения находит в пределах поля зрения оператор.

Аналоговые реализации схем сопровождения достаточно сложны. С другой стороны, современная элементная база цифровой техники: твердотельные многоплощадные фотоприемники, работающие в широком диапазоне спектра, быстродействующие аналогово-цифровые преобразователи и микропроцессорные системы обеспечивают и более сложные перестраиваемые программным путем алгоритмы функционирования анализаторов изображения.

Корреляционный способ считается наиболее перспективным, но при обработке информации требует большой объем машинного времени из-за многократного перемножения двумерных числовых массивов, описывающих информацию изображения одного телевизионного кадра. Так, информационная емкость одного кадра типовой системы обработки изображений СВИТ ИЗСТ-10600 составляет $256 \times 256 \times 64 \approx 4 \cdot 10^6$ бит. Причем результат корреляционного анализа в системе углового сопровождения состоит лишь в измерении угловых перемещений какой-то точки объекта по двум координатам. То есть заложенный в корреляционном способе алгоритм вычислений без эффективных способов сжатия телевизионной информации не может использоваться рационально. В связи с этим в данной работе рассмотрен наиболее распространенный в практике тип анализатора изображения - центроидное устройство углового сопровождения телевизионного типа.

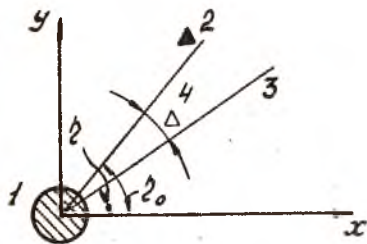
Дифференциальное уравнение замкнутой системы автоматического регулирования с электродвигателем в качестве исполнительного механизма для малых отклонений оптической оси УОВ от линии визирования имеет следующий вид:

$$T J \ddot{\gamma}^{(3)} + (T + Jk) \ddot{\gamma}^{(2)} + \dot{\gamma}^{(1)} + k_{gs} k_y \dot{\gamma} = k_{gs} k_y \dot{\gamma}_0, \quad (4.3)$$

где T - постоянная времени усилителя мощности, питающего электродвигатель; J - момент инерции всех движущихся масс (в основном оптического

блока), приведенный к оси вращения ротора; k - жесткость внешней характеристики электродвигателя; k_{gs} - крутизна регулировочной характеристики электродвигателя; k_y - коэффициент усиления усилителя мощности, питающего электродвигатель; $\dot{\gamma}$ - угол между осью Ox и оптической осью УОВ; $\dot{\gamma}_0$ - угол между осью Ox и линией визирования (рис. 4.7).

Погрешность углового сопровождения задается разностью



Р и с. 4.7. Схема сопровождения подвижного объекта: 1 - УОВ; 2 - направление на объект наблюдения; 3 - направление оптической оси УОВ; 4 - ошибка углового сопровождения

$$\Delta = \dot{\varphi}_0 - \dot{\varphi} \quad (4.4)$$

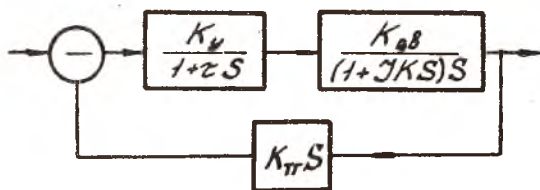
Условием устойчивости углового сопровождения по Гурвицу служит неравенство

$$\mu = k_{\text{гб}} k_y < \frac{\tau k + \tau}{\tau \tau k} \quad (4.5)$$

где μ - добротность замкнутого контура системы автоматического регулирования. Добротность и установившаяся ошибка углового сопровождения связаны соотношением

$$\mu \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta = \text{const} \quad (4.6)$$

а μ ограничено сверху неравенством (4.5), то уменьшить погрешность Δ можно лишь с помощью коррекции привода следящей системы, например, введением тахогенератора: S - переменная в операторе Лапласа. Функциональная схема скорректированного исполнительного механизма с усилителем, электродвигателем и тахогенератором приведена на рис. 4.8.



Р и с. 4.8. Схема скорректированного привода

Соответствующее функциональной схеме дифференциальное уравнение будет отличаться от (4.3) лишь постоянными коэффициентами

$$\tau \tau k \dot{\varphi}^{(3)} + (\tau + \tau k) \ddot{\varphi}^{(2)} + (1 + k_{\text{гб}} k_y k_{\text{тг}}) \dot{\varphi}^{(1)} + k_{\text{гб}} k_y \varphi = k_{\text{гб}} k_y \varphi_0 \quad (4.7)$$

а условие устойчивости (4.5) перейдет в неравенство

$$\mu_k = k_{\text{гб}} k_y < \frac{\tau k + \tau}{\tau \tau k - k_{\text{тг}} (\tau k + \tau)} \quad (4.8)$$

откуда видно, что соответствующим подбором $k_{\text{тг}}$ можно получить добротность скорректированной системы μ_k выше, чем в системе без коррекции μ , и в соответствии с (4.6) уменьшить установившуюся погрешность сопровождения.

Если параметр $k_{\text{тг}}$ выбрать слишком большим, то это приведет к затянутому апериодическому переходному процессу. Если же $k_{\text{тг}}$ слишком мал,

то получается слабо затухающий колебательный процесс. В качестве критерия быстродействия можно принять время окончания переходного процесса $\Delta(t)$, удовлетворяющее условию

$$|\Delta(t)| < 0,05 \Delta(0) \quad \text{при } t > T. \quad (4.9)$$

Однако такой критерий уже не приводит к конечным выражениям и предполагает использование ЭВМ с процедурой поиска минимума.

В зависимости от конкретного исполнения привода системы углового сопровождения дифференциальные уравнения, описывающие их функционирование, (4.3) или (4.7), допускают понижение порядка, а следовательно возможность оптимизации по критерию (4.9) в аналитической форме. При этом легко ввести определение частоты собственных колебаний УОВ ω_0 или ω_{0k} и придать им наглядный физический смысл.

Перепишем дифференциальные уравнения (4.3) и (4.8) в следующем виде

$$\frac{\tau}{JK} \ddot{z}^{(3)} + \left(1 + \frac{\tau}{JK}\right) \ddot{z}^{(2)} + \frac{1}{JK} \dot{z}^{(1)} + \frac{k_{gs} k_u}{JK} z = \frac{k_{gs} k_u}{JK} z_0, \quad (4.10)$$

$$\frac{\tau}{JK} \ddot{z}^{(3)} + \left(1 + \frac{\tau}{JK}\right) \ddot{z}^{(2)} + \frac{1 + k_{gs} k_u k_{TP}}{JK} \dot{z}^{(1)} + \frac{k_{gs} k_u}{JK} z = \frac{k_{gs} k_u}{JK} z_0. \quad (4.11)$$

В уравнениях (4.5) и (4.11) коэффициент при производной третьего порядка τ/JK , где JK - постоянная времени двигателя, которая больше

$\tau = 10$ мс, а τ - постоянная времени усилителя ошибки. Универсальным электронным звеном систем автоматического регулирования служит операционный усилитель. Постоянная времени операционных усилителей широкого применения достигает у КР1407 УД1 1000 нс, а специализированных (К500ЛП116) - 4,5 нс. Усилители на дискретных элементах имеют еще большее быстродействие. Таким образом, реально достижимо значение коэффициента

$$\frac{\tau}{JK} < 10^{-6} \ll 1. \quad (4.12)$$

Тогда уравнения (4.10) и (4.11) упрощаются:

$$\ddot{z} + \frac{1}{JK} \dot{z} + \frac{k_{gs} k_u}{JK} z = \frac{k_{gs} k_u}{JK} z_0, \quad (4.13)$$

$$\ddot{z} + \frac{1 + k_{gs} k_u k_{TP}}{JK} \dot{z} + \frac{k_{gs} k_u}{JK} z = \frac{k_{gs} k_u}{JK} z_0. \quad (4.14)$$

Соответствующие неоднородным уравнениям (4.13) и (4.14) однородные:

$$\ddot{z} + \frac{1}{Jk} \dot{z} + \frac{k_{ys} k_u}{Jk} z = 0, \quad (4.15)$$

$$\ddot{z} + \frac{1 + k_{gs} k_u k_{rr}}{Jk} \dot{z} + \frac{k_{gs} k_u}{Jk} z = 0 \quad (4.16)$$

по форме совпадают с дифференциальным уравнением, описывающим процессы в колебательном контуре. Проследивая аналогию с колебательным контуром, сразу получаем частоты собственных колебаний УОВ как с некорректированным ω_0 , так и с скорректированным $\omega_{ок}$ исполнительными элементами:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_{ys} k_u}{Jk} - \frac{1}{4J^2 k^2}}, \quad (4.17)$$

$$\omega_{ок} = \frac{k_{gs} k_u}{Jk} - \frac{1 + k_{gs} k_u k_{rr}}{4J^2 k^2}. \quad (4.18)$$

Полученные выражения не противоречат качественным рассуждениям о характере зависимости собственной частоты колебаний от входящих в них параметров, а именно, с ростом крутизны регулировочной характеристики электродвигателя k_{gs} и коэффициента усиления усилителя k_u значения ω_0 и $\omega_{ок}$ растут, а с ростом постоянных времени электродвигателя и затухания ω_0 и $\omega_{ок}$ соответственно уменьшаются.

Также по виду дифференциальных уравнений (4.15) и (4.16) можно предсказать и реакцию системы на стандартные внешние возмущения типа ступеньки или гармонические, т.е. переходных процессов и резонанса.

Тем не менее интересно проследить численными методами влияние ангармонизма, привнесенное составляющей $\tau \dot{z}^3 / Jk$ на основные параметры системы: частоту собственных колебаний и быстродействие. Практическое значение связано с тем, что быстродействие исполнительного элемента может быть повышено на несколько порядков путем замены электродвигателя пьезоэлектрическим или пьезомагнитным приводом.

Расчет собственной частоты колебаний УОВ производится путем численного решения дифференциальных уравнений (4.10) либо (4.11) или их упрощенных вариантов (4.13), либо (4.14). Численными методами рассчитывается реакция системы на внезапное воздействие типа ступеньки. Интегрирование проводится методом Рунге-Кутты с помощью стандартных программ на языке Бейсик в версии для вычислительного комплекса "СВИТ ИЗОТ". Упрощенные варианты (4.13) и (4.14) допускают и аналитическое определение собственной частоты. Само решение предваряется выбором характеристик

привода системы углового сопровождения УОВ, заданием начальных условий:

$$\dot{\gamma}^{(2)}(t=0) = \dot{\gamma}_n^{(2)}; \quad \dot{\gamma}^{(1)}(t=0) = \dot{\gamma}_n^{(1)}; \quad \gamma(t=0) = \gamma_n \quad (4.19)$$

и вида правой части

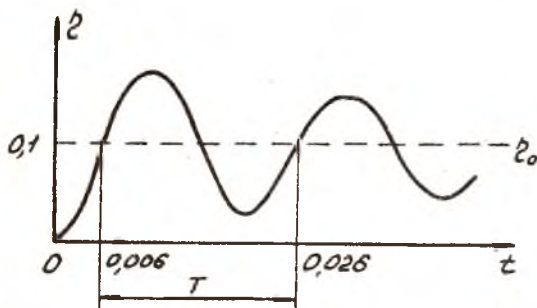
$$\gamma_0(t \geq 0) = \gamma_0(t). \quad (4.20)$$

Вначале следует проверить устойчивость системы по критериям (4.5) и (4.8) для уравнений (4.10) или (4.11). Критериями устойчивости для уравнений (4.13) и (4.14) будут соответственно выражения:

$$k_{qs} k_y > 0, \quad \mathcal{J}k > 0; \quad (4.21)$$

$$k_{qs} k_y > -\frac{1}{k_{tr}}. \quad (4.22)$$

Оценка работоспособности программного обеспечения проверялась для характеристик привода типа (4.10) и (4.13) в следующей последовательности. В численных расчетах принято: $\tau = 10^{-5}$ с; $\mathcal{J}k = 10^{-2}$ с; $k_{qs} k_y = 10^3$ с⁻¹. Как нетрудно убедиться непосредственной подстановкой этих значений в (4.5) и (4.21), система для выбранных τ , $\mathcal{J}k$, $k_{qs} k_y$ устойчива. Аналитическое выражение (4.17) дает $\omega_{0a} = 312$ рад⁻¹ или $\gamma_{0a} = 49,7$ Гц. Численное решение уравнения (4.13) с начальными условиями $\dot{\gamma}^{(2)}(t=0)=0$; $\dot{\gamma}(t=0)=0$, правой частью в виде ступеньки $\gamma_0(t \geq 0) = 0,1$ рад и с шагом по $t = 0,001$ с приводит к переходному колебательному процессу (рис. 4.9) с периодом $T = 0,02$ с, т.е. $\gamma_{op} = 50$ Гц.



Р и с. 4.9. Вид переходного процесса при воздействии на систему

Введение слабого ангармонизма с коэффициентом $\tau/\mathcal{J}k = 10^{-3}$, т.е. численное решение уравнения (4.10) при тех же начальных условиях: $\dot{\gamma}^{(2)}(t=0)=0$; $\dot{\gamma}^{(1)}(t=0)=0$; $\gamma(t=0)=0$, правой частью $\gamma_0(t \geq 0) = 0,1$ рад и шагом $\Delta t = 0,001$ с приводит к такому же переходному процессу, что и в случае уравнения (4.13) с периодом $T = 0,02$ с, $\gamma_{op} = 50$ Гц.

В заключение можно сделать следующие выводы.

а) предложенная методика расчета собственной частоты колебаний УОВ путем численного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих автоматическую систему углового сопровождения, является работоспособной;

б) влиянием ангармонизма до значений коэффициента при производной третьего порядка 10^{-3} можно пренебречь и пользоваться более простыми соотношениями условия устойчивости (4.13), (4.14).

Вероятность совпадения оптической оси устройства визуализации с энергетическим центром освещенности предмета. При решении практических задач набор положений оптической оси УОВ в пространстве представляет собой непрерывный континуум. Тогда под вероятностью совпадения оптической оси УОВ с энергетическим центром освещенности наблюдаемого объекта следует понимать вероятность того факта, что оптическая ось светового пучка УОВ проходит через плоскость изображения внутри некоторой концентрической окружности радиуса R с энергетическим центром. Оценку вероятности можно произвести, рассмотрев реакцию системы на случайное внешнее воздействие. Существуют два способа описания случайного внешнего воздействия: вероятностное и статистическое. Под вероятностным описанием случайного процесса понимают его представление с помощью ряда вероятностных функций (функций распределения, плотностей вероятностей и т.п.), под статистическим - представление с помощью характеристик, усредненных по способам реализаций (математического ожидания, дисперсии, корреляционной функции).

Входной контроль процесса для системы углового сопровождения УОВ представляет собой поток фотонов, несущих информацию о наблюдаемом объекте. В зависимости от среднего уровня потока фотонов на один элемент изображения и его когерентности используют различные статистики, описывающие этот поток. Однако на практике наибольшее распространение получили два вида статистик: пуассоновская и гауссовская, причем первая переходит во вторую, когда средний поток фотонов превышает их уровень в 5-10 раз за интервал наблюдения.

В настоящее время из фотоприемников, воспроизводящих изображение в режиме счета фотонов, работают лишь диссекторы и устройства с микроканальными пластинами, в то время как обычные телекамеры требуют для нормального функционирования более высоких уровней освещенности фоточувствительной поверхности. Поэтому при определении вероятности совпадения оптической оси УОВ с энергетическим центром освещенности достаточно выявить величину перемещения от реакции системы на случайный входной процесс с гауссовской статистикой:

$$f(E) = \frac{(E - E_0)}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E - E_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.23)$$

где $f(E)$ - плотность распределений; E - мгновенное значение освещенности элемента изображения; E_0 - среднее значение освещенности элемента изображения; σ^2 - дисперсия освещенности элемента изображения.

Алгоритм расчета вероятности совпадения оптической оси УОВ с энергетическим центром освещенности предмета состоит из следующих этапов:

выбора параметров распределения входного процесса для каждого элемента изображения E_{0i} , σ_i^2 ;

расчета реакции центроидного анализатора изображения, т.е. случайного выходного процесса дискриминатора, который будет являться входным для исполнительного элемента автоматической системы углового сопровождения;

расчета перемещения от реакции исполнительного элемента.

Рассмотрим погрешность сопровождения энергетического центра движущегося объекта, обусловленную турбулентностью атмосферы. Флуктуации направления на энергетический центр из-за турбулентности атмосферы достигают 10 угл.с, максимум временного спектра флуктуаций лежит в диапазоне 1-2 Гц. Примем спектральную плотность флуктуаций направлений в области полосы пропускания системы углового сопровождения УОВ равномерной и оценим ее сверху величиной $G_1 = 100 \text{ (угл.с)}^2 \cdot \text{Гц}^{-1}$. Шум с равномерной спектральной плотностью G_1 поступает на вход системы, описываемой уравнением (4.13), которое перепишем в виде

$$\frac{\partial k}{\partial k_{qs} k_y} \ddot{z} + \frac{1}{k_{qs} k_y} \dot{z} + z = z_0. \quad (4.24)$$

Пусть в среднем оптическая ось УОВ направлена на энергетический центр освещенности предмета, т.е. в выбранной системе координат математическое ожидание случайного направления оптической оси УОВ равно нулю.

В этом случае дисперсия функции плотности распределения на выходе системы (4.24) будет совпадать с значением корреляционной функции выходного процесса для нулевого интервала:

$$\sigma_z^2 = R_z(t=0) = \frac{k_{qs} k_y}{4} G_1. \quad (4.25)$$

Принятое ранее значение $k_{qs} k_y = 10^3 \text{ с}^{-1}$ дает величину $\sigma_z^2 = 2,5 \cdot 10^4 \text{ (угл.с)}^2 = 5,38 \cdot 10^{-5} \text{ рад}^2$.

Поскольку статистика входного сигнала гауссовская и при прохожде-

нии через линейную систему закон плотности распределения остается нормальным, то плотность распределения углового положения оптической оси УОВ относительно энергетического центра тоже будет описываться выражением

$$f_z(\chi) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\chi^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (4.26)$$

где χ - случайное отклонение оптической оси УОВ от энергетического центра.

Вероятность того, что оптическая ось УОВ отклонится от направления на энергетический центр не более чем на величину $\pm \chi_1$, определяется интегрированием плотности распределения (4.26):

$$F(\chi_1) = 2 \int_0^{\chi_1} f(\chi) d\chi = \frac{2}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \int_0^{\chi_1} \exp\left(-\frac{\chi^2}{2\sigma_z^2}\right) d\chi. \quad (4.27)$$

Если отсчитывать углы χ в долях средней квадратичной ошибки σ_z , т.е. ввести новую переменную $Z = \chi/\sigma_z$, то получим

$$F(\chi_1) = 2\Phi(Z_1), \quad (4.28)$$

где $\Phi(Z_1)$ - функция Лапласа. Тогда вероятность отклонения оптической оси УОВ от энергетического центра не более чем на величину $\sigma_z = 1,581 \cdot 10^2$ угл.с составит $F(\chi_1 = \sigma_z) = 0,68$; $F(\chi_1 = 2\sigma_z) = 0,95$; $F(\chi_1 = 3\sigma_z) = 0,997$.

При принятых для числовых оценок характеристик системы углового сопровождения более опасными с точки зрения увеличения погрешности сопровождения представляются детерминированные воздействия в виде гармонических колебаний положения энергетического центра. Такие воздействия реализуются при вращении объекта наблюдения, когда его энергетический центр освещенности не совпадает с осью вращения. Допустим, наблюдаемый объект вращается с угловой скоростью ω , а его энергетический центр описывает окружность радиуса R_0 . Проекция этого перемещения на какое-то направление, перпендикулярное к оси вращения, и будет тем гармоническим входным воздействием

$$\chi_{\text{вх}} = \chi_{0\text{вх}} \sin \omega t, \quad (4.29)$$

где $\chi_{\text{вх}}$ - входное гармоническое воздействие; $\chi_{0\text{вх}}$ - амплитуда входного гармонического воздействия.

Реакция системы углового сопровождения также будет гармонической:

$$\chi_{\text{вых}} = \chi_{0\text{вых}} \sin[\omega t + \varphi(\omega)], \quad (4.30)$$

где $\dot{\gamma}_{\text{вых}}$ - реакция системы углового сопровождения; $\dot{\gamma}_{0 \text{ вых}}$ - амплитуда раскачки системы углового сопровождения; $\psi(\omega)$ - начальная фаза реакции.

Для системы (4.24) амплитудная частотная характеристика имеет вид

$$|H(\gamma)| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\gamma}{\gamma_{\text{он}}}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\gamma}{\gamma_{\text{он}}}\right)^2}}, \quad (4.31)$$

где $|H(\gamma)|$ - амплитудная частотная характеристика; γ - частота входного воздействия; $\gamma_{\text{он}}$ - собственная частота незатухающих колебаний; ξ - коэффициент затухания системы.

Причем

$$\gamma = \frac{\omega}{2\pi}; \quad (4.32)$$

$$\gamma_{\text{он}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{гс}} k_y}{J k}}; \quad (4.33)$$

$$\xi = \frac{1}{2\sqrt{k_{\text{гс}} k_y J k}}. \quad (4.34)$$

Так как $\xi^2 = 0,025 < 0,5$, то на резонансной частоте

$$|H(\gamma_{\text{он}})| = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} = 3,20 \quad (4.35)$$

и амплитуда раскачки системы углового сопровождения

$$\dot{\gamma}_{0 \text{ вых}} = |H(\gamma_{\text{он}})| \dot{\gamma}_{0 \text{ вх}} = 3,2 \dot{\gamma}_{0 \text{ вх}} \quad (4.36)$$

может в 3,2 раза превышать амплитуду входного воздействия.

4.4. Измерение геометрических размеров изделий

Дистанционные измерения геометрических размеров изделий машиностроения с помощью электромагнитных волн оптического диапазона делятся: на когерентные (дифракционные, интерференционные, спеклструктурные) и некогерентные; с построением изображения или без построения; с фильт- рацией на оптических частотах или после преобразования в электрический сигнал. Когерентные оптические системы являются наиболее универсальными и позволяют производить параллельную обработку двумерных полей со скоростью распространения света, но высокие требования к качеству элементной базы и среды распространения связывают применение когерентных схем с развитием интегральной оптики. Поэтому более широко в производ-

ственных условиях используются некогерентные по принципу действия установки, хотя источником света в них может служить и лазер, особенно там, где необходима спектральная селекция, высокие пиковые мощности, малая расходимость пучка. К числу основных потребителей оптико-электронных, в том числе и лазерных, измерительных приборов относятся производства со 100% выходным контролем, т.е. авиастроительные фирмы и изготовители аэрокосмической техники.

В последнее время происходят существенные изменения в характере контроля линейных размеров в машиностроении - переход от ручных, визуальных методов к автоматизированным и дистанционным. Автоматизированные измерения обеспечивают объективность контроля, высокие точность и производительность, дают возможность оперативно изменять ход технологического процесса, снижая или вовсе исключая брак по причине выхода геометрических размеров за допуски. К оптико-электронным системам для промышленного применения предъявляются следующие требования: быстрый вывод результатов на монитор, надежность функционирования в неблагоприятных условиях, соответствие принятым стандартам, контроль аппаратных и программных ошибок.

Измерение диаметра детали цилиндрической формы и его приращение одна из наиболее распространенных контролируемых процедур, для реализации которой методами обработки изображений был предложен следующий алгоритм. Суть алгоритма поясняет рис. 4.10. На изображении цилиндра периодически измеряются ординаты точек пересечения границ цилиндра с двумя, расположенными на расстоянии l друг от друга вертикалями $x_1 = \text{const}_1$ и $x_2 = \text{const}_2$, y_1, y_2, y_3, y_4 . Для каждого кадра вычисляется диаметр

$$d = (y_2 - y_3) \cos \arctg \frac{y_2 - y_1}{l}, \quad (4.37)$$

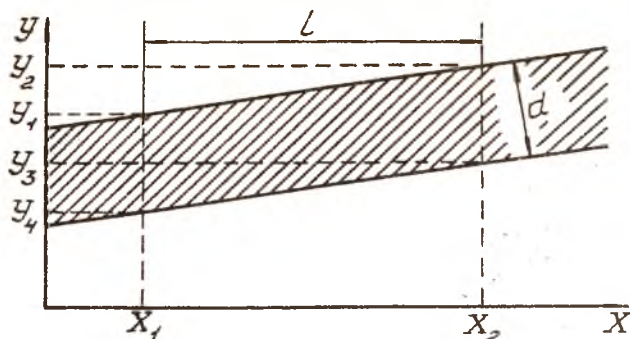
ордината центра изображения цилиндра

$$y_c = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4}, \quad (4.38)$$

и его наклон

$$\alpha = \arctg \frac{y_2 - y_1}{l} \quad (4.39)$$

в поле зрения телекамеры. Предложенный алгоритм интересен тем, что диаметр и наклон цилиндра вычисляются как разности соответствующих координат, и, следовательно, результаты его работы инвариантны к смещениям и поворотам цилиндра в поле зрения. Приращение диаметра определяется как разность следующих друг за другом измерений:



Р и с. 4.10. Схема измерений

$$\Delta d = d_{i+1} - d_i . \quad (4.40)$$

Если это приращение есть следствие обработки по образующей вращающейся детали (точение на токарном станке, наплавка, напыление и т.п.), то за толщину напыляемого покрытия можно принять половину приращения.

Чтобы реализовать алгоритм измерения диаметра или его приращения, необходимо выделить изображение цилиндра из фона и определить точные положения его границ. Начале осуществляется приближенное выделение границ методом наибольшего градиента. Для этого вычисляются суммарные освещенности каждой строки $E_{i,x}$, а также значения разностей освещенностей $dE_{i,x} = E_{i+1,x} - E_{i,x}$. Положение строк с минимальным и максимальным значениями разности определяют приблизительное местоположение границ цилиндра. В результате все поле зрения разделяется на три области: две области - фон и одна - цилиндр, вычисляются средние освещенности фона E_ϕ и цилиндра E_u и назначаются пороговые уровни обработки. Некоторая точка изображения $A(x,y)$ относится к области фона S_ϕ или цилиндра S_o , если

$$A(x,y) \in \begin{cases} S_\phi, & E_A \geq p(E_\phi + E_u) \\ S_o, & E_A < p(E_\phi + E_u), \end{cases} \quad (4.41)$$

где E_A - освещенность изображения в точке A ; p - порог.

Определение точного положения координат границ цилиндра и других его характеристик включает следующие этапы:

пороговую обработку;

достижение разрешения менее размеров одного пиксела изображения;

исключение систематических ошибок, обусловленных аберрациями;

вычисление коэффициентов уравнений прямых, аппроксимирующих верхнюю и нижнюю границы изображения цилиндра;

вычисление ординат точек пересечения границ с вертикалями $x_1 = \text{const}_1$ и $x_2 = \text{const}_2$ и характеристик цилиндра (см. (4.37)...(4.40)).

Пороговая обработка производится по каждому столбцу изображения. С целью повышения помехоустойчивости процедуры выделения координат границ изображения цилиндра к точечным дефектам оптического тракта и ПЗС-матрицы окончательное решение об отнесении точки к изображению цилиндра или фона принимается, если 10 последующих точек также принадлежат той же области по условию (4.41). Это, естественно, ограничивает динамический диапазон измеряемых значений диаметров снизу 10 пикселлами изображения и допустимые наклоны цилиндра в поле зрения телекамеры сверху.

Бесткий растр твердотельных ПЗС-матриц выгодно отличает их от электровакуумных двумерных преобразователей (видиконов, суперортиконов и т.п.). Размеры одной ячейки ПЗС-матриц серийного производства колеблются от 8 до 30 мкм. Многофазная структура каждого элемента и тот факт, что фотогенерированные заряды можно накапливать под произвольно выбранным электродом элемента с многофазной структурой, позволяет фиксировать положение фрагмента изображения с точностью до долей размера фоточувствительной ячейки. Эта доля обратно пропорциональна удвоенному значению числа фаз элемента.

Для ПЗС-телекамеры КТМ-1 с матрицей К1200ЦМ7, размер элемента которой 18x19 мкм, а число фаз управления три, разрешение, достигнутое оптимизированной процедурой считывания зарядовых пакетов, составит 3 мкм. Однако, во-первых, здесь потребуются на одно измерение обрабатывать не один, а три кадра изображения при фиксации измеряемого объекта относительно телекамеры. Во-вторых, подвергается перестройке схемотехническое решение телекамеры.

Улучшить разрешение в определении координат границ цилиндра возможно программными средствами, используя специальный алгоритм. Он заключается в аппроксимации величины освещенности в области границы цилиндра прямой линией, но авторы привели лишь качественные аргументы и экспериментальные результаты в пользу выбранной аппроксимации и ее реализации.

Теоретическое обоснование этого алгоритма состоит в следующем. Пусть кадр содержит изображение темного цилиндра на светлом фоне. Вследствие aberrаций или преднамеренной дефокусировки изображение границы будет размыто и займет несколько пикселей матричного фотоприемника в направлении, перпендикулярном линии границы, причем вблизи границы зависимость освещенности изображения от ординаты линейна:

$$E = my + c, \quad (4.42)$$

где m и c постоянные коэффициенты, которые вычисляются методом наименьших квадратов по небольшому (3-7) числу отсчетов.

Для упрощения расчетов предположим, что при переходе от цилиндра к фону освещенность изменяется от $E_c = 0$ до $E_\phi = I$. Истинное положение границы y_0 в этом случае будет соответствовать уровню $E_0 = 0,5$. Если граница растягивается на n пиксел, то $i = I$ будет соответствовать $E_i = 0$, а $i = n$ $E_n = I$.

Тогда

$$m = \frac{1}{n-1} \quad (4.43)$$

и

$$y_0 = \frac{E_0 - c}{m} \quad (4.44)$$

Погрешность измерения ординаты границы Δy_0 находим дифференцированием выражения (4.44):

$$\Delta y_0 = \frac{\Delta E + \Delta c}{m} + \frac{\Delta m}{m^2} (E_0 - c), \quad (4.45)$$

где ΔE , Δc и Δm - абсолютные погрешности соответствующих величин. При проведении анализа погрешностей координатных измерений предположим, что прямая (4.42) проходит через начало координат, т.е. $c = 0$. После чего, подставив $E_0 = 0,5$ и (4.43) в (4.45), получим

$$\Delta y_0 = \frac{\Delta E + \Delta c}{m} + 0,5 \frac{\Delta m}{m^2}. \quad (4.46)$$

Статистические погрешности определения коэффициентов прямой m и c при равновзвешенной точности измерений освещенности как по координатам, так и по уровням $\sigma_\varepsilon = \text{const}$ имеют следующий вид:

$$\Delta c = \sigma_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{y}^2}{D}}; \quad (4.47)$$

$$\Delta m = \frac{\sigma_\varepsilon}{\sqrt{D}}; \quad (4.48)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad (4.49)$$

$$D = \sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2; \quad (4.50)$$

$$n=3,5,7,\dots,2K-1, \quad (4.51)$$

где n интерпретируется как число пиксел, на которое растянуто изображение границы. Из условия $c = 0$ следует, что

$$y_1=0, y_2=1, y_3=2, \dots, y_i=i-1. \quad (4.52)$$

Кроме того, примем $\sigma_e = \Delta E$. В результате получается удобное для расчета и анализа выражение

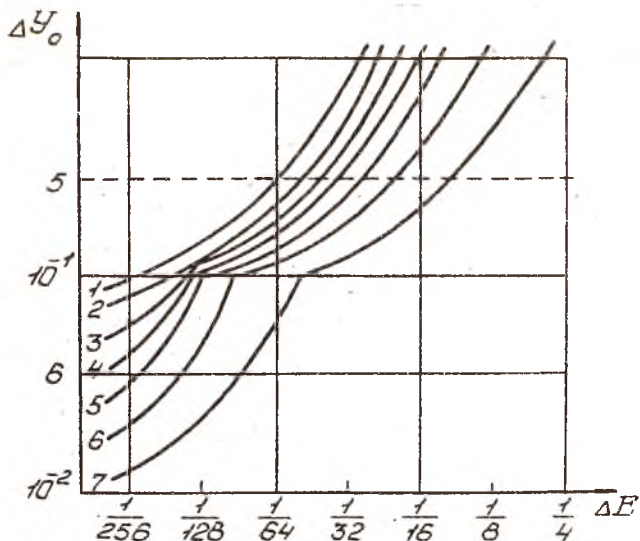
$$\Delta y_0 = \left[1 + \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{y^2}{D}} + 0,5(n-1) \right] \Delta E(n-1). \quad (4.53)$$

Как видно из (4.53), между Δy и ΔE существует прямая пропорциональная зависимость, т.е. путем уменьшения погрешностей измерения освещенности можно добиться точного определения положения границы. С другой стороны, увеличение числа отсчетов, используемых для построения прямой методом наименьших квадратов, наоборот, вызывает увеличение погрешности Δy .

Численные расчеты потенциальной точности измерения положения границ выполнены с помощью выражений (4.49)...(4.53) для практически важных случаев, когда линейный закон изменения освещенности на изображении границы цилиндра соблюдается на расстоянии $n = 3,5, \dots, 15$ пиксел, а фотоприемник различает $1, 2, 4, \dots, 128$ градаций освещенности, т.е. $\Delta E = 1/2, 1/4, \dots, 1/256$. Результаты расчетов приведены на рис. 4.11. Все поле графика пунктирной горизонталью разделено на две области по уровню $\Delta y_0 = 0,5$. Интерес представляет область, заключенная между осью ΔE и пунктирной линией. Внутри этой области применение аппроксимирующего алгоритма дает выигрыш в разрешении по координате и потому имеет смысл. Малая разориентация границы цилиндра относительно ПЗС-матрицы не сказывается на точности отсчетов.

Описанный алгоритм повышения пространственной разрешающей способности реализуется тем, что пороговая обработка проводится по крайней мере три раза. Положение границ цилиндра в каждом столбце изображения определяется по порогам p_i ($i = 3,5, \dots, 2K-1$). Затем в каждом столбце рассчитывается точная ордината границы с помощью выражения (4.44).

Систематические ошибки в определении координат, обусловленные аберрациями, исключаются с помощью табличной коррекции, суть которой состоит в использовании предварительно полученных данных по контрольным образцам. Таким образом, по каждому кадру изображения формируется два массива ординат для верхней и нижней границ цилиндра. Коэффициенты урав-

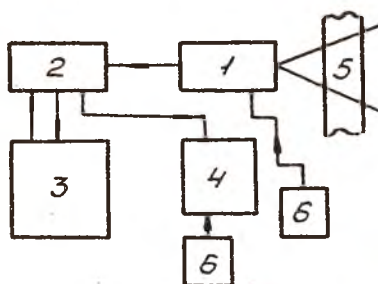


Р и с. 4.11. Погрешность измерения координат:
 1 - $n = 15$; 2 - $n = 13$; 3 - $n = 11$; 4 - $n = 9$;
 5 - $n = 7$; 6 - $n = 5$; 7 - $n = 3$

нений границ, которые предполагаются прямыми, рассчитываются также методом наименьших квадратов, используя данные, содержащиеся в массивах.

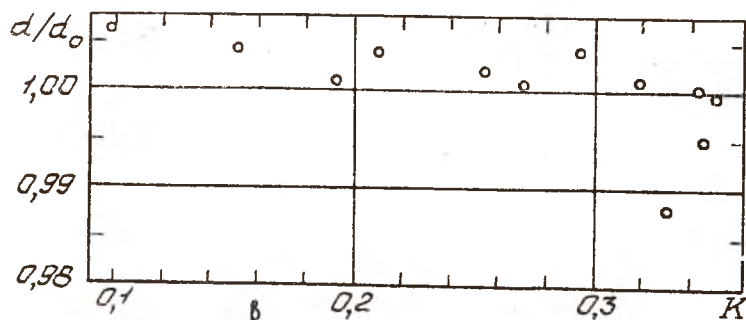
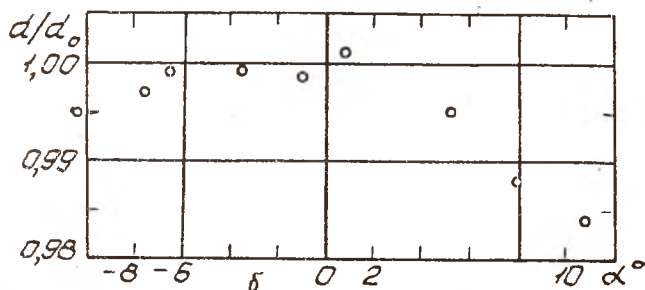
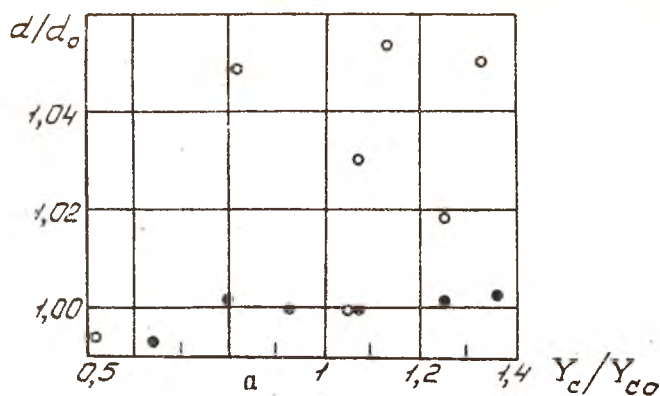
На заключительном этапе вычисляются ординаты точек пересечения границ с вертикалями $x_1 = \text{const}_1$ и $x_2 = \text{const}_2$ и другие характеристики цилиндра (4.37)...(4.40).

Измеритель диаметров состоит из комплекса приборов: ПЭС-телекамеры



Р и с. 4.12. Структура прибора: 1-телекамера; 2-блок ввода-вывода изображений; 3-мини-ЭВМ; 4-видеомонитор; 5-образец; 6 - источник питания

КТМ-1, устройства ввода-вывода изображений, ПЭВМ, блоков питания. Структура прибора представлена на рис. 4.12. Устройство ввода-вывода изображений предназначено для ввода, хранения и вывода изображений, представленных стандартным телевизионным сигналом. Основные его характеристики следующие: внутренний формат изображения $256 \times 256 \times 3$ бит, число градаций серого при выводе изображения 256, число градаций серого при вводе изображения 64; время одного кадра изображения 20 мс, интерфейс - шина типа Q-BUS. Все детали устройства вво-



Р и с. 4.13 Зависимость изменения величины диаметра контрольного образца от его поступательного смещения (а), угла поворота (б) и значения контраста (в): $\circ$ - образец большого диаметра; $\bullet$ - контрольный образец малого диаметра

да-вывода смонтированы на одной плате, которая занимает одно свободное плато-место в корзине ПЭВМ.

Экспериментальные оценки технических характеристик прибора проводились на оптическом стенде с использованием контрольных образцов. Контрольные образцы представляли собой металлические цилиндры со шлифованной и анодированной поверхностью. Геометрические параметры эталонных образцов контролировались на измерительном двухкоординатном приборе ДИП-I проекционным методом с погрешностью ± 4 мкм. Конусность и эллипсность образцов не выходили за пределы допустимой погрешности прибора. ДИП-I, а диаметры имели значения: 2,173 мм, 6,856 мм, 8,673 мм, 13,671 мм.

Экспериментально исследовались зависимости измеренного прибором диаметра контрольного образца от его поступательного смещения, угла поворота, контраста и порога, а также повторяемость результатов. Эти зависимости представлены на рис. 4.13 соответственно. Контраст освещенности K изображения фона и цилиндра рассчитывался стандартно с помощью выражения

$$K = \frac{E_f - E_c}{E_f + E_c} \quad (4.54)$$

Как видно из рис. 4.13,а, поступательное смещение образца, поперечный размер которого занимает $\sim 30\%$ поля зрения, вызывает разброс измеренных значений диаметра не более 1%. Для тонкого контрольного образца

$D = 2,173$ мм этот разброс не превышает 5%. Тем не менее последнее обстоятельство указывает на необходимость согласования оптического увеличения с характеристиками объекта измерения в заданном интервале величины диаметров. Поворот образца в поле зрения на угол $-10^\circ < \alpha < 10^\circ$ дает разброс измеренных значений диаметра не более 1% (см. рис. 4.13,б). Изменение контраста в пределах от 0,1 до 0,35 также мало сказывается на результатах измерений (см. рис. 4.13,в).

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИДАРОВ

5.1. Климатический мониторинг

Для определения расстояния до облака из анализа лидарного сигнала обратного рассеяния могут быть использованы несколько параметров. Наиболее простыми являются: расстояние до точки, где начинается сигнал от облака z_0 ; расстояние до максимального значения сигнала z_m ; расстояние до фиксированного уровня (например, половины) от максимума на переднем z_1 и заднем z_2 фронтах эхо-сигнала. Один из высотных профилей отношения обратного рассеяния R для длины волны 532 нм показан на

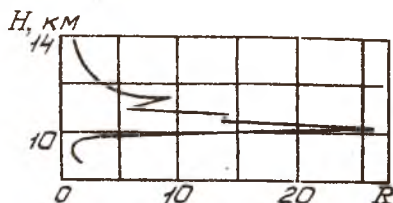
рис. 5.1. Значение $R_{\max}$, например, в перистом облаке может изменяться от 10 до 100 и более. В связи с тем, что высота перистой облачности весьма непостоянна, ее оптическая плотность может также существенно изменяться при одинаковых измеренных значениях R . Оптическая плотность τ^* (532 нм) перистых облаков изменяется от 0,01 до 0,1 и более. Из этого следует, что

глубина проникновения светового импульса в перистое облако может изменяться от 500 до 5000 м, т.е. с помощью лазерного зондирования можно исследовать внутреннюю структуру перистых облаков.

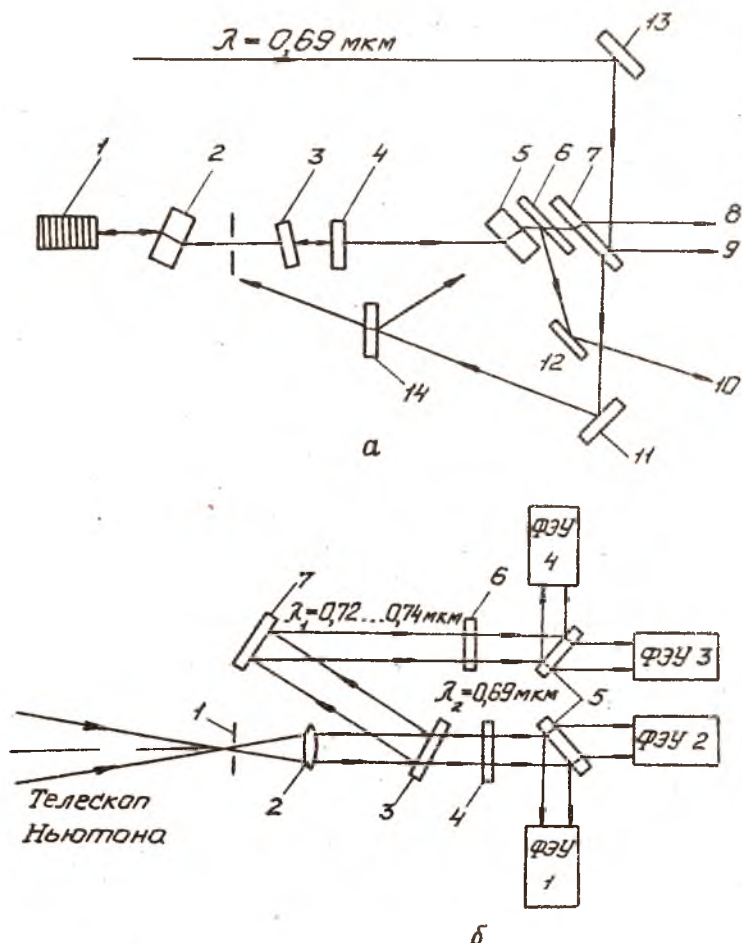
Разделение молекулярной и аэрозольной составляющих рассеяния основано на применении спектрального метода выделения доплеровского уширения при рассеянии на молекулах. Для этой цели используется спектрометр с несколькими эталонами Фабри-Перо. Источником излучения служит лазер на парах меди со средней мощностью 50 мВт ($\lambda_1 = 510,6$ нм, $\lambda_2 = 578,2$ нм, $f_A = 8$ кГц, $\tau = 15$ нс). Диаметр зеркала приемной антенны 0,35 м, спектральная ширина интерференционного фильтра на длине волны 510,6 нм составляет 1 нм.

Более чувствительный лидар с дифференциальным поглощением работает в ближнем ИК-диапазоне на длине волны 724,37 нм линии поглощения H_2O . В этой лазерной установке (рис. 5.2) применен лазер на рубине, работающий в режиме модуляции добротности, с энергией в импульсе 1,5 Дж для одновременного получения лазерного импульса с длинами волн 694,3 нм и 724,37 нм. Такой режим работы достигают путем разделения луча на два с энергией в импульсе 0,25 и 1,25 Дж. Луч с энергией в импульсе 1,25 Дж используют для накачки системы из двух ячеек с красителем, одна из которых служит генератором, другая - усилителем. Чтобы обеспечить возможность перестройки в интервале длин волн от 715 до 740 нм, применяют раствор ДТЭС в диметилсульфоксиде с концентрацией $1,2 \cdot 10^{-4}$ м. Для получения узкополосной генерации используют сочетание дифракционной решетки и интерферометра Фабри-Перо. В результате на выходе получают пучок с энергией в импульсе 0,165 Дж, длительностью импульса 30 нс, шириной полосы генерации $\sim 0,008$ нм и расходимостью менее 3,5 мрад.

При определении водозапаса основными оптическими параметрами перистых облаков являются: ИК-излучательная способность, коротковолновое альbedo и спектральное пропускание. При исследовании водозапаса совместно используются ИК-радиометр, определяющий собственное излучение облака, а также лидар, измеряющий высоту и толщину облачности.



Р и с. 5.1. Высотный профиль отношения обратного рассеяния перистой облачности



Р и с. 5.2. Лидар дифференциального поглощения в ИК-диапазоне:
 а - оптическая схема лазерного излучателя: 1 - дифракционная решетка 79 штрихов/мм; 2 - генератор на красителе; 3 - эталон Фабри-Перо (2 мм); 4 - зеркало (25%); 5 - усилитель на красителе; 6 - пленка; 7 - светодетектор; ($R = 20\%$ для 694,3 нм, $T = 90\%$ для 715...740 нм); 8 - выходной сигнал лазера на красителе (715...740 нм); 9 - выходной сигнал рубинового лазера; 10 - к поглощающей ячейке (74 прохода соответствуют 300 м); 11, 12, 13 - зеркало (100%); 14 - светодетектор ($R = 45\%$);
 б - оптическая схема приемной системы лидара: 1 - регулируемая диафрагма; 2 - коллиматорная линза; 3 - дихроичный светодетектор ($R = 99\%$ для 715...740 нм, $T = 80\%$ для 694,3 нм); 4 - узкополосный фильтр ($T = 60\%$); 5 - светодетектор ($R = 90\%$ или 99%); 6 - узкополосный фильтр ($T = 82\%$); 7 - зеркало (100%)

$$\varepsilon = \frac{J_{обл}}{J_{ч.т}} = \frac{1}{J_{ч.т}} \left(\frac{J - J_{неб}}{T} - J_{отр} \right), \quad (5.1)$$

где $J_{ч.т}$ - интенсивность излучения черного тела, находящегося при средней температуре облака с учетом спектральной функции пропускания радиометра; $J_{обл}$ - собственное излучение облака в том же диапазоне длин волн; J - измеряемая радиометром интенсивность нисходящего излучения при наличии облака; $J_{неб}$ - излучение безоблачной атмосферы; T - пропускание подоблачного слоя атмосферы на длинах волн радиометра; $J_{отр}$ - часть восходящего излучения Земли, которая отражается облаком вниз.

Из уравнения переноса излучения можно получить выражение для интенсивности нисходящего излучения безоблачной атмосферы:

$$J_{неб} = - \int_{\Delta\lambda} \Psi(\lambda) \int_{\Delta h} B_{\lambda}(T) \frac{dT_{\lambda}(h)}{dh} d\lambda dh, \quad (5.2)$$

где $\Psi(\lambda)$ - спектральная функция пропускания радиометра; $B_{\lambda}(T)$ - функция Планка при температуре слоя T ; $T_{\lambda}(h)$ - пропускание слоя атмосферы толщиной Δh . В диапазоне 3-12 мкм функция пропускания атмосферы определяется излучением водяного пара, углекислого газа и озона. Поскольку водяной пар излучает (поглощает) более 90% общего излучения атмосферы, то излучением CO_2 и O_3 можно пренебречь. Это допущение, с одной стороны, значительно упростило расчеты и, с другой стороны, не внесло в них больших погрешностей. Функция пропускания водяного пара представлялась экспоненциальной зависимостью

$$T_{H_2O}(z) = \exp[-K_{H_2O} M_{H_2O}(z)]. \quad (5.3)$$

Здесь K_{H_2O} - массовый коэффициент поглощения водяного пара; M_{H_2O} - приведенная масса водяного пара,

$$M_{H_2O}(z) = \sec \theta \int_0^z \rho(z') \left[\frac{P(z')}{P(0)} \right]^m dz', \quad (5.4)$$

где θ - зенитный угол; $\rho(z')$ - плотность водяного пара; $P(0)$ и $P(z')$ - атмосферное давление у поверхности Земли и на высоте z' ; m - коэффициент, который для H_2O равен 0,8.

Коэффициент поглощения водяного пара принимается не зависящим от содержания водяного пара в атмосфере, так как по многим литературным данным нелинейная зависимость коэффициента поглощения от влагосодержания начинает проявляться при влагосодержании атмосферы, превышающем $30 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$. В метеорологических условиях, в которых проводились эксперименты, влагосодержание не превосходило $25 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$. Коэффициент поглощения в полосе 8-12 мкм заменяется неким эффективным.

Лидарно-радиометрический метод применяется и для определения водозапаса и водности облаков. Метод основан на измерении излучательной способности перистых облаков в диапазоне 3-13 мкм и среднестатистической модели их микрофизических характеристик. Ледяные кристаллы в перистой облачности отличаются большим разнообразием форм и размеров, поэтому в расчетах удобно оперировать универсальными величинами, такими как объем или площадь сечения кристалла. Переход к конкретной связи этих величин с формой и размером кристалла удобно осуществлять на последнем этапе расчетов. В соответствии с этим замечанием определим размер ледяного кристалла как диаметр сферы равного объема.

Пусть $n(l)dl$ - число кристаллов в единице объема, размеры которых заключены в интервале $(l, l + dl)$. Тогда концентрация кристаллов

$$N_k = \int_0^{\infty} n(l)dl. \quad (5.5)$$

Функцию

$$\bar{\eta}(l) = n(l)/N_k \quad (5.6)$$

назовем распределением кристаллов по размерам. Очевидно, что

$$\int_0^{\infty} \bar{\eta}(l)dl = 1. \quad (5.7)$$

Пусть $v_k(l)$ - объем ледяного кристалла размером l . В соответствии с данным определением размера кристалла:

$$v_k(l) = \frac{4}{3} \pi l^3. \quad (5.8)$$

Водозапас облака W можно вычислить по формуле

$$W = L \rho N_k \int_0^{\infty} \bar{\eta}(l) v_k(l) dl, \quad (5.9)$$

где L - вертикальная протяженность облака, $\rho = 0,9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ плотность льда. В настоящее время имеются сведения о распределении кристаллов по размерам и их форме в облаках верхнего яруса.

Таким образом, при известной функции $\bar{\eta}(l)$ для расчета водозапаса необходимо определить только концентрацию кристаллов N_k . Сделать это можно, измерив излучательную способность облака ϵ . Чтобы связать ϵ с N_k , введем эффективное сечение излучения кристалла $\bar{\sigma}^o(l)$. Эта величина численно равна площади абсолютно черного тела, с которой излучается столько же радиации, сколько излучает кристалл размером l , имеющий ту же температуру. Вообще говоря, эффективное сечение излучения кристалла $\bar{\sigma}^o(l)$ зависит от длины волны. Для ледяных кристаллов перистых облаков эту зависимость можно не учитывать. Оптическая плотность облака, выраженная через функцию $\bar{\sigma}^o(l)$, имеет вид

$$\tau^* = LN_k \int_0^\infty \bar{\sigma}^0(\ell) \bar{\eta}(\ell) d\ell. \quad (5.10)$$

Излучательная способность облака связана с τ^* выражением (в пренебрежении рассеянием)

$$\varepsilon = 1 - \exp(-\tau^*) = 1 - \exp \left[-LN_k \int_0^\infty \bar{\sigma}^0(\ell) \bar{\eta}(\ell) d\ell \right]. \quad (5.11)$$

Следовательно, концентрация кристаллов

$$N_k = \ln \left(\frac{1}{1-\varepsilon} \right) / L \int_0^\infty \bar{\sigma}^0(\ell) \bar{\eta}(\ell) d\ell. \quad (5.12)$$

Подставив соотношение (5.11) в (5.8), для водозаписа облака получим

$$W = \rho \ln \frac{1}{1-\varepsilon} \int_0^\infty v_k(\ell) \bar{\eta}(\ell) d\ell / \int_0^\infty \bar{\sigma}^0(\ell) \bar{\eta}(\ell) d\ell. \quad (5.13)$$

Итак, соотношение (5.13) связывает водозапас облака с его излучательной способностью при независимом от длины волны эффективном сечении излучения кристаллов $\bar{\sigma}^0(\ell)$.

При определении температуры облака предполагается, что выше 10 км величина принятого сигнала зависит главным образом от релеевского рассеяния и что для расчета температуры по изменению концентрации молекулярных компонент можно использовать закон идеального газа в сочетании с гидростатическим соотношением. Для определения температуры измеряют концентрации молекулярных компонент атмосферы, но используют для этого упругое рассеяние излучения мощности лазера. Расчет температуры проводят по формуле

$$T(z) = \frac{N(z_1) k T(z_1) + \int_{z_1}^z W_m(z) dz}{N(z) k}. \quad (5.14)$$

Здесь $T(z)$ и $N(z)$ - зависимости температуры от концентрации молекулярных компонент от высоты z соответственно; $W_m(z)$ - вес 1 см³ воздуха на высоте z ; z_1 - максимальная высота. Часто применяют следующий метод расчета: вначале оценивают $T(z_1)$, а затем рассчитывают с определенным шагом значения $T(z)$, начиная от z_1 .

Предполагается, что длина волны лазерного импульса выбрана таким образом, что вдоль трассы лазерного луча превалирует поглощение молекулами одной компоненты. Оптическая толщина поглощения света равна

$$\tau(\lambda_a, T) = 2N_a(T) \sigma^A(\lambda_a) R = k(\lambda_a, T) R. \quad (5.15)$$

Здесь $N_a(T)$ - пространственно усредненная плотность молекул, определяющих поглощение света; $\sigma^A(\lambda_a)$ - соответствующее сечение; $k(\lambda_a, T)$ - соответствующая величина объемного коэффициента ослабления.

Сечение в максимуме полосы поглощения можно выразить через интегрированное по спектру сечение σ_a^λ и соответствующую ширину линии $\Delta\lambda_a$:

$$\sigma^\lambda(\lambda_a) = \frac{\sigma_a^\lambda}{\pi \Delta\lambda_a} \quad (5.16)$$

Температурную зависимость ширины спектральной линии можно описать соотношением

$$\Delta\lambda_a(T) = \Delta\lambda_a(T_0) \left\{ \frac{T_0}{T} \right\}^n, \quad (5.17)$$

где T_0 - некоторая реперная температура, а $n = 1/2$ при доплеровском уширении спектральной линии. Вообще же n зависит от перехода. В состоянии термодинамического равновесия плотности молекул температуры T и T_0 связаны соотношением Больцмана

$$N_a(T) = N_a(T_0) \frac{z(T)}{z(T_0)} \exp \left\{ \frac{\varepsilon_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}, \quad (5.18)$$

где $z(T)$ - функция распределения при температуре T ; ε_a - энергия низшего уровня перехода с поглощением.

Произведение $N_a(T)\sigma_a^\lambda$ часто называют силой линии поглощения. Если $N_a(T_0)$ является функцией расстояния, ее можно измерить. Температурная зависимость имеет вид

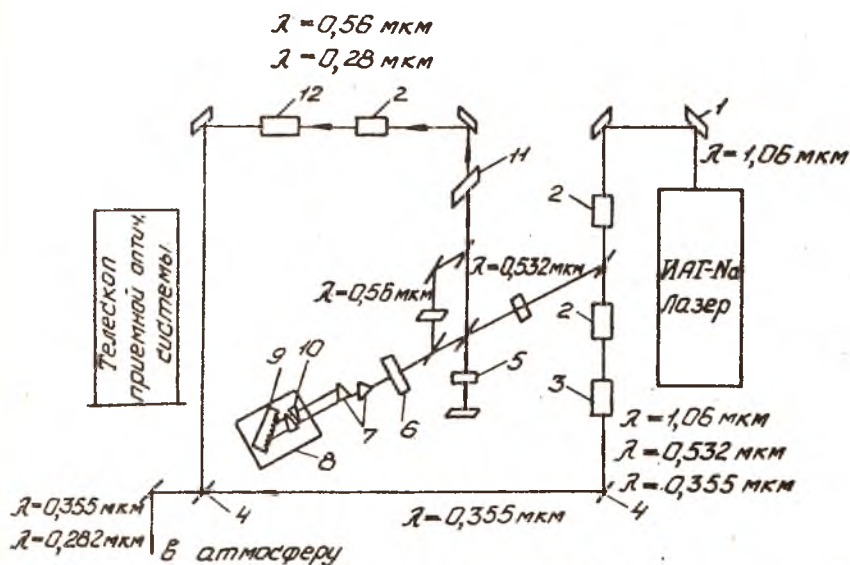
$$T \approx C \ln \left\{ \frac{\tau(\lambda_1, T)}{\tau(\lambda_2, T)} \right\} + D, \quad (5.19)$$

где

$$C = \frac{k T_0^2}{\Delta\varepsilon} \left\{ 1 + \frac{k T_0 \Delta n}{\Delta\varepsilon} \right\}^{-1} \quad \text{и} \quad D = C \ln \left\{ \frac{k(\lambda_2, T_0)}{k(\lambda_1, T_0)} \right\} + T_0,$$

при условии, что $T - T_0 \ll T_0$; $\tau(\lambda_i, T)$ - оптическая толщина поглощения света; k - коэффициент Больцмана; T_0 - температура вблизи исследуемой области (реперная температура); $\Delta\varepsilon$ - разность энергии поглощения; $\Delta n = n_1 - n_2$ - разность показателей, описывающих ширину температурной зависимости линии поглощения; $k(\lambda_i, T_0)$ - величина объемного коэффициента ослабления.

Константу D можно найти в справочных таблицах спектральных величин либо для ее определения следует выполнить ряд калибровочных температурных измерений. Оптическую толщину поглощения в каждом случае можно определить с помощью лидара дифференциального поглощения. При этом необходимо использовать третий лазерный импульс с длиной волны λ_3 , выбранной вблизи длин волн λ_1 и λ_2 и не пересекающейся ни с одной линией поглощения исследуемой компоненты атмосферы. Такие измерения



Р и с. 5.3. Оптическая схема лидара: I - полупрозрачное зеркало; 2 - удвоитель частоты; 3 - утроитель частоты; 4 - светоделитель; 5 - делительная пластина $\lambda/2$; 6 - генератор на красителе; 7 - призмный расширитель луча; 8 - термостат; 9 - дифракционная решетка; 10 - эталон Фабри-Перо; 11 - ячейка-усилитель на красителе; 12 - ячейка с радикалом

можно (осуществить, применяя либо топографические мишени в качестве независимых рассеивателей в обратном направлении, либо рассеиватели в виде аэрозолей, обеспечивающие релеевское или ми-рассеяние. В последнем случае можно получить оценки спектрального поглощения для отдельных участков атмосферы, в случае топографической мишени результаты измерений следует усреднить по всей длине траектории лазерного луча.

Общий вид и оптическая схема лазера показаны на рис. 5.3. Источником излучения служат ИАГ-Nd-лазер с энергией в импульсе 400 мДж. Приемная оптическая система включает телескоп Кассегрена с диаметром зеркала 30 см. Во время полета работой лидара управляет бортовая ЭВМ. В случае слабых сигналов используется система, работающая в режиме счета фотонов. При достаточно интенсивных сигналах в приемной оптической системе применяются фотоумножители в сочетании с быстродействующими аналого-цифровыми преобразователями.

При исследовании состояния атмосферы применяют деполаризацию излучения. Степень поляризации определяется показателем $\delta_p \approx \gamma_s^+ / \gamma_s^-$, где

знаки I и II обозначают перпендикулярную и параллельную составляющие плоскости поляризации падающего линейно поляризованного светового пучка. Если плоскополяризованное излучение рассеивается релеевскими частицами (радиус частицы меньше длины волны лазерного излучения) или мичастицами (диэлектрические сферы, радиус которых сравним или больше длины волны лазерного излучения), поляризация вторичного излучения одинакова с поляризацией падающего излучения и поэтому $\delta_p \approx 0$. В табл. 5.1 даны наблюдаемые в атмосфере δ_p . Значения степени деполяризации свыше 0,02 могут возникать при рассеянии на сферических частицах (таких, как водяные капли) в результате многократного рассеяния, а также на несферических рассеивающих частицах (например, кристаллах льда). Таким образом, исследования деполяризации рассеянного излучения могут стать методом получения информации о распределении частиц льда и капель воды в облаках и объяснить протекание механизма образования и динамику облаков.

Т а б л и ц а 5.1

Значения δ_p для некоторых молекул

Газ	Химический символ	δ_p
Аргон	Ar	0
Метан	CH ₄	0
Азот	N ₂	0,036
Кислород	O ₂	0,065
Хлор	Cl ₂	0,041
Воздух	—	0,042
Окись азота	NO ₂	0,027
Этан	C ₂ H ₆	0,005
Окись углерода	CO	0,013
Хлорид водорода	HCl	0,007
Бромид водорода	HBr	0,008
Двуокись углерода	CO ₂	0,097
Дисульфид углерода	CS ₂	0,115
Вода	H ₂ O	0,02
Сульфид водорода	H ₂ S	0,003
Двуокись серы	SO ₂	0,031

δ_p - сильно меняется от метеорологической ситуации;

δ_p - возрастает с увеличением глубины проникновения излучения в кучевые облака, расположенные на небольшой высоте;

$\delta_p \rightarrow 0,5$ - определяет присутствие кристалликов льда при продвижении в сторону верхней границы облаков;

$\delta_p \rightarrow 0$ - наблюдается в области нижней границы облаков с рассеиванием излучения на мелких сферических каплях воды, концентрация которых в атмосфере невелика;

$\delta_p \rightarrow 0,3$ - в случае перистых облаков независимо от величины проникновения излучения вглубь облаков, так как они имеют значительную концентрацию льда в объеме облаков.

Обычно выражение для степени деполаризации имеет вид

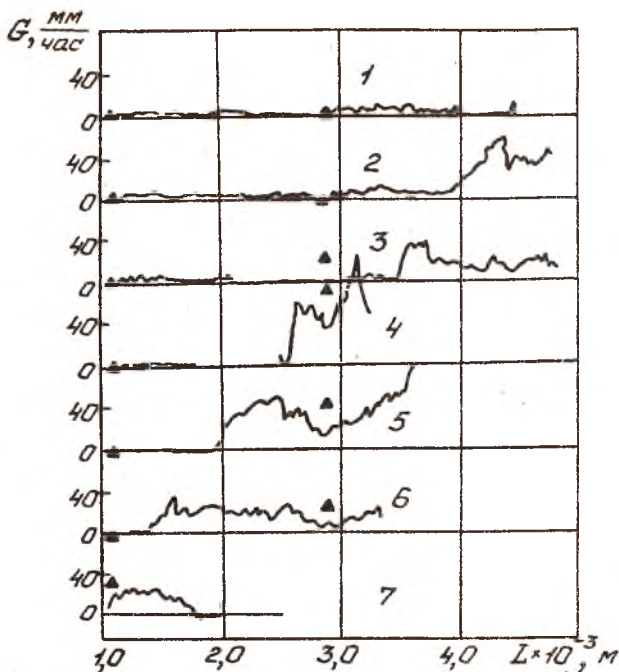
$$\delta_p = \frac{(P_1^s)_A + (P_1^s)_W + (P_1^s)_C + (P_1^s)_M}{(P_1^s)_A + (P_1^s)_W + (P_1^s)_C + (P_1^s)_M} \quad (5.20)$$

Здесь (P_1^s) и (P_1^s) - компоненты мощности рассеянного в обратном направлении лазерного излучения, которые соответственно поляризованы перпендикулярно и параллельно плоскости поляризации падающего начального излучения; буквенные индексы указывают на атмосферные компоненты, ответственные за рассеивание: А - аэрозоли; W - водяные капли; C - кристаллы льда и M - молекулы. Лазерные исследования деполаризации излучения, отраженного от облаков, выявили величины δ_p , которые изменяются от величины, близкой к нулю, до 0,5. Большие значения степени деполаризации обычно связывают с влиянием частиц пыли и льда.

Целью лидарных исследований деполаризации излучения атмосферой является следующее: определить, где формируются и растут кристаллы льда; установить различие между ледяными и водяными частицами в атмосфере. Измерения показали, что объемные коэффициенты рассеяния излучения в обратном направлении изменяются в диапазоне от $2,4 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ (для оптически тонкого слоя кристаллов льда) до $\sim 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ (для типичного слоя из водяных капель).

Если при оценке скорости выпадения дождевых осадков использовать радиолокатор, то точность коррекции между коэффициентом ослабления микроволн и скоростью выпадения дождевых осадков ограничена длиной волны радиолокатора. Лидар может быть использован для довольно точного определения отношения между оптическим коэффициентом ослабления K_E (км^{-1}) и скоростью выпадения дождевых осадков R_R ($\text{мм} \cdot \text{ч}^{-1}$):

$$K_E = 0,16 R_R^{0,74} \quad (5.21)$$

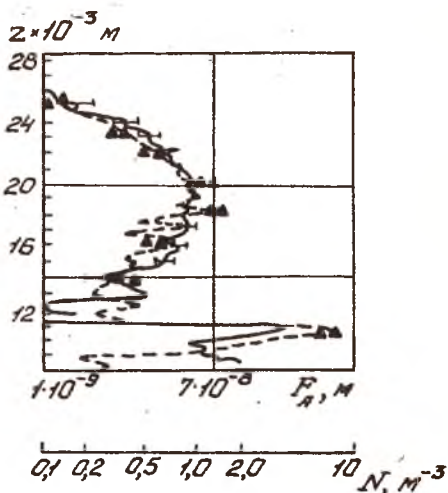


Р и с. 5.4. Зависимость скорости выпадения дождевых осадков от расстояний для разных моментов времени, демонстрирующие передвижение переднего фронта грозового облака (рассчитаны по данным лидарных измерений коэффициента ослабления K_e): 1 - 14 ч 51 мин 30 с; 2 - 14 ч 52 мин 00 с; 3 - 14 ч 52 мин 30 с; 4 - 14 ч 53 мин 00 с; 5 - 14 ч 53 мин 30 с; 6 - 14 ч 54 мин 00 с; 7 - 14 ч 54 мин 30 с

С помощью этого соотношения удается составить карту передвижения переднего фронта грозового облака и сравнить лидарные наблюдения с результатами измерений, выполненных с помощью расставленных вдоль траектории лазерного луча дождемеров. На рис. 5.4 приведен пример последовательных зависимостей скорости выпадения дождевых осадков от расстояния.

Наблюдение пылевых частиц в стратосфере проводится сравнением объемного рассеяния излучения на аэрозолях в обратном направлении также из лидарных экспериментов (рис. 5.5). Лучше всего этот метод согласуется с показаниями пылевого зонда, если значению концентрации аэрозолей (измеренной счетчиком, установленным на аэростате) 1 см^{-3} пос-

тавить в соответствие значение объемного коэффициента рассеяния излучения в обратном направлении на аэрозолях (полученное из лидарного эксперимента), равное $8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. Результаты обоих измерений указывают на присутствие видимых снизу перистых облаков на высоте 9-11 км, чистой (относительно свободной от аэрозолей) области на высоте ~ 12 км и довольно обширного пылевого слоя, расположенного на высоте от 15 до 24 км.



Р и с. 5.5. Сравнение высотных профилей функции объемного рассеяния на аэрозолях, полученной из лидарных измерений и распределения концентраций аэрозолей, измеренного с помощью установленного на аэростате пылевого зонда

концентраций аэрозолей позволяет обнаружить быстрое проникновение пыли в стратосферу. Обычно лидарная установка имеет следующие основные компоненты: два лазера, работающие в режиме модуляции добротности и имеющие на выходе мощность 1-2 Дж (рабочие длины волн $\lambda_1 = 0,094$ мкм; $\lambda_2 = 0,372$ мкм; $\lambda_3 = 0,530$ мкм; $\lambda_4 = 1,06$ мкм); телескоп Кассегрена ($f/10$) с диаметром зеркала 1,22 м; коллиматор; фильтр, светоделитель, ФЭУ в количестве четырех единиц; высокоскоростную систему регистрации данных.

При наблюдении за атмосферными загрязнениями с помощью CO_2 - или Y_2 -лазера и отражателя на трассе длиной 1 км можно обнаружить такие загрязняющие вещества, как CO , NO , SO_2 и O_3 вплоть до концентраций $\sim 5 \cdot 10^{-6}$. Чтобы избежать абсолютной калибровки системы, был принят метод дифференциального поглощения. В этом случае величина среднего уровня загрязнения, которое может быть обнаружено в слое ΔR , определяется выражением

$$\langle C \rangle = \frac{1}{2k_A(\lambda_0)\Delta R} \ln \left\{ \frac{E_s(\lambda_\omega)}{E_s(\lambda_0)} \right\}. \quad (5.22)$$

Здесь $\langle C \rangle$ - средняя концентрация загрязняющего вещества; $k_A(\lambda_0)$ - соот-

ветствующий коэффициент поглощения при нормальных условиях; $E_s(\lambda_a)$ — принимаемая рассеянная лазерная энергия с длиной волны λ_a , где a соответствует ω для крыла линии и 0 для центра линии.

Уравнение (5.22) базируется на предположении, что $\sigma^A(\lambda_0) \gg \sigma^A(\lambda_\omega)$, а $\bar{k}(\lambda_0) \approx \bar{k}(\lambda_\omega)$.

Обозначим через y относительное изменение рассеянной лазерной энергии, регистрируемой для центральной длины волны линии и длины волны на крыле линии:

$$y = \frac{E_s(\lambda_\omega) - E_s(\lambda_0)}{E_s(\lambda_\omega)} \quad (5.23)$$

Тогда можно записать выражение

$$\langle C \rangle_{\min} = \frac{1}{2 \bar{k}_A(\lambda_0) \Delta R} \ln \left\{ \frac{1}{1 - y_{\min}} \right\} \quad (5.24)$$

Предел для минимальной плотности атомов (или молекул) вещества, которую можно обнаружить с помощью лидара, основанного на методе дифференциального поглощения и рассеивания в единицах концентрации, имеет вид

$$C_{\min} \approx \frac{1}{4 \bar{k}_A(\lambda_0) \Delta R} \quad (5.25)$$

Следовательно, относительное улучшение детектируемого крыла, достигаемое в результате использования уголкового отражателя, можно определить из отношения уравнений (5.25) и (5.24), предполагая, что ΔR одинаково в обоих случаях:

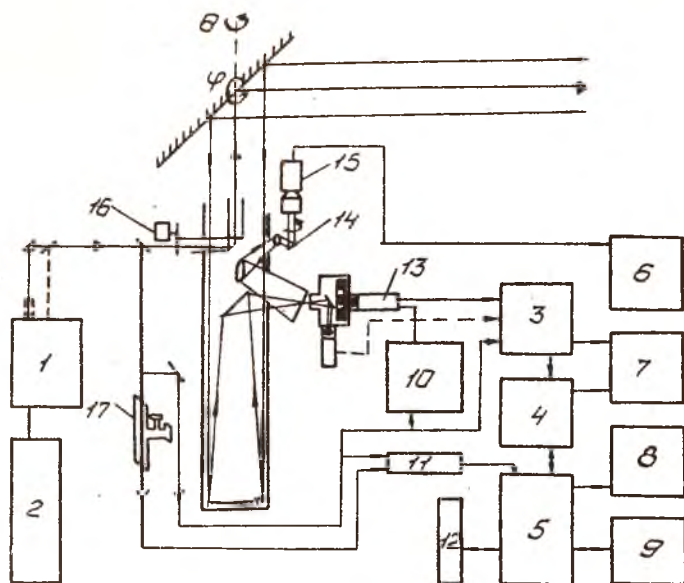
$$\frac{C_{\min}}{\langle C \rangle_{\min}} = \frac{1}{2 \ln \left\{ 1 / (1 - y_{\min}) \right\}} \quad (5.26)$$

Для $y_{\min} \approx 0,05$, соответствующего 5% относительному изменению энергии, регистрируемой лидаром на длинах волн λ_0 и λ_ω , имеем

$$\frac{C_{\min}}{\langle C \rangle_{\min}} = 9,75 \quad (5.27)$$

Как можно заметить, использование уголкового отражателя при дифференциальном методе поглощения может улучшить почти на порядок предел обнаружения.

Обычно лидарная система, используемая для мониторинга атмосферы (рис. 5.3), включает ИАГ-неодимовый лазер, который может работать на первой, второй или третьей гармониках с выходной энергией 250, 100 и 50 мДж соответственно. Генерируемые импульсы имеют длительность 7 нс и частоту следования 10 импульс/с. Коротковолновые импульсы используются для накачки перестраиваемого лазера на краситель, который состоит из

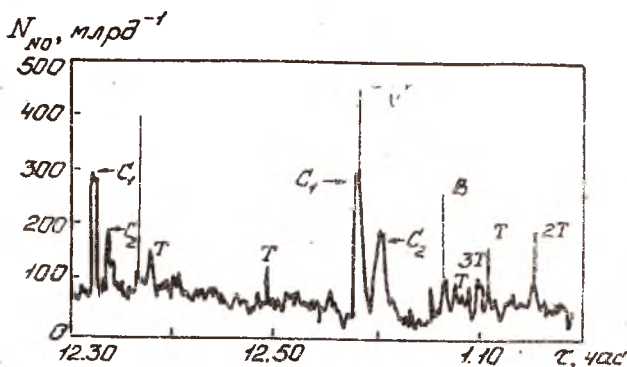


Р и с. 5.6. Оптическая схема лидара по определению загрязнений атмосферы: 1 - лазер на красителе ($\lambda_1 = 0,532 \cdot 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 0,355 \cdot 10^{-6}$ м); 2 - ИАГ- Nd -лазер; 3 - цифровой преобразователь; 4 - многоканальная память; 5 - миниЭВМ; 6 - дисплей; 7 - осциллограф; 8 - записывающее устройство; 9 - видеотерминал; 10 - управление ФЭУ; 11 - АЦП; 12 - интерфейс для управления лазером и ориентацией лидара; 13 - ФЭУ; 14 - призма Дове, $6/2$; 15 - видеоскамера; 16 - модулятор; 17 - газовая ячейка поглощения

перестраиваемого с помощью дифракционной решетки генератора и двух усилителей. Для измерения концентрации молекул NO_2 выбраны длины волн 448,1 и 446,5 нм, а для измерения концентрации молекул SO_2 частоту излучения лазера на красителе удваивают, чтобы получить импульсы с длинами волн 300,05 и 299,30 нм. Приемная оптическая система включает телескоп Ньютона с диаметром зеркала 30 см, ряд узкополосных фильтров и фотоумножителей. Первые 20 мкс (соответствующие излучению, рассеянному в обратном направлении с расстояния до 3 км) регистрация ведется с помощью вспомогательного цифрового преобразователя.

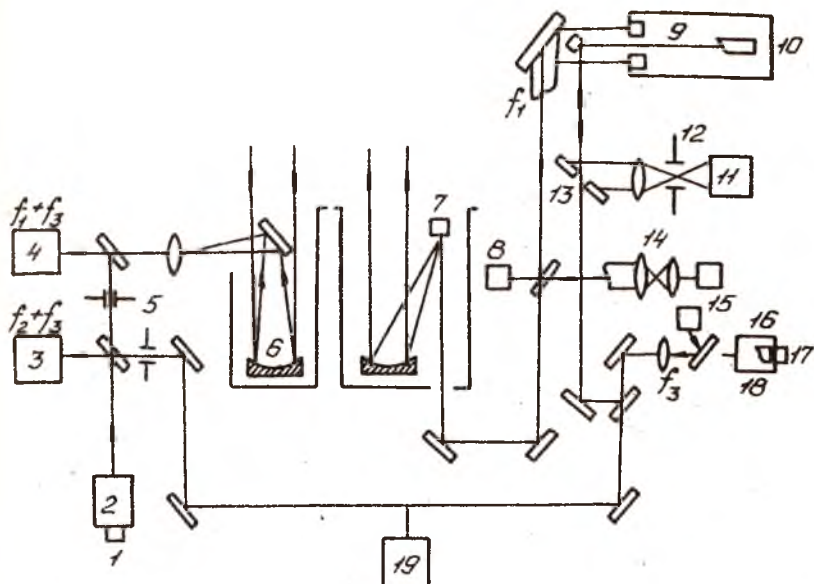
На рис. 5.7 показан мониторинг содержания молекул NO при инспектировании автобусной остановки городского транспорта.

Структурная схема лидара, используемого для зондирования атмосферы до высоты 10 км, приведена на рис. 5.8. Передатчиком в лидаре служит



Ри с. 5.7. Мониторинг содержания молекул NO в городском воздухе с применением резонансного поглощения (вторая производная); постоянная времени равна 1 с, сильное изменение сигнала связано с прохождением автобусов и грузовиков: C_1 - калибровка ($240 \cdot 10^{-9}$); C_2 - калибровка ($120 \cdot 10^{-9}$); B - автобус, T - грузовик

CO_2 -лазер (длина волны излучения $3,25$ и $10,6$ мкм). Оптический нестабильный резонатор импульсного лазера 9 состоит из дифракционной решетки и германиевого ответвителя, выполненного в виде выпуклого мениска. Центральная часть мениска (квадрат со стороной 15 мм) оставлена прозрачной, остальная - покрыта изнутри и снаружи специальным отражающим составом. Ответвитель крепится на пьезокристалле для настройки длины резонатора. Излучение лазера 18 (лазер с волноводом, работающий в режиме незатухающих колебаний) через небольшое отверстие зеркала 13 поступает через центральную часть выходного зеркала лазера 9 на дифракционную решетку для синхронизации лазера внешним сигналом. Кроме того, часть излучения от зеркала 13 через прерыватель 12 падает на фотодетектор ($HgCdTe$), который воспроизводит положение резонансов лазера 9 при сканировании частоты лазера 18 . В некоторых случаях в контур лазера 18 вводится оптико-акустический детектор 19 для стабилизации частоты лазера. Ячейка детектора 19 заполнена углекислым газом и сигнал лазера с частотной модуляцией настраивается по контуру линии поглощения. Использование сигнала ошибки позволяет удерживать частоту лазера 18 на заданной частоте линии поглощения CO_2 . Импульс лазера 9 направляется далее на передающую оптическую антенну 7 . Принятый антенной 6 сигнал обратного рассеяния поступает на охлаждаемый фотосмеситель ($HgCdTe$). Местный гетеродин 2 стабилизирован на смещенной относительно лазера 18



частоте 30 МГц. Приемник, который усиливает и фильтрует выходной сигнал после фотосмещения, также центрирован на частоте 30 МГц.

Передатчик

Приемник

5.2. Экологический контроль

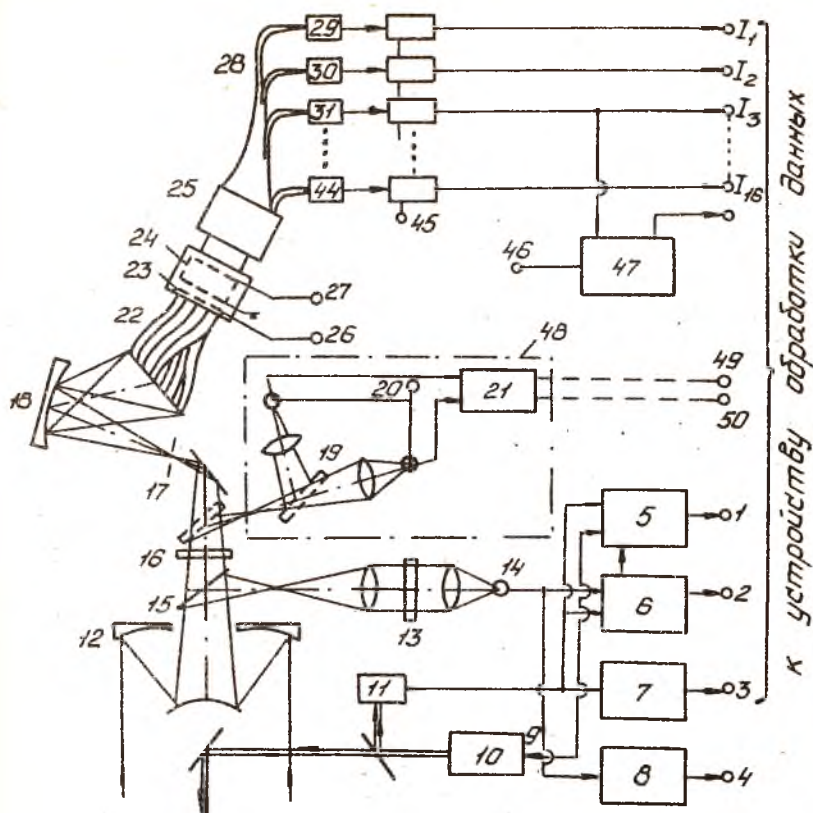
Для обнаружения нефтяных загрязнений различных водоемов наиболее широко используются многоканальные фотокамеры, сканирующие микроволновые и ИК-радиометры. Однако эти методы не позволяют определить такие параметры нефтяной пленки, как ее толщину либо сорт нефти. Для этой цели информативным является флуоресцентный метод. Исследование проводится с высоты, на которой наблюдается достаточно интенсивный отраженный сигнал. Дальнейшая работа лидара, имеющего в приемной системе канал для исследования флуоресценции, позволяет охарактеризовать тип нефтепродукта и толщину пленки (рис. 5.9).

Основные параметры лидара:

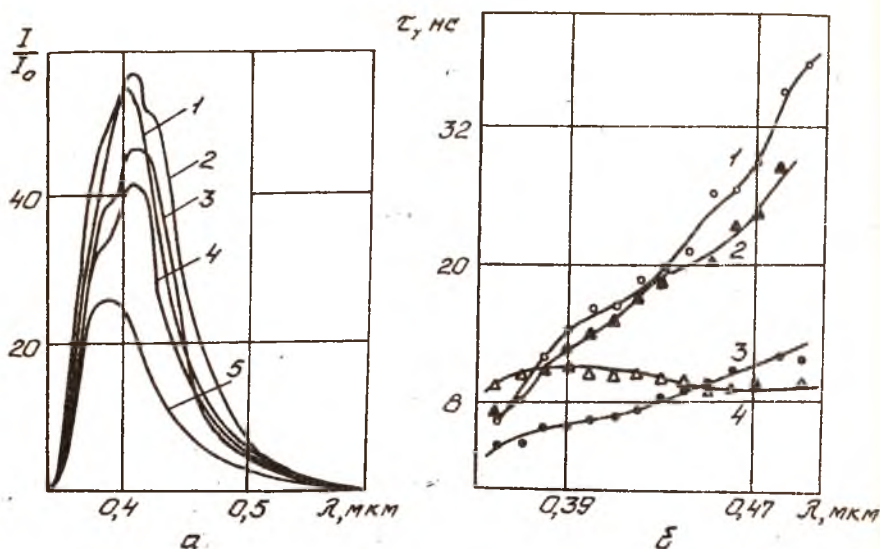
Энергия импульса на длине волны 532 нм	5 мДж
Длительность импульса	15 нс
Частота повторения импульсов	до 20 Гц
Диаметр луча на выходе передающей антенны	0,09 м
Диаметр приемной оптической антенны	0,15 м
Угол поля зрения канала поляризации	1,3...21 мрад
Угол поля зрения канала флуоресценции	5 мрад
Временное разрешение ФСУ	22 нс
Центр полосы пропускания канала флуоресценции .	680 нм
Максимальный угол сканирования от надира	15°
Скорость сканирования	1 оборот с ⁻¹

У флуоресцентных лидаров используется лазер на азоте мощностью 10^5 Вт ($\lambda = 337,1$ нм, $\tau = 10$ нс, $f_A = 500$ Гц). В состав приемной системы входила оптическая антенна с диаметром 0,3 м, диссектор и оптический многоканальный анализатор для записи и обработки спектра флуоресценции. Общее число каналов - 35, два из них работают в режиме обнаружения аномалии во флуоресцентном сигнале. После обнаружения такой аномалии система автоматически переключается на работу в режиме классификации, когда функционируют все 35 каналов. Измерения показали некоторое отличие спектров флуоресценции пленок различных нефтяных продуктов, в частности, изменяется максимум спектра флуоресценции: нефть месторождений Вочекера - 519 нм, остаточные нефтепродукты - 497 нм, нигерийская нефть - от 475 до 494 нм, дизельное топливо - от 444 до 456 нм.

С целью более полного изучения возможности идентификации нефтепродуктов по СВЗФ были получены и сравнены для нескольких очищенных нефтепродуктов обычные спектры флуоресценции и спектры времени затуха-



Р и с. 5.9. Схема самолетного лазерного флуориметра: 1 - вывод сигнала синхронизации; 2 - вывод сигнала высоты; 3 - вывод сигнала мощности; 4 - вывод обратного сигнала; 5 - блок стробирования /синхронизации; 6 - лидарный альтиметр; 7 - измеритель мощности лазера; 8 - амплитуда обратного сигнала; 9 - триггер; 10 - лазер на азоте; 11 - фотодиод; 12 - телескоп Кассегрена; 13 - фильтр линии 337,1 нм; 14 - вывод лазерного рассеяния в обратном направлении; 15 - светоделитель 10/90; 16 - фильтр плакирующий V2; 17 - диафрагма; 18 - вогнутая голографическая решетка; 19 - дихроичный кристалл; 20 - строб 2; 21 - измеритель времени затухания; 22 - световоды; 23 - фотокатод; 24 - многоканальная пластина; 25 - фокусирующее устройство; 26 - строб 1; 27 - блок усиления; 28 - выход световодной световолоконной оптики; 29-44 - 16 фотодиодов; 45 - блок попеременного измерения сигнал/фон и зачитания фона; 46 - усиление; 47 - блок АРУ; 48 - дополнительный блок; 49 - сигнал времени затухания синего света; 50 - сигнал времени затухания красного света



Р и с. 5.10. Флуоресценция некоторых очищенных нефтепродуктов: а - спектры флуоресценции: 1 - бензин высшего сорта; 2 - солярное масло; 3 - дизельное топливо; 4 - бензин; 5 - керосин; б - соответствующие времена затухания: 1 - солярное масло; 2 - дизельное топливо; 3 - бензин; 4 - керосин

хания флуоресценции (СВЗФ) (рис. 5.10). Оказалось, что время затухания растет с увеличением длины волны. Исключение составил СВЗФ топлива для бытовых целей. Следует подчеркнуть, что, используя СВЗФ, удавалось классифицировать пленки бензинов с разным октановым числом и масляные пленки от различных видов рыб.

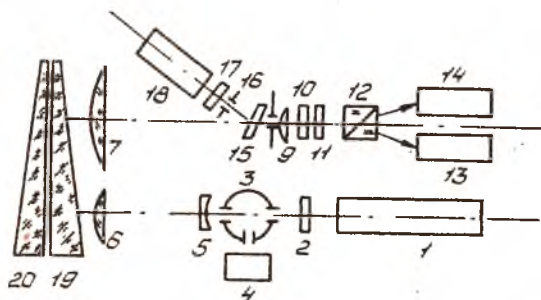
Возможности исследований загрязненности водной поверхности расширяются, если в лидаре предусмотрены поляризационные каналы.

Оптическая схема и основные параметры такого лидара приведены на рис. 5.11 и в этом разделе. Излучатель - лазер на АНГ в режиме второй гармоники. Введение в передающий канал четвертьволновой фазовой пластинки линейно поляризованное излучение лазера может быть преобразовано в излучение с круговой поляризацией.

Опорным сигналом является излучение лазера, отраженное входной линзой коллиматора 5, которая установлена в плоскости выходного окна светорассеивающей полости 3. Через второе выходное окно рассеянное в полости излучение поступает на фотоэлемент 4. Такое решение узла светоделиителя позволяет формировать опорный сигнал, пропорциональный из-

лученной энергии, независимо от состояния поляризации светового потока.

Приемная система лидара включает поляризационный канал для приема эхо-сигнала на длине волны излучателя и флуоресцентный канал. Поле зрения поляризационного канала формируется диафрагмой 8, за которой последовательно установлены линза Фабри 9, фазовая пластина 10 и интерференционный фильтр 11. Анализатором в поляризационном канале является призма Волластона 12.



Р и с. 5.11. Оптическая схема лидара: 1 - лазер; 2, 10 - фазовые пластины; 3 - светорассеивающая полость; 4 - фотоселемент; 5, 6 - линзы коллиматора; 7 - объектив приемника; 8, 16 - полевые диафрагмы; 9 - линза Фабри; 11 - интерференционный фильтр; 12 - призма Волластона; 13, 14, 18 - фотоумножители; 15 - интерференционное зеркало; 17 - полосовой фильтр; 19, 20 - стеклянные клинья.

Оба поляризационных компонента принятого сигнала преобразуются фотоумножителями 13 и 14 в электрические сигналы. Фотоумножители и призма Волластона, объединенные в единый блок, могут быть установлены под необходимым углом относительно плоскости поляризации излучения лазера. Фазосдвигающая пластина может быть выведена из светового потока; диафрагма поля зрения - сменная; фотоумножители 13 и 14 могут работать в двух режимах: первый - типичный линейный, с постоянно включенными ФЭУ, второй - с запирающим ФЭУ по управляющей сетке и первым диодом ФЭУ отпирается за время примерно 50 нс после поступления управляющего импульса. Такой режим позволяет в некоторой мере снизить уровень импульсов последодействия, возникающих на выходе фотоумножителя после воздействия на него сигнала от поверхности воды, и повысить тем самым достоверность приема сигналов из-под воды.

Для приема флуоресценции используются общий объектив 7, интерференционное зеркало 15, диафрагма поля зрения 16, оптический фильтр 17 и

фотоумножитель И8. Интерференционное зеркало отражает излучение на $\lambda = 680$ нм (с учетом угла наклона зеркала к оптической оси). Оно незначительно ослабляет излучение на длине волны передатчика, поэтому возможна одновременная работа поляризационного и флуоресцентного каналов.

Вместо зеркала И5 можно оперативно установить плоскопараллельное стекло, тогда на ФЭУ И8 будет поступать небольшой оптический сигнал на основной длине волны. Сигнал от ФЭУ используется для управления включения блоков ФЭУ И3 и И4.

На выходе приемопередатчика установлено сканирующее устройство, выполненное на основе двух стеклянных клиньев И9 и И20, вращающихся синфазно, что обеспечивает сканирование диаграммы излучения лидара по образующей конуса. Такая схема сканера практически не искажает состояние поляризации излучения. Взаимным поворотом клиньев относительно друг друга регулируется угол сканирования.

Основные параметры лидара:

Энергия импульса на длине волны 532 нм	5 мДж
Длительность импульса	15 нс
Частота повторения импульсов	до 20 Гц
Диаметр луча на выходе передающей антенны	0,09 м
Диаметр приемной оптической антенны	0,15 м
Угол поля зрения канала поляризации	1,3...21 мрад
Угол поля зрения канала флуоресценции	5 мрад

Флуоресцентные лидары позволяют получать оперативную информацию о тонкой структуре флуоресцентных полей органических соединений. Особенностью флуоресценции сложных органических соединений и комплексов является насыщение флуоресценции - нелинейность зависимости числа фотонов флуоресценции $N_{\text{фл}}$ от плотности потока фотонов возбуждающего излучения F_b . Эксперименты показывают, что насыщение флуоресценции фитопланктона наступает значительно раньше (уже при $F_b \approx 10^{22} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$), чем, например, насыщение растворов красителей. По кривой насыщения можно определить два параметра:

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_0^{-1} &= \lim_{F_b \rightarrow 0} \tilde{\Phi}^{-1}(F_b), \\ \mu^{-1} &= \lim_{F_b \rightarrow 0} \frac{\partial \tilde{\Phi}^{-1}}{\partial F_b}, \end{aligned} \quad (5.28)$$

где $\tilde{\Phi}(F) = N_{\text{фл}} / N_{\text{скр}}$, $N_{\text{скр}}$ - число квантов комбинационного рассеяния воды.

Параметр $\tilde{\Phi}_0$ используется для определения концентрации флуоресцирующих частиц, μ - для их идентификации. В некоторых случаях изме-

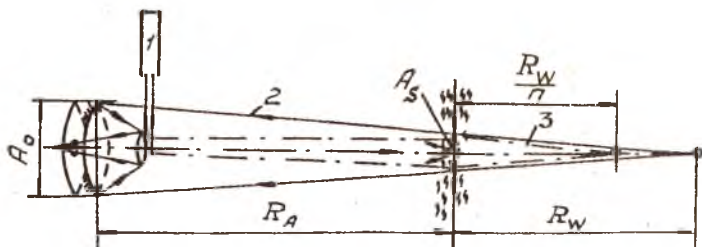
рения величин Φ_0 и μ позволяет определить сечения флуоресценции и поглощения, время жизни возбужденного синглетного состояния, квантовые выходы флуоресценции и конверсии молекул в триплетное состояние.

Обычно флуоресценция фитопланктона возбуждается излучением второй гармоники (АМГ - Nd^{2+})-лазера. Основные параметры первого передатчика: $\lambda = 502$ нм, $E_0 = 10$ мДж, $\tau = 10$ нс, $f_A = 10$ Гц. Второй передатчик возбуждает флуоресценцию растворенного органического вещества. Применен азотный лазер ЛГИ-505 с основными параметрами: $\lambda = 337,1$ нм, $E_0 = 0,2$ мДж, $\tau = 10$ нс, $f_A = 1$ кГц. Оптическая система состоит из блока призм, обеспечивающих квазисоосность и юстировку направления лазерных лучей в двух плоскостях относительно неподвижной оптической оси приемника, поворотного зеркала и приемного объектива, собирающего излучение эхо-сигнала на входной щели спектрального прибора - оптического многоканального анализатора (ОМА). Специальные фильтры применяются для подавления излучения на частоте лазера. Стробирование импульсов ОМА, длительность которых изменяется от 0,04 до 1,0 мкс, позволяет регистрировать отраженный сигнал в условиях сильного фоновго излучения.

Для исследования перемещения водных масс и скоростей перемешивания в воде природных веществ можно использовать различные красители: акридиновый красный, родамин В, а для контроля более глубоких водных слоев - 3,6-дихлорфлуоресцин, максимум поглощения которого находится на длине волны 432 нм.

Различие во флуоресцентной чувствительности красителей сильно зависит от параметров водной среды: температуры, солености и рН. Так, измерение с погрешностью 2% отношения флуоресцентных эхо-сигналов от родамина В и эсина Y позволяет определить температуру воды с погрешностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Достоинством метода несомненно является взаимное уничтожение в расчетной формуле аппаратурных коэффициентов, недостатком - необходимость распыления красителей над водной поверхностью. Минимально обнаруживаемая концентрация красителя ничтожна: используя лидар с неозимовым лазером ($\lambda = 540$ нм, $P_0 = 3$ кВт) удалось обнаружить загрязненность красителям родамин - Г с концентрацией примерно $4 \cdot 10^{-9}$. В чистой воде с высоты 150 м возможно обнаружить примеси с минимальной концентрацией 10^{-10} .

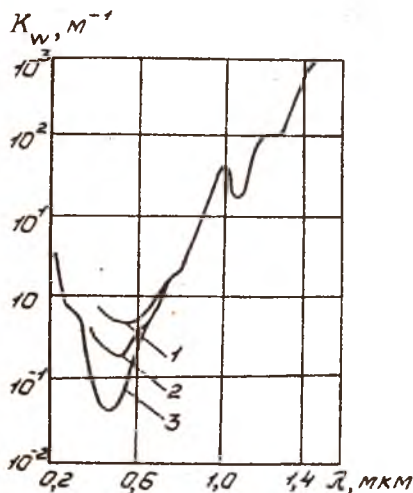
Показана возможность применения лазера, установленного на борту летательного аппарата и работающего в сине-зеленом участке спектра электромагнитного излучения, для подводной топографической съемки при использовании временного интервала между принятыми обработанными сигналами, отраженными от поверхности воды и поверхности подводного объекта, в качестве меры толщины слоя воды (рис. 5.12). С помощью импульсного



Р и с. 5.12. Схема определения глубины водного бассейна: 1 - лазер; 2 - отраженный поток; 3 - кажущаяся глубина

неонового лазера (60 мкДж) в ночное время с высоты 150 м удается зарегистрировать глубину ~ 8 м. Длительность импульса лазера составляет 3нс, что позволяет достигнуть пространственного разрешения 0,34 м. Рассеяние и расширение пучка ограничивает разрешение по глубине.

Прибрежные воды часто богаты морскими микроорганизмами. В таких районах благодаря фитопланктону следует ожидать не только увеличения рассеяния, но и поглощения. Поэтому зависимость от длины волны коэффициента ослабления $k_w(\lambda)$ для вод различного типа, как следует из рис. 5.13, имеет разный вид. Так называемое окно прозрачности моря на-



Р и с. 5.13. Коэффициент ослабления лазерного излучения: 1 - вода залива; 2 - прибрежная вода; 3 - дистиллированная вода

ходится в сине-зеленой области спектра. Способность батометрического лидара измерять глубину зависит от отношения коэффициента поглощения к коэффициенту рассеяния для воды (k_w^a / k_w^s), а также от отражательной способности дна и коэффициента полного ослабления ($k_w = k_w^a + k_w^s$).

Часть интенсивности Ω излучения, исходящая с глубины R_w и принимаемая лидаром, определяется выражением

$$\frac{\Omega_s}{4\pi} = \frac{A_s}{4\pi R_w^2}, \quad (5.29)$$

где A_s - площадь поверхности внутри поля зрения оптической системы приемника. Однако в соответствии с геометрическим построением

$$\frac{A_s}{(R_w/n)^2} = \frac{A_0}{(R_A + R_w/n)^2} \quad (5.30)$$

Здесь n - показатель преломления воды, A_0 - эффективная площадь собирающей оптики и R_A - высота нахождения лидарного устройства над поверхностью воды. Поэтому

$$\frac{\Omega_s}{4\pi} = \frac{A_0}{n^2(R_A + R_w/n)^2 4\pi} \quad (5.31)$$

6. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БАЗА ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

6.1. Узлы крепления оптических деталей

При выборе типа крепления и разработке конструкции узла необходимо обеспечить выполнение следующих общих требований:

крепление должно быть надежным, т.е. во время работы прибора положение оптической детали относительно оправы не должно изменяться;

замыкающие усилия, необходимые для осуществления сопряжения между оптической деталью и оправой, не должны вызывать опасных деформаций и напряжений;

базовая основа узла, ориентирующие и крепежные детали или их элементы должны быть расположены вне габаритов светового пучка. Поверхности этих элементов, находящиеся вблизи пучка, не должны быть причиной появления рассеянного света и бликов в системе;

крепления должны быть технологичны как в отношении изготовления деталей, так и в отношении сборки.

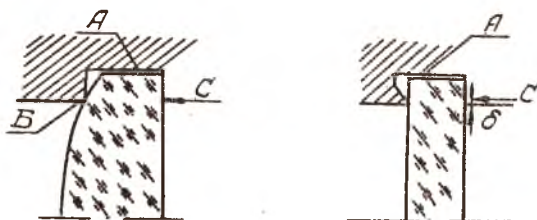
Типичными видами соединений являются соединения оптических деталей с механическими, к функционированию которых предъявляются очень жесткие требования по точности, надежности, стабильности и характеристикам силового режима. Поэтому при разработке конструкции крепления оптических деталей следует руководствоваться перечисленными ниже основными принципами конструирования:

соединение оптической детали с элементами узла, обеспечивающими базирование и ориентирование, должно быть статически определенным;

ограничение смещений оптической детали в узле должно осуществляться преимущественно поверхностями, расположенными перпендикулярно к направлению этих смещений;

ограничение поворотов (перекосов) оптической детали должно осуществляться элементами крепления, расположенными на наибольшем удалении в пределах габаритов оптической детали.

Крепление круглых оптических деталей. Край оптической детали обра- зуется в виде сочетания поверхностей вращения: цилиндрической (центри- гирующей) и поверхностей фасок (вспомогательных). К таким деталям отно- сятся: линзы, светофильтры, сетки, защитные стекла, иногда круглыми бы- вают и зеркала. При любом методе крепления круглых оптических деталей цилиндрическая поверхность детали должна находиться в сопряжении с та- кой же внутренней поверхностью оправы (рис. 6.1), табл. 6.1 - 6.3.



Р и с. 6.1. Крепление круглых оптических деталей

Т а б л и ц а 6.1

Соединение круглых оптических деталей с оправами.

Допуски и посадки

Точность центриро- вания		Допуски			Примеры применения
		на диаметры оптических деталей		на внутрен- ний диаметр оправы	
Характери- стика	Допуск на децентри- ровку, мм	центриру- ющих	нецентри- рующих		
Повы- шенная	до 0,02	$h8(C_3)$ $\frac{d6(A)}{f7(X)}$	$d9(Ш_3)$ $d11(X_4)$	$H9(A_3)$ $H7(A)$	Линзы микро- объективов
Сред- няя	Св. 0,02	$h8(C_3)$	$d9(Ш_3)$	$H9$	Линзы окуля- ров Оптика теле- скопических приборов, сетки, шкалы
	до 0,05	$\frac{e9}{f9,e8}(X_3)$	$c11(A_4)$	$\frac{H8}{H9}(A_3)$	
Пони- женная	Св. 0,05	$d11(X_4)$	-	$H11(A_4)$	Конденсорные линзы, свето- фильтры, плос- кие зеркала, защитные стекла

Т а б л и ц а 3.2

Допуски на посадочные диаметры деталей, покрываемых эмалью

Посадочный диаметр детали, мм	Рекомендуемые поля допусков	
	до покрытия	после покрытия
Св. 3 до 6	(Λ)	g6, h8 (Δ, C ₃)
Св. 6 до 180	(X)	
Св. 3 до 6	(Ш)	f7 (X)
Св. 6 до 180	(Λ)	

Т а б л и ц а 3.3

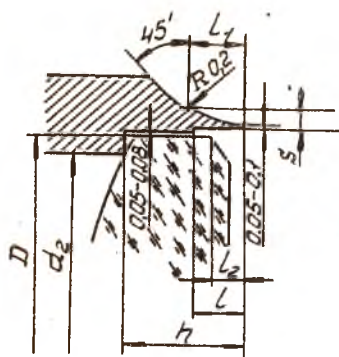
Толщина слоя эмали в зависимости от диаметра детали

Посадочный диаметр детали, мм	Толщина слоя эмали, мм
Св. 3 до 10	0,008 - 0,012
>> 10 >> 30	0,010 - 0,016
>> 30 >> 80	0,012 - 0,020
>> 80 >> 180	0,016 - 0,025

Оправы для крепления круглой оптики обычно изготавливаются из сталей, алюминиевых сплавов и латуни. Коэффициенты линейного расширения этих материалов и оптического стекла имеют существенное отличие (в 2-3 раза). Поэтому для больших перепадов температуры величина посадочного зазора должна быть проверена на отсутствие натяга в посадке оптической детали для нижнего предела температурного интервала и, в случае необходимости, зазор должен быть увеличен. Однако при нагревании до верхнего предела температурного интервала зазор может достичь величины, недопустимой с точки зрения точности центрирования.

Крепление завальцовкой. При этом способе оптическая деталь удерживается в оправе тонкой ее кромкой, которая приобретает конечную форму в результате пластического деформирования металла во время завальцовки. Такое крепление является неразъемным. Крепежная кромка оправы после завальцовки находится в сопряжении с конусной поверхностью специальной фаски, сошлифованной на детали под углом 45°, при этом она не должна выступать за пределы фаски (рис. 6.2) (табл. 6.4).

Крепление завальцовкой применяется для оптических деталей диаметром до 80 мм и для склеенных блоков до 50 мм. Такое ограничение объясняется тем, что крепежная кромка предельной толщины в 0,5 мм не в состоя-



Р и с. 6.2. Крепление
оптических деталей за-
вальцовкой

ции, причем завальцовка осуществлена со стороны буртика оправы;

системы трех несклеенных линз и двух промежуточных колец, закреп-
ленных в общей оправе;

плоскопараллельной пластинки с приклеенной к ней линзой в оправе,
базовыми поверхностями которой являются наружная цилиндрическая и две
плоскости торцов.

нии обеспечить необходимую надежность
крепления для тяжелых деталей, в осо-
бенности при наличии перегрузок (виб-
рация, тряска, удары).

Материалы оправ при этом методе
крепления должны обладать высокой пла-
стичностью. Наилучшим является латунь
ЛС59-I; применяются также: латунь Д62,
дюралюминий марок Д1, Д6, Д16, низко-
углеродистые конструкционные стали
(сталь 20, сталь 30).

Типовые примеры крепления заваль-
цовкой:

отрицательной линзы малого диа-
метра, закрепленной в оправе, имеющей
базовые поверхности в виде цилиндри-
ческой наружной поверхности и двух
параллельных плоских торцов, перпен-
дикулярных оси линзы;

линзового склеенного блока (на-
пример, объектива телескопической сис-
темы), закрепленного в оправе, име-
ющей крепежную резьбу и опорный буртик;

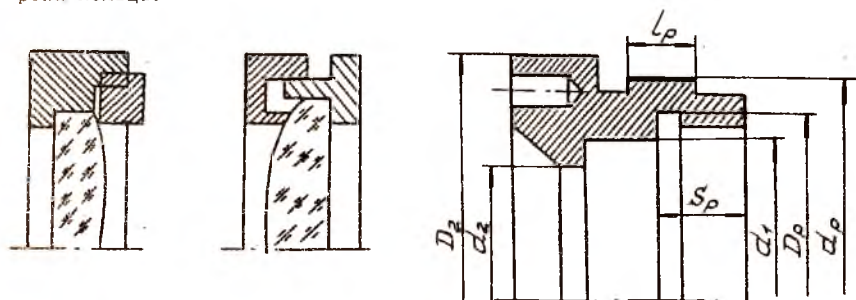
плосковыпуклой линзы, завальцо-
ванной в оправу аналогичной конструк-

Т а б л и ц а 3.4

Размеры элементов оправ под завальцовку

D, мм	S, мм	l, мм	l ₁ , мм	l ₂ , мм
до 10	от 0,2 до 0,3	0,3 - 0,4	1,5	0,3
Св. 10 до 30		0,5 - 0,7	2,0	0,5
Св. 30 до 50	от 0,3 до 0,4	1,0 - 1,2	2,5	0,8
Св. 50 до 80	от 0,4 до 0,5	1,2 - 1,6	3,0	1,0

На рис. 6.3 изображены типовые оправы для крепления резьбовыми кольцами. Примерные соотношения размеров в мм: $d_1 = D$; $d_2 = D_1 + 0,2$, где D - полный и D_1 - световой диаметры линзы; $D_p \geq d_1 + 0,2 + 2H_1$, где H_1 - высота профиля резьбы ($H_1 \approx 0,54P$); $d_p = (6 \div 10)P$; $D_2 = d_p + (2 \div 10)$ (d_p определяется особенностями конструкции всего узла); $l_p = (6 \div 10)P$ - шаг резьб внутренней и наружной соответственно. Обычно применяется мелкая резьба с шагом 0,5; 0,75; 1 мм в зависимости от толщины стенки оправы и кольца. При креплении линз больших диаметров применяется резьба и с более крупным шагом. Там же представлены резьбовые кольца наиболее распространенных типов. Соотношения их размеров определяются геометрией посадочных мест оправы под кольцо и световым диаметром линзы на ее рабочей поверхности со стороны кольца.



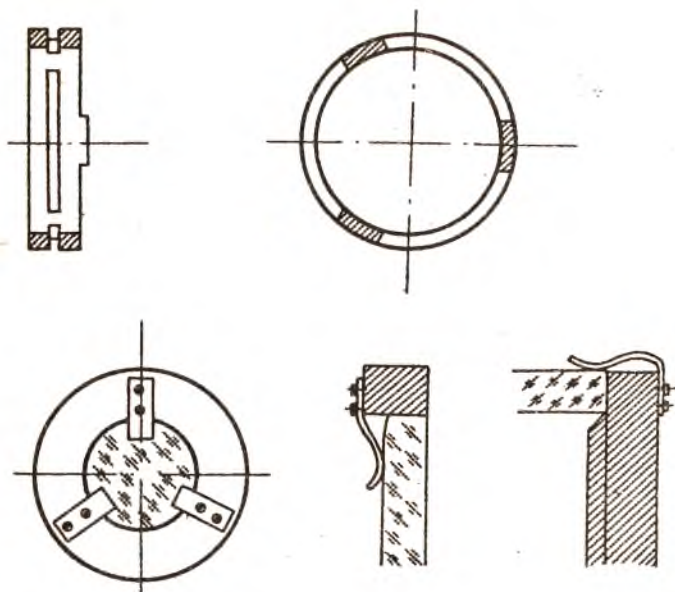
Р и с. 6.3. Крепление оптических деталей резьбовыми кольцами

Кроме материалов, используемых при креплении деталей завальцовкой, для изготовления оправ, резьбовых и промежуточных колец могут применяться автоматные стали А12, А20, закаленный дуралюминий Д1Т, Д6Т, Д16Т. Для оправ в серийном производстве могут применяться литейные алюминиевые сплавы АЛ2, АЛ9, АЛ13. Для пружинных колец применяются обычно стали: сталь 40, сталь 50.

Крепление пружинящими планками. На рис. 6.4 показаны некоторые варианты крепления круглых оптических деталей пружинящими планками. Здесь также могут быть применены и другие приемы крепления:

тремя радиально расположенными планками, каждая из которых прикрепляется двумя винтами к широкому фланцу оправы; концы планок нажимают на выступающую поверхность детали; вариант невыгоден в отношении поперечных габаритов узла;

тремя планками, для закрепления которых на оправе требуется меньшая ширина торца, планки при этом имеют более сложную формулу;



Р и с. 6.4. Крепление оптических деталей пружинящими планками

пружинящими планками, прикрепленными к лыскам на стенке оправы снаружи;

светофильтра накладным кольцом с тремя пружинящими выступами;

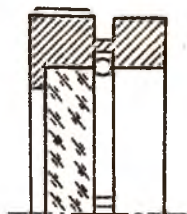
круглого зеркала накладным кольцом с шестью пружинящими элементами;

линзы тремя специальными пружинящими планками, прикрепленными винтами к внутренней поверхности стенки оправы.

Крепление пружинящими планками целесообразно применять для оптических деталей большого диаметра (80 мм и более), так как при этом относительное увеличение габаритов узла будет невелико. Однако некоторые варианты конструкций могут использоваться в неответственных случаях и для малого диаметра. Прижимные планки изготавливают из сталей марок 65Г и У8А.

На рис. 6.5 приведен пример конструкций крепления круглых деталей проволочным кольцом. Из рисунка ясно, что оптическая деталь находится между уступом оправы и выступающей частью проволочного кольца, помещенного в специальную канавку. Канавка обычно выполняется прямоугольного

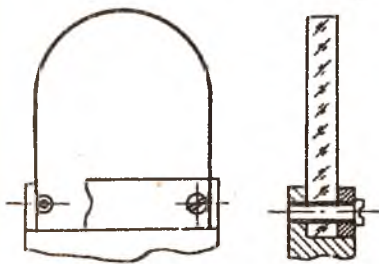
сечения. Ее ширина равна диаметру проволоки, глубина - половине диаметра. Для облегчения сборки развернутая длина кольца должна быть такой, чтобы между его концами после установки в канавку оставался промежуток в несколько миллиметров. Наружный диаметр свободного кольца (до сборки) должен быть больше внутреннего диаметра канавки. Кольца изготавливаются из пружинной проволоки; ее диаметр (обычно 0,5-1,5 мм) зависит от размера оптической детали. Во избежание выколок сопряжение оптической детали и кольца должно осуществляться по поверхности ее фаски. Ввиду наличия отклонений в размерах глубины расточки и ширины канавки в оправе, а также толщины детали по краю, это сопряжение возможно только с осевым зазором, в пределах которого оптическая деталь может смещаться и перекашиваться.



Р и с. 6.5. Крепление оптических деталей проволоочным кольцом

Крепление зеркала той же конфигурации с помощью прижимных планок (лапок). В этом случае оправой является плоская деталь, у которой имеются три выступающие площадки, являющиеся опорами для зеркала. Иногда эти опоры выполняются в виде прокладок из алюминиевой или латунной фольги. Прижимные планки закрепляются на оправе таким образом, чтобы их замыкающие элементы воздействовали на зеркало в местах, определяемых расположением опор. Так как планки жесткие, то эластичность крепления обеспечивается специальными прокладками, устанавливаемыми между планками и зеркалами.

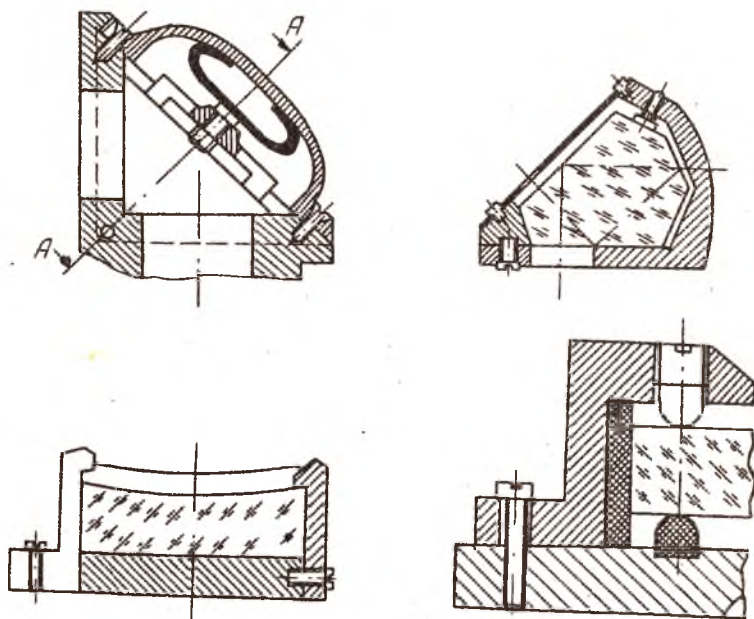
Консольное крепление применяется для крепления зеркал, работающих в качестве светодеталей, и должно выполняться на таком удалении от рабочей зоны зеркала, чтобы деформации, вызываемые креплением, не влияли на качество его поверхности. Закрепляемый край зеркала обязательно базируется на оправу через прокладку (рис. 6.6); эластичные прокладки нужны и в местах контакта крепежных деталей. В особенности это важно для зеркал, испытывающих перегрузки, например, в момент фиксации переключающего зеркала.



Р и с. 6.6. Консольное крепление зеркала

При особо жестких требованиях в отношении деформаций зеркала для крепления используют специальные, предусмотренные на нем выступы (рис. 6.7). В случае крепления зеркала пентагональ-

ного стражателя полированная плоскость выступов находится в сопряжении с притертыми площадками оправы; прижимные планки воздействуют на зеркало через эластичные прокладки.

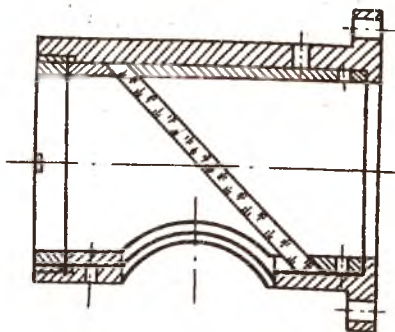


Р и с. 6.7. Крепление зеркал при жестких требованиях к деформациям

Крепление зеркала в трубе показано на рис. 6.3. Чаще всего так закрепляются наклонные зеркала, расположенные под углом 45° к оси трубы. Воковая поверхность зеркала — цилиндрическая; она сошлифована в приспособлении при наклоне заготовки на 45° по отношению к оси вращения. Рабочая отражающая поверхность зеркала ограничена эллипсом, малая ось которого равна посадочному диаметру оправы. Зеркало базируется на наклонную плоскую кромку опорной втулки, предварительно вставленной в оправу. После регулировки по углу поворота втулка стопорится. Крепление зеркала осуществляется с противоположной стороны посредством подобной же втулки, только с отверстием для прохода отраженного света. Эта втулка может фиксироваться резьбовым кольцом или винтом. Возможны деформации зеркала от неравномерного зажатия и температурных влияний. Качество крепления может быть улучшено при использовании пружинного кольца, которое должно быть установлено между резьбовым кольцом и прижимной втулкой.

6.2. Фокусировочные механизмы

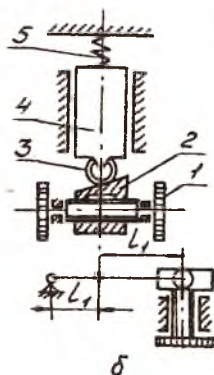
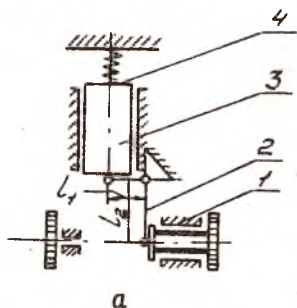
Фокусировочные механизмы предназначены для получения резкого изображения объекта в контрольно-фокусирующих устройствах. Обычно фокусировочные механизмы состоят из отдельно функционирующих механизмов для грубого и тонкого перемещения. В качестве механизма грубого перемещения чаще всего используют зубчато-реечную передачу, состоящую из косозубой шестерни и рейки. Применение такой передачи обусловлено необходимостью получить плавное перемещение ведомого элемента механизма.



Р и с. 6.8. Крепление зеркала в трубе

Плавность движения ведомых элементов фокусировочных механизмов является основным требованием, которое предъявляется к этим механизмам.

На рис. 6,9,а изображена схема рычажно-винтового механизма тонкого перемещения, где вращением рукоятки 1 поступательно перемещают винт, который своим фланцем поворачивает рычаг 2. Поворот рычага 2 вызывает поступательное движение каретки 3. Контакт каретки 3 с рычагом 2 и рычага с фланцем винта, осуществляемый парами I-го класса, обеспечивается силовым замыканием с помощью пружины 4. Кинематические параметры рас-



Р и с. 6.9. Фокусировочные механизмы: рычажно-винтового перемещения (а); кривошипно-шатунного перемещения (б)

смаатриваемого механизма таковы: шаг винта - 0,5 мм, отношение длин плеч коленчатого рычага $l_1:l_2 = 1:2$. Рабочий диапазон перемещения каретки 2-3 мм. За один оборот рукоятки I каретка 3 перемещается в своих направляющих на 0,25 мм. Для уменьшения мертвого хода в механизме коленчатый рычаг 2 следует подвесить на упругом крестообразном шарнире.

В механизме, изображенном на рис. 3.9,б, перемещением винта I поворачивают рычаг 2, малое плечо которого является кривошипом в кривошипно-шатунном механизме, состоящем из шатуна 3 и ползуна 4. Таким образом, поворот рычага 2 через шатун 3 преобразовывается в поступательное перемещение каретки (ползуна) 4. Кинематические параметры рассматриваемого механизма: отношение длин плеч рычага 2 - $l_1:l_2 = 1:4$. За один оборот винта I каретка 4 перемещается на 0,2 мм. Рабочий диапазон перемещения каретки 4 составляет 2 мм. Контакт звеньев между собой обеспечивается силовым замыканием с помощью пружины 5.

Фокусирующие системы инфракрасных приборов должны удовлетворять ряду требований; они должны иметь:

- малые габариты, определяемые жесткими требованиями к габаритам прибора в целом;

- максимально возможное относительное отверстие, равное отношению диаметра объектива к его фокусному расстоянию;

- определенный угол поля зрения, зависящий от назначения прибора;

- минимальные потери для длин волн, соответствующих выбранному диапазону;

- минимальные размеры изображения в фокальной плоскости объектива без существенных искажений при перемещении цели к краю поля зрения;

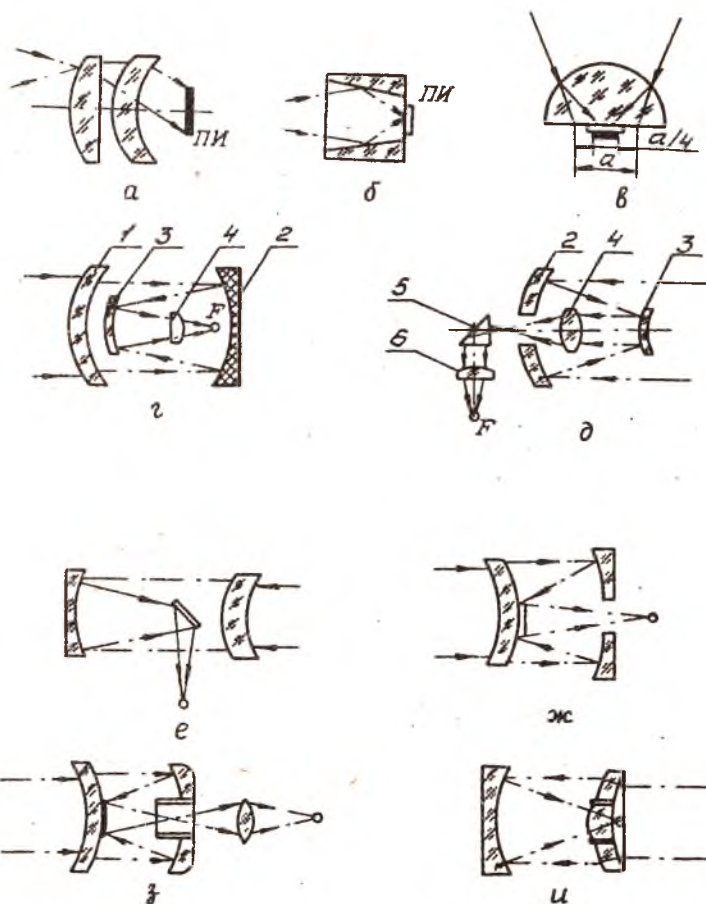
- малое виньетирование при перемещении цели к краю поля зрения;

- стабильность оптических свойств при различных климатических условиях, а также при работе в условиях тряски и вибраций.

6.3. Фокусирующие системы

Основным элементом фокусирующей системы является объектив - совокупность линз или зеркал, создающих изображения на чувствительной площадке приемника излучения. В инфракрасных приборах применяют три типа фокусирующих систем: линзовую, зеркальную и зеркально-линзовую. Линзовая фокусирующая система состоит из объектива и конденсатора. Если представить объектив в виде эквивалентной линзы, то схема прохождения лучей через эту линзу имеет вид, показанный на рис. 3.10 (табл. 6.5).

Входным зрачком системы является объектив, выходным зрачком - окно приемника излучения. Так как центры обоих зрачков являются сопряженными



Р и с. 6.10. Линзовый конденсор (а), световая ловушка (б), иммерсионный конденсор (в), зеркально-линзовые фокусирующие системы (г) - (и): 1 - обтекатель; 2 - первичное зеркало; 3 - вторичное зеркало; 4 - корректирующая линза; 5 - призма; 6 - фокусирующая линза

точками относительно главных плоскостей конденсатора, то имеют место следующие соотношения:

$$(\ell_n - f_k)(f_{os} - \Delta) = f_k^2; \quad \frac{d_n}{D_{os}} = \frac{\ell_n}{f_{os} + f_k - \Delta}, \quad (6.1)$$

откуда находим

Зеркально-линзовые фокусирующие системы
для инфракрасной области спектра

Диапазон длин волн, $\Delta\lambda$, мкм	Расчетная длина волны λ_p , мкм	Фокусное расстояние, f_{of} , мм	$\frac{f_{of}}{D_{of}}$	Угловая разрешающая способность, мрад	Номер рисунка
0,4 - 0,2	1,2	254	1,6	0,88 2.6I	6.10,а
1,0 - 4,0	2,5	244	1,6	1,5 1,5	6.10,а
1,0 - 3,0	2,0	152	1,8	1 при 0° 8 при 10°	6.10,в
1,0 - 3,0	2,0	104	1,4	1 при 0° 8 при 10°	6.10,г

Примечание: 0° и 10° - углы наклона лучков.

$$\ell_n = \frac{f_{of} + f_k - \Delta}{f_{of} - \Delta} f_k; \quad \frac{d_n}{D_{of}} = \frac{f_k}{f_{of} - \Delta} \quad (6.2)$$

Кроме того, для определения свободного диаметра конденсатора имеем условие

$$d_k = D_{of}(f_k - \Delta)/f_{of} + 2tg\beta(f_{of} + f_k - \Delta). \quad (6.3)$$

Из приведенных формул следует, что минимальные поперечные габариты фокусирующей системы получаются, если принять $f_k = \Delta$. В этом случае имеем

$$\ell_n = \frac{f_{of} f_k}{(f_{of} - f_k)}; \quad \frac{d_n}{D_{of}} = f_k(f_{of} - f_k); \quad d_k = f_{of} 2tg\beta. \quad (6.4)$$

Условие $f_k = \Delta$ выполнить точно практически не удастся, так как в фокальной плоскости объектива размещена модулирующая диафрагма. Последние формулы могут служить лишь для ориентировочных расчетов.

Диаметр конденсатора d_k зависит от угла поля зрения 2β ; лучшими с точки зрения уменьшения габаритов системы при данном угле 2β будут те положения конденсатора, при которых изображение цели находится между конденсатором и его передним фокусом.

Энергетическая освещенность в плоскости изображения от удаленного на большое расстояние объекта определяется следующей формулой:

$$E = \frac{\pi B \tau_*}{4(f_{of}/D_{of})^2}, \quad (6.5)$$

где B - энергетическая яркость объекта; τ_f - коэффициент пропускания фокусирующей системы; $f_{об}$ и $D_{об}$ - фокусное расстояние и диаметр объекта.

Для увеличения освещенности в плоскости изображения целесообразно уменьшать отношение $f_{об}/D_{об}$, но при этом следует иметь в виду, что изображение удаленного точечного объекта получается в виде конечного пятна рассеивания, размеры которого также зависят от отношения $f_{об}/D_{об}$. Рассмотрим этот вопрос несколько подробнее.

Известно, что даже хорошо скорректированные оптические системы имеют погрешности (абберации), вследствие которых изображение удаленной точечной цели в плоскости изображения представляет собой пятно рассеивания.

Основными видами абберации являются:

сферическая абберация, заключающаяся в том, что пучок лучей от светящейся точки, находящейся на оси линзы, собирается ею не в одной точке (фокусе), а на некотором участке. Величина сферической абберации зависит от кривизны поверхностей линзы и показателя преломления материала, из которого она изготовлена. Вследствие сферической абберации светящаяся точка дает на экране изображение в виде кружка рассеивания, освещенного неравномерно. Отличительной особенностью сферической абберации является то, что она сохраняется даже при положении светящейся точки на оптической оси, когда все остальные абберации (для монохроматического пучка) исчезают;

хроматическая абберация - искажение, в силу которого даже для параксиальных лучей немонахроматический пучок имеет целую совокупность фокусов; в связи с этим светящаяся точка на оси изображается в виде кружка, образованного (для видимого участка спектра) цветными кольцами;

астигматизм, заключающийся в том, что пучок лучей, исходящий из точки и составляющий некоторый угол с осью оптической системы, может терять гомоцентричность, т.е. после прохождения через фокусирующую систему не сходится в одну точку; светящаяся точка изображается пятном рассеивания, форма которого зависит от положения экрана;

кома - искажение, из-за которого светящаяся точка, находящаяся не на оси системы и посылающая широкий пучок лучей, дает изображение на экране в виде неравномерно освещенного пятна, напоминающего комету;

искривление плоскости изображения, когда изображение представляет собой не плоскость, перпендикулярную оптической оси, а изогнутую поверхность.

Для расчета радиуса r пятна рассеивания простейших фокусирующих систем служат следующие формулы:

сферическая aberrация

$$\rho = \frac{1}{8} k_1 (D_{\text{об}} / f_{\text{об}})^2 ; \quad (6.6)$$

хроматическая aberrация

$$\rho = k_2 (D_{\text{об}} / f_{\text{об}}) ; \quad (6.7)$$

астигматизм

$$\rho = k_3 (D_{\text{об}} / f_{\text{об}}) \beta^2 ; \quad (6.8)$$

кома

$$\rho = \frac{1}{4} k_4 (D_{\text{об}} / f_{\text{об}})^2 \beta ; \quad (6.9)$$

искривление плоскости изображения

$$\rho = \frac{1}{4} k_5 (D_{\text{об}} / f_{\text{об}})^2 \beta^2 , \quad (6.10)$$

где $D_{\text{об}}$ и $f_{\text{об}}$ - диаметр и фокусное расстояние объектива; β - угол поля зрения; k_i - коэффициенты aberrаций.

Теоретическим пределом диаметра пятна рассеяния является эффективный диаметр центрального пятна в дифракционной картине изображения точки, угловой размер которого, приведенный к фокусу объектива, рассчитывается по формуле

$$\Delta_\lambda = 2,44 \lambda / D_{\text{об}} . \quad (6.11)$$

Величина Δ_λ измеряется в радианах, а длина волны λ и диаметр объектива $D_{\text{об}}$ - в одинаковых единицах.

Угловой размер Δ изображения цели, создаваемого простейшей линзой, образованной двумя сферическими поверхностями с радиусами r_1 и r_2 выражается следующей формулой:

$$\frac{\Delta}{2} = \frac{7,8 \cdot 10^{-3}}{(f_{\text{об}} / D_{\text{об}})^2} A , \quad (6.12)$$

где Δ - выражено в угловых величинах (радианах);

$$A = \frac{(n+2)\sigma^2}{n(n-1)^2} - \frac{4(n+1)\sigma}{n(n-1)} + \frac{3n+2}{n} + \frac{n^2}{(n-1)^2} ; \quad \sigma = \frac{r_1 + r_2}{r_2 - r_1} ; \quad (6.13)$$

n - показатель преломления материала линзы.

Множитель A зависит только от величины n и отношения r_1/r_2 . Минимальное значение A и, следовательно, наименьший размер изображения цели соответствуют условию

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{2n^2 + n}{2n^2 - n - 4} \quad (6.14)$$

Конденсор хорошо работает, если лучи параллельны оптической оси или составляют с ней малый угол: при больших углах рассогласования (на краю поля зрения) часть лучей не попадает на приемник излучения, что приводит к снижению чувствительности прибора.

Для улучшения разрешающей способности простейшей зеркальной оптической системы применяют сложные первичные и вторичные зеркала и корректирующие линзы. В частности, используют зеркало, отражающий слой которого нанесен на заднюю поверхность. С помощью такого зеркала можно устранить кому, а так как сферическая aberrация только частично может быть исправлена обтекателем, для устранения остаточной сферической aberrации необходимо применение специальной корректирующей линзы. Так, например, фокусирующая система (рис. 6.10, г) состоит из обкатателя, изготовленного из алюмината кальция, первичного зеркала из трехсернистого мышьяковистого стекла с задней отражающей поверхностью, обеспечивающей максимально возможную оптическую силу системы, плоского вторичного зеркала, которое, меняя направление хода лучей, уменьшает размеры системы и корректирующей линзы, изготовленной из трехсернистого мышьяковистого стекла. Разрешающая способность этой системы для пучков, наклоненных к оси под углом 2° , равна приблизительно 2 мрад.

Исследования зеркально-линзовых оптических систем показали, что подбором места расположения корректирующей линзы и выбором ее кривизны и оптической силы первичная кома и астигматизм могут быть уменьшены до нуля. В широком диапазоне изменения наложения линзы оптимальное отношение f_{06}/D_{06} составляет 1,25. Для получения нулевой кривизны фокальной поверхности корректирующая линза должна находиться от зеркала на расстоянии, составляющем 20% от эффективного фокусного расстояния. Это приводит к благоприятным геометрическим соотношениям, так как корректирующая линза помещается вблизи фокальной плоскости.

Для изготовления зеркал используются материалы (табл. 6.6) с наружным покрытием из серебра, золота, меди и алюминия. Средний коэффициент отражения всех металлов в диапазоне 1-10 мкм лежит в пределах 0,95...0,98 и мало зависит от длины волны. Наиболее часто применяют алюминий высокой чистоты, осаждаемый в вакууме. По сравнению с другими металлами, имеющими высокий коэффициент отражения, алюминий легко испаряется и обладает лучшей адгезией к стеклу и пластмассам.

Минимальный угловой размер Δ пятна остаточных aberrаций, образуемого на оси сферическим зеркалом, выражается формулой

Основные данные оптических материалов, применяемых для изготовления объективов и конденсаторов инфракрасных приборов

Наименование материала и формула	Длинно-волновая граница пропускания, мм	Средний коэффициент пропускания	Средний показатель преломления	Растворимость в холодной воде, г/100 мм	Плотность, г/см ³	Температура плавления или размягчения, °C	Максимальный размер объектива, мм	Характерные особенности материала
KRS-5 (система TlBr + TlCl)	38	0,70	2,63	0,02	-	420	150-200	Красные кубические кристаллы. Не раскалывается, трудно полируется. Обладает большим коэффициентом теплового расширения. Токсичен.
KRS-6 TlBr + TlCl	23	0,72	2,35	0,1-0,3	7,19	423,5	200	Бесцветные кубические кристаллы. Токсичен.
Трехсернистый мышьяк As ₂ S ₃	12-15	0,75	2,5	0,0	3,20	196	Не ограничен	Опаловидный. Красноватого цвета. Устойчив. Не токсичен. Размягчается при 195°C. Не подвержен коррозии.
Германий Ge	> 15	0,5-0,98	4,05	0,0	5,32	958	150	Кубические кристаллы. Обрабатывается как стекло. В интервале 15-40 мм имеет несколько максимумов и минимумов в коэффициенте пропускания.
Титанат стронция SrTiO ₃	5-7	0,75	2,2	0,0	5,13	2080	500 кар	Кубические кристаллы.
Рутил TiO ₂	6	0,95	2,45	-	4,26	1825	500 кар	Анизотропный материал.

$$\frac{\Delta}{2} \approx 7,8 \cdot 10^{-2} (f_{\text{ос}} / D_{\text{ос}})^{-3} \text{ рад}$$

или (в угловых секундах)

$$\Delta \approx 1600 (f_{\text{ос}} / D_{\text{ос}})^{-3}. \quad (6.15)$$

Ошибка приближения не превышает 3% для светосильного зеркала ($f_{\text{ос}} / D_{\text{ос}} = 1$), а у более длиннофокусных систем приближение к истинному значению еще меньше.

Применяют также следующие формулы для расчета составляющих углового размера пятна остаточных aberrаций зеркальных фокусирующих систем (сферическое зеркало).

Дифракционный предел $\Delta = 2,44 \lambda / D_{\text{ос}}$, где λ - длина волны излучения, $D_{\text{ос}}$ - эффективный диаметр зеркала.

Сферическая aberrация $\Delta/2 = 0,0078 (f_{\text{ос}} / D_{\text{ос}})^{-3}$;

кома $\Delta/2 = 0,0625 \psi (f_{\text{ос}} / D_{\text{ос}})^{-2}$;

астигматизм $\Delta/2 = 0,54 \psi (f_{\text{ос}} / D_{\text{ос}})^{-1}$,

где ψ - угол визирования.

Ниже приводятся примеры расчетов некоторых параметров оптических элементов.

Пример I. Провести расчет параметров оптико-электронного прибора (ОЭП).

Порог чувствительности ОЭП определяется обычно шумами, источники которых могут быть расположены как внутри прибора (внутренние шумы), так и вне его (внешние шумы или помехи). Определение этих соотношений и на их основе некоторых важнейших параметров ОЭП (например, мощности источника, дальности действия, размера входного зрачка и др.) составляет основное содержание и цель энергетических расчетов. Их последовательность:

1. Составляются выражения для потока Φ или облученности E , создаваемых полезным сигналом на входе прибора (на входном зрачке оптической системы), в виде функций параметра излучения, среды распространения сигнала и параметров приемной оптической системы.

2. Рассчитывается порог чувствительности прибора $\Phi_{\text{позп}}$ или пороговая облученность $E_{\text{позп}}$, приведенные ко входу прибора.

3. В соответствии с опытом аналогичных разработок или результатами специальных расчетов выбирается требуемое соотношение между Φ и $\Phi_{\text{позп}}$ (или E и $E_{\text{позп}}$), т.е. отношение сигнал/шум $\mu = \Phi / \Phi_{\text{позп}}$ или $\mu = E / E_{\text{позп}}$.

Затем полученное основное энергетическое уравнение ОЭП решается относительно одного из входящих в него параметров прибора. После этого выбираются или рассчитываются остальные конструктивные параметры. Для учета пространственного распределения энергии излучателя (или вообще наблюдаемого объекта) удобно воспользоваться делением всех возможных на практике случаев на три группы: а) излучатель точечный; б) излучатель имеет конечные размеры, которые меньше углового поля прибора (иногда такой излучатель называют "площадным"); в) размеры излучателя перекрывают все угловое поле оптической системы ("протяженный" излучатель). Любым из указанных излучателей может быть как наблюдаемый объект, так и помеха, и фон.

Если излучатель точечный, его основной характеристикой является энергетическая сила света (сила излучения) I . Для малых телесных углов расчет потока Φ или облученности E на входном зрачке площади $A_{\text{вх}}$ можно вести по формулам

$$\Phi = \tau_c I A_{\text{вх}} / \ell^2; \quad (6.1)$$

$$E = \Phi / A_{\text{вх}} = \tau_c I / \ell^2, \quad (6.2)$$

где τ_c - коэффициент пропускания среды распространения излучения на пути от источника до входного зрачка; ℓ - расстояние до излучателя.

Если излучатель является селективным или прием излучения происходит в каком-либо участке спектра $\lambda_1 \dots \lambda_2$, то, зная вид функций $\tau_{\text{св}} = \tau_c(\lambda)$ и $I_\lambda = I(\lambda)$, можно легко определить значения $\Phi_{\lambda_1 \dots \lambda_2}$ и $E_{\lambda_1 \dots \lambda_2}$ для этого участка спектра. Например:

$$\Phi_{\lambda_1 \dots \lambda_2} = \frac{A_{\text{вх}}}{\ell^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\text{св}} I_\lambda d\lambda. \quad (6.3)$$

Следует учесть, что формулы (6.1)-(6.3) справедливы только для небольших телесных углов $\Delta\Omega = A_{\text{вх}}/\ell^2$, в пределах которых энергетическая сила света источника постоянна.

В том случае, когда излучатель конечной площади ΔA занимает часть углового поля оптической системы, характеристикой его является чаще всего яркость L_0 .

Если излучатель косинусный, например для черных и серых излучателей, $L_0 = L = \text{const}$, а его размеры малы по сравнению с расстоянием до него, поток на входе ОЭП (на входном зрачке объектива)

$$\Phi = \tau_c \pi L \Delta A \sin^2 \theta_A. \quad (6.4)$$

где σ_A - апертурный угол объектива.

Если учесть, что для $l \gg D \sin^2 \sigma_A \approx \frac{D^2}{4f^2}$, где D - диаметр входного зрачка, то получим

$$\Phi = \tau_c L \frac{\Delta A \Delta \lambda_{\text{вх}}}{f^2} = \tau_c L \frac{\pi D^2 \Delta A}{4f^2} \quad (6.5)$$

Облученность входного зрачка определяется для этого случая как

$$E = \tau_c L \Delta A / f^2 \quad (6.6)$$

Если излучатель перекрывает все угловое поле объектива приемной системы ОЭП, то при полевой диафрагме площадью

$$\Phi = \tau_c L q \lambda_{\text{вх}} / f'^2, \quad (6.7)$$

$$E = \tau_c L q / f'^2 \quad (6.8)$$

При круглой форме входного зрачка

$$\Phi = \tau_c L \pi q (D/f')^2 / 4, \quad (6.9)$$

т.е. поток, приходящий на вход прибора, в этом случае зависит от относительного отверстия системы D/f' .

На втором этапе энергетического расчета определяется эквивалентная порогу чувствительности электронного канала облученность $E_{\text{н.озп}}$ на входном зрачке или эквивалентный порог чувствительности $\Phi_{\text{н.озп}}$, т.е. порог чувствительности электронного канала приводится ко входу прибора. Этот этап часто заключается в приведении ко входу порога чувствительности приемника Φ_n (или E_n):

$$\Phi_{\text{н.озп}} = \Phi_n / \eta_{\text{озп}}, \quad (6.10)$$

где $\eta_{\text{озп}}$ - коэффициент полезного действия ОЭП, учитывающий потери потока на пути от входного зрачка объектива до чувствительного слоя приемника.

Иногда $\Phi_{\text{н.озп}}$ определяется не пороговой чувствительностью приемника, а, например, разрешающей способностью стрелочного прибора на выходе электронного тракта или минимальным напряжением ΔU , необходимым для управления следящим приводом, и т.д. В этих случаях $\Phi_{\text{н.озп}}$ находится путем приведения ΔU ко входу всего прибора, т.е. деления ΔU на коэффициент передачи всего прибора.

Следующим этапом энергетического расчета является определение требуемого отношения сигнал/шум μ . В ряде случаев величина μ может

быть рассчитана по специальным критериям в зависимости от заданных вероятности правильного срабатывания прибора и вероятности "ложного" срабатывания из-за какой-либо помехи, пришедшей на его вход, или из-за внутренних шумов прибора. Часто в процессе проектирования ОЭП величиной μ задаются исходя из опыта разработки и эксплуатации аналогичных приборов.

При выборе объектива ОЭП пользуются различными параметрами и характеристиками, которые можно разделить на следующие основные группы: габаритные, энергетические и технико-экономические.

К важнейшим габаритным параметрам относятся: диаметр входного зрачка D , фокусное расстояние f' , относительное отверстие D/f' , угловое поле 2ω , длина трубы объектива L , задний фокальный отрезок S_f' . В зависимости от назначения оптической системы эти параметры часто дополняют другими, специфическими для данной группы приборов, например, числовой апертурой в пространстве предметов A , линейным увеличением β .

Основными энергетическими параметрами и характеристиками являются коэффициент пропускания τ_0 , спектральная характеристика пропускания $\tau_\lambda = \varphi(\lambda)$, а иногда геометрическая светосила $(D/f')^2$, физическая светосила $\tau_0(D/f')^2$ и коэффициент усиления объектива оптической системы $K_{\text{онт}}$.

К технико-экономическим параметрам и характеристикам часто относят абберационные и пространственно-частотные характеристики, массу объектива, материал и форму оптических деталей, число компонентов и их взаимное расположение, способ изготовления, чувствительность к различным внешним воздействиям (изменению температуры и влажности, действию вибрации, ударов, радиации), надежность, технологические и эксплуатационные особенности конструкции, стоимость и т.д.

Диаметр входного зрачка объектива в значительной мере влияет на энергетические соотношения в ОЭП и выбирается, как было сказано выше, на основе энергетического расчета с учетом требований к габаритам всего ОЭП. Следует иметь в виду, что при увеличении диаметра входного зрачка увеличиваются абберации и влияние посторонних излучений, уменьшающих чувствительность прибора. Кроме того, масса объектива растет пропорционально третьей степени диаметра входного зрачка, возрастают технологические трудности изготовления оптических деталей большего размера и сохранения стабильности параметров объектива при различных внешних воздействиях.

Фокусное расстояние объектива f' определяет его габаритные размеры и размеры чувствительной площадки приемника излучения при заданном значении углового поля. Для повышения точности в ряде случаев целесообразно увеличивать фокусное расстояние.

Относительное отверстие объектива D/f' определяет его геометрическую и физическую светосилу. Для увеличения светосилы необходимо увеличивать относительное отверстие, однако при этом возрастают aberrации, т.е. ухудшается качество изображения. Кроме того, с увеличением D/f' становится труднее устранять виньетирование и падает глубина резкости.

Угловое поле объектива 2ω выбирается чаще всего в соответствии с техническим заданием. Увеличение этого угла позволяет повысить быстродействие ОЭП, иногда упростить его конструкцию, облегчить процесс работы и юстировки и т.п. Однако расширение углового поля ведет к увеличению размеров чувствительной площадки приемника излучения, уменьшению помехозащищенности и ухудшению качества изображения.

Значение заднего фокального отрезка S'_p обуславливает применение того или иного анализатора изображения, компенсатора и других узлов.

Аберрационные параметры и характеристики в значительной мере определяют качество изображения, сформированного объективом. Часто качество изображения характеризуют диаметром кружка рассеяния и распределением энергии по его сечению, от которых зависят параметры раstra (размер его ячейки) и других узлов ОЭП.

Рекомендуется следующий порядок работы объектива ОЭП:

1. Исходя из энергетического уравнения, с учетом ориентировочного значения порогового потока Φ_n приемника излучения, определяют минимально допустимый диаметр D входного луча объектива.

2. На основании соображений, изложенных ранее, и основных требований ТЗ выбирается тип объектива - линзовый, зеркальный или зеркально-линзовый, имеющий требуемую спектральную характеристику, согласующуюся со спектральной характеристикой приемника и источника излучения.

3. Исходя из требований ТЗ, выбирают ориентировочные значения фокусного расстояния и относительного отверстия объектива.

В ряде случаев фокусное расстояние f' определяется размером чувствительной площадки приемника излучения: $f' \leq a/2\omega$, где a - минимальный размер чувствительной площадки приемника. При этом для высокоточных измерительных ОЭП целесообразно относительное отверстие объектива выбирать в диапазоне $\frac{D}{f'} = \frac{1}{2} \dots \frac{1}{4}$. Это обусловлено тем, что при больших относительных отверстиях увеличиваются aberrации объектива и, следовательно, диаметр кружка рассеяния, а так как погрешности измерения в большинстве случаев пропорциональны этому диаметру, то увеличивать его нецелесообразно. Для узкопольных угломерных ОЭП, имеющих допуск на погрешности более нескольких секунд, в целях улучшения энергетических параметров обычно относительное отверстие выбирают большим: $D/f' = 1,25 \dots 0,5$. Для некоторых приборов диаметр кружка рассеяния может быть

равним минимальному размеру площадки приемника, для других - равным размеру ячейки растра.

4. По каталогу подбирается объектив, имеющий необходимые ориенти- ровочные значения $D, f', 2\omega$, диаметр кружка рассеяния, а также осталь- ные габаритные, энергетические и технико-экономические параметры.

Пример 2. Выбирать объектив сканирующего оптико-электронного радиометра, работающего в спектральном диапазоне $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 2-6$ мкм, у которого в качестве приемника излучения используется болометр БЦВ-1,0х3,5 с чувствительной площадью $1 \times 3,5$ мм. Мгновенное угловое поле радиометра $2\omega = 2^\circ$, габаритные размеры не более $100 \times 200 \times 300$ мм, минимальный диаметр объектива, полученный из энергетического расчета, $D_{\min} = 30$ мм.

Последовательность этапов при выборе объектива радиометра следую- щая:

1. Поскольку прибор должен работать в широкой спектральной обла- сти, выберем зеркальный объектив, построенный, например, по простейшей схеме. Так как диаметр кружка рассеяния объектива может достигать зна- чения, равного минимальному размеру чувствительной площади болометра, относительное отверстие объектива выбираем в диапазоне $0,5 \dots 1,2$.

2. Приняв ориентировочно диаметр узла крепления болометра (или вторичного зеркала) $d_{np} = 25$ мм, найдем наружный диаметр зеркала по формуле

$$D = \sqrt{D_{\min}^2 + d_{np}^2} = \sqrt{30^2 + 25^2} \approx 39 \text{ мм}.$$

3. При относительном отверстии $D/f' = 1:0,8$ фокусное расстояние объектива $f' = 39/1,2 \approx 33$ мм.

4. Диаметр кружка рассеяния, обусловленный сферической аберрацией

$$d_{кр} = 2 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} (D/f')^3 f' = 2 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2^3 \cdot 33 \approx 0,88 \text{ мм},$$

что вполне допустимо, так как полевые аберрации при небольшом угловом поле $2\omega = 2^\circ$ малы.

Однако следует иметь в виду, что для обеспечения заданного угло- вого поля $2\omega = 2^\circ$ при размере чувствительной площадки приемника из- лучения $l_{np} = 1$ мм, фокусное расстояние для простейшей схемы оптиче- ской системы без конденсора можно выбрать исходя из следующего усло- вия:

$$f' \leq (l_{np} \rho) / (2\omega) \approx 29 \text{ мм}.$$

При $f' = 33$ мм размер $l'_{np} = 1,15$ мм. Поэтому при фокусном рассто- янии объектива $f' = 33$ мм небольшая часть пучка лучей внутри углового

поля $2\omega = 2^\circ$ не попадает на чувствительную площадку заданного приемника излучения. Для исключения потерь энергии излучения можно применить оптическую систему с конденсором, позволяющую уменьшить чувствительную площадку приемника излучения при заданных фокусном расстоянии и угловом поле.

5. Окончательно выберем оптическую схему объектива Кассегрена с $D = 39$ мм, $f = 33$ мм, $2\omega = 2^\circ$ и диаметром вторичного зеркала $d_2 = 25$ мм.

6. Произведем габаритный расчет этого объектива с конденсором, обеспечивающим уменьшение чувствительной площадки приемника излучения в 1,15 раза.

Пример 3. Выбрать объектив для ОЭП, служащего для обнаружения цели, по следующим исходным данным: угловое поле $2\omega = 3^\circ$; приемник излучения - сернистосвинцовый фоторезистор ФСА-I, имеющий спектральную характеристику, согласующуюся со спектральной характеристикой цели; габаритные размеры прибора не более $400 \times 300 \times 200$ мм; масса не более 5 кг.

Последовательность операций при выборе объектива следующая:

1. Из энергетического расчета выбирается минимальный диаметр входного зрачка объектива $D \geq 120$ мм.

2. Используется зеркальный объектив, так как он работает в довольно широкой области спектра (длинноволновая граница спектральной чувствительности фоторезистора $\lambda_2 \approx 2,7$ мкм). У объектива отсутствуют хроматические аберрации и селективное поглощение энергии излучения, а продольные габаритные размеры меньше, чем размеры линзового объектива. Кроме того, он проще в изготовлении и имеет меньшую стоимость по сравнению со стоимостью линзового объектива. Относительное отверстие D/f' выбранного объектива можно выбирать в диапазоне 0,5...1,2, так как он имеет малое угловое поле, а допустимый диаметр кружка рассеяния может достигать ширины чувствительной площадки фоторезистора ФСА-I (площадь чувствительного слоя 3×4 мм).

3. С учетом экранирования входного зрачка зеркального объектива узлом крепления фоторезистора с поперечными размерами $7,5 \times 12$ мм найдем наружный диаметр зеркала из условия

$$\frac{\pi}{4} (D^2 - d_{np}^2) = \frac{\pi}{4} D_{min}^2,$$

где d_{np} - диаметр оправы приемника.

Принимая ориентировочно $d_{np} = 50$ мм, определим $D = 130$ мм.

При относительном отверстии $D/f' = 1:0,8$ фокусное расстояние объектива $f' = 108$ мм. Диаметр кружка рассеяния, обусловленный сферической аберрацией, может быть вычислен по приближенной формуле

$$d_{кр} = 2 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} (D/f')^3 f' = 2,9 \text{ мм},$$

что вполне допустимо, так как такой кружок полностью попадает на чувствительную площадку фотоприемника.

5. Далее производится габаритный расчет зеркального объектива или по каталогу подбирается готовый объектив с $D = 130$ мм и $f' = 108$ мм.

Пример 4. Определить минимально необходимый диаметр входного зрачка D объектива ОСП. Прибор должен обнаружить "площадный" объект с яркостью L_0 , если в угловом поле объектива находится излучающая "площадная" помеха с яркостью $L_{пом}$. Условие обнаружения заключается в превышении разности потоков от объекта Φ_0 и от помехи $\Phi_{пом}$ над порогом чувствительности $\Phi_{позп}$ не менее чем в два раза, т.е. $\mu = 2$. Яркость объекта $L_0 = 1500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$, его площадь $\Delta A_0 = 0,5 \text{ м}^2$, расстояние до объекта $l_0 = 1200 \text{ м}$, коэффициент пропускания среды на трассе длиной l_0 , $\tau_{с,0} = 0,6$. Яркость помехи $L_{пом} = 1400 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$, ее площадь $A_{пом} = 4 \text{ м}^2$, расстояние до нее $l_{пом} = 3500 \text{ м}$, коэффициент пропускания среды на трассе длиной $l_{пом}$, $\tau_{с,пом} = 0,3$. Порог чувствительности прибора $\Phi_{позп} = 10^{-6} \text{ Вт}$.

Для определения сигнала от объекта Φ_0 и от помехи $\Phi_{пом}$ возможно применить формулу

$$\Phi_0 = \tau_{с,0} L_0 \frac{\Delta A_0 A_{вх}}{l_0^2} = \tau_{с,0} L_0 \frac{\Delta A_0 \pi D^2}{4 l_0^2};$$

$$\Phi_{пом} = \tau_{с,пом} L_{пом} \frac{\Delta A_{пом} A_{вх}}{l_{пом}^2} = \tau_{с,пом} L_{пом} \frac{\Delta A_{пом} \pi D^2}{4 l_{пом}^2}.$$

Составив разность этих сигналов и сравнив ее с $\Phi_{позп}$, получим основное энергетическое уравнение для рассматриваемого случая:

$$\frac{\pi D^2}{4} \left(\tau_{с,0} L_0 \frac{\Delta A_0}{l_0^2} - \tau_{с,пом} L_{пом} \frac{\Delta A_{пом}}{l_{пом}^2} \right) \geq \mu \Phi_{позп}.$$

Отсюда

$$D \geq 2 \sqrt{\frac{\mu \Phi_{позп}}{\pi \left(\tau_{с,0} L_0 \frac{\Delta A_0}{l_0^2} - \tau_{с,пом} L_{пом} \frac{\Delta A_{пом}}{l_{пом}^2} \right)}}.$$

Подставив сюда значения указанных выше параметров, получим

$$D \geq 2 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-6}}{3,14 \left[0,6 \cdot 1500 \frac{0,5}{(1200)^2} - 0,3 \cdot 1400 \frac{4}{(3500)^2} \right]}} = 0,12 \text{ м} \approx 120 \text{ мм}.$$

Пример 5. Требуется определить, можно ли обнаружить удаленный объект в виде черного тела с температурой $T_0 = 1300$ К и площадью $\Delta A = 0,5 \text{ м}^2$ на протяженном фоне постороннего излучения, которое можно представить также в виде излучения черного тела с $T_\phi = 373$ К. Расстояние до источника $\ell = 1000$ м. Пропускание среды одинаково для излучения, идущего как от источника, так и от фона. Коэффициент пропускания $\tau_c = 0,3$. В приборе используется зеркальный объектив с круглым входным зрачком диаметром $D = 0,1$ м. Порог чувствительности прибора, определяемый по разности сигналов от обнаруживаемого источника и от фона, $\Phi_{\text{позп}} = 10^{-7}$ Вт. Площадь полевой диафрагмы $q = 10^{-5} \text{ м}^2$, фокусное расстояние объектива $f' = 0,2$ м. Надежное обнаружение возможно при отношении сигнал/шум $\mu > 2$.

В соответствии с описанной выше методикой проводим расчет в следующей последовательности:

1. Рассчитываем значения потоков излучения от объекта и фона на входе ОЭП. При этом учитываем, что в соответствии с законами излучения черных тел энергетическая яркость может быть определена как

$$L = \sigma T^4 / \pi,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ - постоянная Стефана-Больцмана;

$$L_0 = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (1300)^4}{3,1416} = 0,515 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1};$$

$$L_\phi = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (373)^4}{3,1416} = 10^2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

2. Поток от объекта рассчитываем по формуле

$$\Phi_0 = \tau_c L_0 \frac{\pi D^2 \Delta A}{4 \ell^2} = 0,3 \cdot 0,515 \cdot 10^5 \frac{3,1416 \cdot 10^{-5}}{4 \cdot 10^{-6}} = 0,606 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}.$$

3. Поток от фона рассчитываем по формуле

$$\Phi_\phi = \frac{1}{4} \tau_c L_\phi \pi q \left(\frac{D}{f'} \right)^2 = \frac{1}{4} 0,3 \cdot 10^2 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-5} \cdot (0,5)^2 = 0,589 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}.$$

Разность потоков, которая должна превышать $\Phi_{\text{позп}}$ в два раза

$$\Delta \Phi = \Phi_0 - \Phi_\phi = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}.$$

Сопоставляя эту разность с $\Phi_{\text{позп}}$, убеждаемся, что отношение $\mu > 2$, т.е. обнаружение возможно.

Пример 6. Рассчитать предельную дальность обнаружения удаленного точечного излучателя, имеющего силу света $I = 100$ кд, если порог чувствительности ОЭП $\Phi_{\text{позп}} = 10^{-7}$ Вт. Излучение помех и фона практически

отсутствует. Коэффициент пропускания среды в рабочем спектральном диапазоне $\tau_c = 0,8$. Площадь входного зрачка $A_{вх} = 10^{-2} \text{ м}^2$, $\mu = 10$.

В данном случае энергетическое уравнение имеет вид

$$\Phi / \Phi_{\text{позп}} \geq \mu$$

или

$$\frac{\tau_c / A_{вх}}{l^2 \Phi_{\text{позп}}} \geq \mu$$

Отсюда

$$l = \sqrt{\frac{\tau_c / A_{вх}}{\mu \Phi_{\text{позп}}}} = \sqrt{\frac{0,8 \cdot 100 \cdot 10^{-2}}{10 \cdot 10^{-7}}} = 707 \text{ м},$$

т.е. предельная дальность составляет $\sim 707 \text{ м}$.

Для многих ОСП, работающих в благоприятных условиях (лабораторных, цеховых), энергетический расчет носит характер поверочного. При этом для известной конструктивной схемы определяют потери потока излучения в отдельных элементах оптической системы и находят суммарный коэффициент пропускания. Затем, выбрав источник излучения, например из конструктивных соображений, рассчитывают требуемые параметры приемника. Возможна и обратная последовательность: для выбранного приемника рассчитываются требуемые параметры источника.

Пример 7. Необходимо определить требуемую яркость источника излучения для автоколлимационно-

го угломера, работающего в цеховых условиях (рис. 6.II), если выбранный приемник излучения имеет порог чувствительности Φ_n .

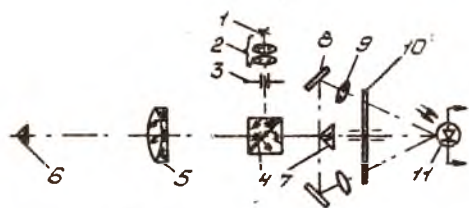
Поток излучения, выходящий из объектива автоколлиматора, может быть найден по формуле

$$\Phi = \pi \tau A L \sin^2 \theta,$$

где L - яркость излучения в плоскости щели; A - площадь

щели; θ - угол, под которым выходной зрачок объектива виден из центра плоскости щели; τ - коэффициент пропускания проекционного канала автоколлиматора.

Яркость излучения в плоскости щели определяется выражением



Р и с. 6.II. Схема фотоэлектрического автоколлимационного угломера: 1-источник излучения; 2-конденсор; 3-марка-щель; 4-светоделительный кубик; 5-объектив; 6-отрагатель; 7-призма-анализатор; 8-зеркало; 9-конденсор; 10-модулирующий диск; 11-фотоприемник

$$L = L_{изл} \tau_k,$$

где $L_{изл}$ - яркость источника излучения; τ_k - коэффициент пропускания конденсатора.

Таким образом,

$$\Phi = \pi \tau \tau_k A L_{изл} \sin^2 \theta.$$

Поток излучения, выходящий из объектива, попадает на отражатель и возвращается затем к объективу, который формирует в фокальной плоскости приемного канала автоколлимационное изображение щели. Так как из-за конечных размеров щели пучок лучей на входе объектива обладает расходимостью, а размеры отражателя, как правило, меньше размеров сечения пучка, в системе имеются дополнительные потери энергии.

Помимо этого часть энергии может теряться из-за виньетирования отраженного пучка на входном зрачке объектива автоколлиматора при развернутом отражателе. Очевидно также, что часть энергии будет потеряна при прохождении оптических компонентов приемного канала автоколлиматора.

Потери энергии за счет влияния среды сказываются обычно лишь при работе автоколлиматоров на большие расстояния, в полевых условиях, и в нашем случае ими можно пренебречь.

С учетом сказанного поток излучения, приходящий в плоскость изображения, будет определяться выражением

$$\Phi' = \pi \tau \tau_k \tau^* \tau_p \tau_g A L_{изл} \sin^2 \theta,$$

где τ^* - коэффициент пропускания приемного канала автоколлиматора;

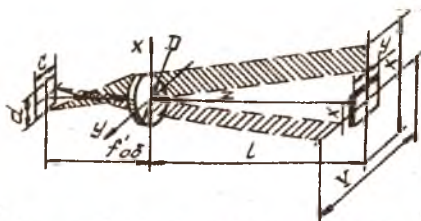
τ_p - коэффициент, учитывающий потери за счет расходимости пучка лучей; τ_g - коэффициент, учитывающий потери из-за виньетирования пучка на входном зрачке объектива.

Величину τ_p при условии равномерного распределения потока в пределах угла расходимости можно найти по формуле

$$\tau_p = \frac{x y}{X Y},$$

где x и y - размеры отражающей поверхности в плоскости, перпендикулярной оптической оси автоколлиматора; X и Y - размеры сечения пучка лучей в той же плоскости.

Если пренебречь влиянием аберраций объектива, что вполне допустимо, так как в автоколлиматорах обычно используются высококачественные объективы, значения X и Y можно найти из геометрических соотношений в соответствии с рис. 3.12, где направление хода лучей от объектива к



Р и с. 6.12. Схема формирования расходящихся пучков в проекционном канале автоколлиматора

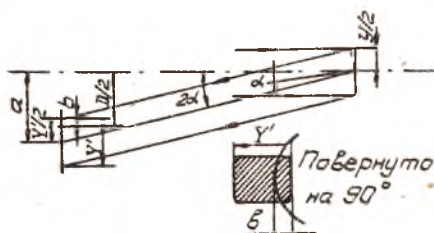
отражателю в отличие от рис. 6.11 принято слева направо, а отражатель условно показан в виде зеркала с размерами x и y :

$$X = D + \frac{dl}{f'_{об}}; \quad Y = D + \frac{cl}{f'_{об}},$$

где d и c - размеры марки-щели 3 (см. рис. 6.11), установленной в проекционном канале автоколлиматора;

$f'_{об}$ - фокусное расстояние объектива автоколлиматора; l - удаление отражателя от объектива; D - световой диаметр объектива.

Коэффициент τ_8 определяется для максимального угла разворота отражателя в том случае, если часть отраженного пучка находится за пределами светового диаметра объектива. В соответствии с рис. 6.13 величина τ_8 может быть с достаточной для практики точностью оценена по формуле



Р и с. 6.13. Схема формирования отраженных пучков в плоскости входного зрачка автоколлиматора

$$\tau_8 \approx \frac{b}{Y'} = \frac{Y'/2 - 2\alpha l/\rho + D/2}{Y'},$$

где b - перекрытие отраженного светового пучка и светового диаметра объектива; α - угол разворота отражателя, $\rho = 3438$ угл. мин; $Y' = y + cl/f'_{об}$ - размер сечения отраженного пучка в плоскости разворота отражателя в месте расположения объектива автоколлиматора.

Коэффициент пропускания оптических компонентов прибора, работающего в видимом диапазоне оптического спектра, приблизительно может быть определен по формуле

$$\tau_0 = \tau \tau^* \tau_k = 0,96^{N_k} \cdot 0,94^{N_\Phi} \cdot 0,99^{N_n} \cdot 0,99^d \cdot 0,9^{N_c} \cdot 0,85^{N_A} \cdot 0,5^{N_A},$$

где N_k - число непросветленных поверхностей воздух-крон; N_Φ - число непросветленных поверхностей воздух-флинт; N_n - число просветленных поверхностей; d - суммарная длина хода осевого луча в стеклах оптических деталей в см; N_c - число серебряных отражающих поверхностей;

N_A - число алюминированных отражающих поверхностей; N_d - число светоделительных поверхностей.

Вычисление коэффициента пропускания τ_0 удобно проводить, пользуясь табл. 5.7, по формуле

$$\tau_0 = \prod_{i=1}^n \tau_{n_i} \tau_{p_i}.$$

Т а б л и ц а 5.7

Вычисление коэффициента пропускания оптических
компонентов ОЭП

№ позиции деталей на оптической схеме	Наименование детали	Марка стекла	Число поверхностей (в том числе просветленных)	Длина хода луча в стекле, $L_{изл}$, см	Коэффициент пропускания стекла, τ_n	Коэффициент пропускания за счет отражений на границах стекло-воздух, τ_p
1	Линза	K-8	2	1,2	0,991	0,96x0,96
2	Линза	Ф-I	2(2)	0,9	0,991	0,99x0,99
3	Призма	БК-10	3(2)	5,2	0,995	0,99x0,99x0,96
...	...	...	...	...	...	...
...		...			...	...

В фокальной плоскости приемного канала автоколлиматора установлен анализатор изображения, при помощи которого может быть определено смещение автоколлимационного изображения с оптической оси и, таким образом, угловой разворот отражателя. Анализатор изображения может быть охарактеризован коэффициентом преобразования, который определяется, например, выражением

$$k_n \approx \Delta d / d_n,$$

где Δd - погрешность измерения углового рассогласования; d_n - линейный диапазон статической характеристики преобразования анализатора.

Если анализатор изображения выбран, т.е. известно значение k_a , а также требуемое отношение сигнал/шум, значение потока излучения в плоскости анализа Φ_a может быть определено по формуле

$$\Phi_a = \Phi_n \mu / k_a.$$

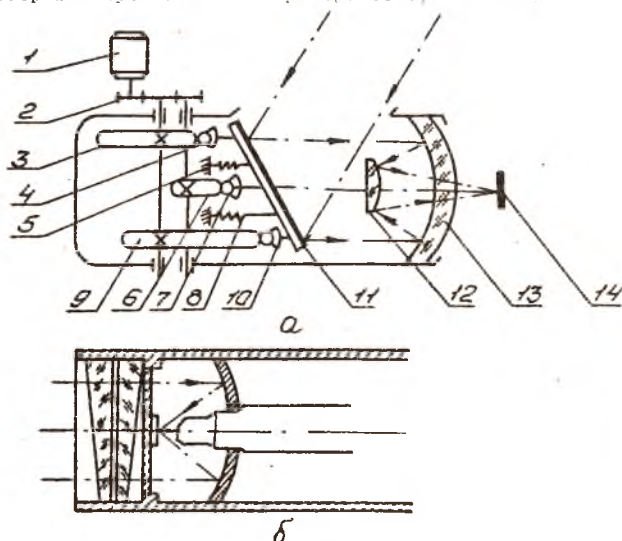
Следовательно,

$$\pi \tau_0 \tau_p \tau_g A L_{изл} \sin^2 \sigma = \Phi_n \mu / k_a.$$

$$L_{\text{изл}} = \frac{\Phi_n \mu}{\pi \tau_o \tau_p \tau_v \kappa_a A \sin^2 \theta}$$

6.4. Сканирующие оптико-механические устройства

В современных инфракрасных приборах применяют сканирующие устройства пассивного типа, которые осуществляют просмотр теплового поля по заранее заданной неизменной программе. Не исключено применение сканирующих устройств активного типа с самонастраивающейся программой просмотра поля, которая должна быть оптимальной для поиска зоны, имеющей заданные параметры. Как активные, так и пассивные сканирующие устройства могут просматривать тепловое поле непрерывно, по всем его точкам, или дискретно с разрывом времени или в пространстве.



Р и с. 3.14. Оптико-механическое устройство для сканирования по спиральной траектории (а); схема сканирования с помощью вращающихся клиньев (б): 1 - двигатель; 2 - зубчатая передача; 3 - эксцентрик; 4, 7, 10 - толкатели; 5 - пружина; 9 - эксцентрик; 11 - зеркало; 12 - выпуклое зеркало; 13 - вогнутое зеркало; 14 - плоское зеркало

Устройство для сканирования поля круглой формы по спиральной траектории изображено на рис. 3.14, а. Плоское зеркало II укреплено на валу электродвигателя так, что может наряду с вращением совершать неко-

торые отклонения в плоскости вала. Двигатель I приводит также во вращение через передачу 2 кулачок 3, скорость вращения которого значительно меньше скорости вращения зеркала. На зеркале установлен ролик, перемещающийся при вращении зеркала по кулачку и прижимающийся к поверхности кулачка пружиной. При вращении вала зеркало совершает вращательно-колебательное движение, осуществляя сканирование по спиральной траектории.

К недостаткам сканирующего устройства с вращающимися клиньями относятся нелинейность развертки во времени и размытие кружка рассеяния, обусловленное движением клиньев. Конструкция устройства представлена на рис. 6.14,6. Призмы диаметром 120 мм вращаются в одном направлении с частотами 100 и 101 с⁻¹. Это позволяет получить спиральную развертку (табл. 6.8), содержащую 50 витков. Так как призмы несимметричны, они должны быть механически сбалансированы.

Т а б л и ц а 6.8

Траектория сканирования при использовании
вращающихся клиньев

a_1/a_2	ω_1/ω_2	Уравнение траектории	Вид траектории
1	0,25...4	$\rho = 2a \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \varphi$	Розеточная
2	1...1,1	$\rho = a[5 + 4 \cos(\omega_1 + \omega_2)t]^{1/2}$	Спиральная: шаг спирали
3	1...1,1	$\rho = a[10 + 6 \cos(\omega_1 + \omega_2)t]^{1/2}$	$S = 4a \sin \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} x$ $\times (\varphi + \pi) \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \pi$; период полного цикла (свертки и развертки) $T = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2(\omega_1 + \omega_2)}$
> 4	< 0,25		Эпициклоидальная
3	> -0,25		Гипоциклоидальная

Для этой цели служит вспомогательная балансная призма, имеющая форму диска. Оправы призм связаны с валом электродвигателя мощностью 600 Вт. Объектив - зеркальный и состоит из первичного параболического и вторичного плоского зеркал. Параболическое зеркало имеет диаметр 120 мм и фокусное расстояние 100 мм. Размер изображения в фокусе 0,4 мм, что меньше размера чувствительной площадки приемника излучения (1 мм).

Время Δt определяется частотой n вращения барабана и углом обзора:
 $\Delta t = 60\gamma/2\pi n$, поэтому предельно допустимая частота вращения барабана

$$n_{\text{пред}} \leq 60\gamma/2\pi k_{\tau}\tau.$$

Линейная ширина l участка местности, просматриваемого за один оборот барабана, составляет $l = HN\gamma_{\text{мгн}}n/60$, где H - высота полета летательного аппарата; N - число зеркальных граней барабана; $\gamma_{\text{мгн}}$ - мгновенный угол зрения. Так как система обзора должна работать без пропусков, то смежные участки должны соприкасаться или перекрываться, т.е. ширина l участка, просматриваемого в единицу времени, должна быть не меньше скорости V носителя:

$$\frac{HN\gamma_{\text{мгн}}n_{\text{пред}}}{60\delta} \geq V,$$

где δ - коэффициент перекрытия ($0 < \delta < 2$).

Очевидно,

$$n_{\text{пред}} \geq \frac{60\delta V}{HN\gamma_{\text{мгн}}} \text{ мин}^{-1}.$$

Из формул видно, что существуют как верхний, так и нижний допустимые пределы частоты вращения зеркального барабана; максимальная частота, кроме того, ограничивается механическими возможностями системы и обычно не превышает 3000 мин^{-1} . Для уменьшения скорости вращения барабана стремятся увеличить число его отражающих граней. Максимальное число граней $N_{\text{макс}} = 2\pi/[0,5(\gamma + \Delta\gamma)]$, где $0,5$ получается за счет удвоения скорости отраженного луча, а $\Delta\gamma$ - дополнительный угол, который учитывает запас времени, отводимого на просмотр каждой строки.

6.5. Модуляция оптического излучения

С воздействием на излучение сигнала, несущего информацию, встречаются чаще всего в системах оптической связи, основанных на использовании лазеров. При этом возможны амплитудная, фазовая и частотная модуляции. Выбор того или иного вида модуляции зависит от характера передаваемой информации, необходимой глубины модуляции, мощности модулирующего сигнала, режима работы источника излучения (лазера) и других факторов. Наиболее распространена амплитудная модуляция, что объясняется технической простотой ее осуществления. Амплитудные модуляторы выполняют большей частью по схеме внешнего модулирующего устройства, которое модулирует уже сформированный луч. Реже встречаются амплитудные модуля -

торы, построенные по схеме внутреннего модулирующего устройства, непосредственно воздействующего на источник излучения. Основные требования, предъявляемые к модуляторам оптического диапазона, заключаются в широкополосности, малой потребляемой мощности, линейности модуляционной характеристики и большом динамическом диапазоне.

Оптические системы передачи информации могут работать в двух режимах модуляции: без поднесущей и с поднесущей. В первом режиме модуляцию производят непосредственно сигналом, несущим информацию. Во втором режиме сигнал, несущий информацию, модулирует СВЧ-колебания, которые в дальнейшем используют для модуляции оптического излучения.

Таким образом, модуляция воспринимаемого оптического потока позволяет решить следующие три задачи:

- 1) преобразовать лучистый поток от различных участков просматриваемого теплового поля в соответствующие сигналы, являющиеся функциями времени;
- 2) определить угловые координаты теплоизлучающего объекта, отличающегося по энергетическим характеристикам излучения от окружающего фона;
- 3) отфильтровать сигналы, создаваемые малоразмерным объектом, от сигналов протяженного фона, т.е. осуществить так называемую пространственную фильтрацию.

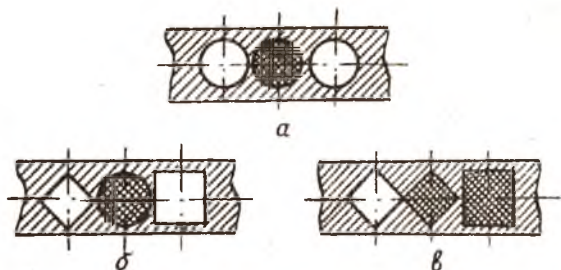
Амплитудная модуляция. Простейшим амплитудным модулятором является вращающаяся модулирующая диафрагма с определенным сочетанием прозрачных и непрозрачных элементов. Изображение источника излучения проецируется на диафрагму, и при вращении последней излучение прерывается с определенной частотой, равной произведению числа модулирующих элементов на частоту вращения диафрагмы. Форма кривой модуляции зависит от размеров изображения источника излучения, спроецированного на диафрагму, и конфигурации ее прозрачных элементов.

Предположим, что изображение источника излучения является равноярким и имеет форму окружности радиусом r , а модулирующее отверстие диафрагмы перемещается поступательно относительно его изображения (рис. 3.1б, а). Тогда кривая модуляции $f(x)$, изображенная на том же рисунке, описывается уравнением

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \left[\arccos \left[2 \left(\frac{r-x/2}{r} \right)^2 - 1 \right] - 2 \frac{r-x/2}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{r-x/2}{r} \right)^2} \right],$$

где $0 < x < 2r$ - координата, характеризующая положение модулирующего отверстия относительно изображения источника излучения; $f(x) = G(x)/G_{\max}$;

$\sigma(x)$ - текущее значение площади изображения, просматриваемой через модулирующее отверстие; $\sigma_{\max} = \pi r^2$ - максимальное значение $\sigma(x)$.



Р и с. 6.15. Амплитудная модуляция оптического излучения

Если модулирующее отверстие - квадрат со стороной $2r$, а изображение источника излучения - окружность радиусом r (рис. 6.15, а, б), то $\sigma_{\max} = \pi r^2$, $0 \leq x \leq 2r$;

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \arccos \left[2 \left(\frac{r-x}{r} \right)^2 - 1 \right] - 2 \frac{r-x}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{r-x}{r} \right)^2} \right\}.$$

Модулирующее отверстие - квадрат со стороной $r\sqrt{2}$, изображение источника излучения - окружность радиусом r (рис. 6.15, в):

$$f(x) = \frac{\pi}{8} + \frac{1}{4r^2} \left[(r-x)^2 - (r-x)\sqrt{r^2 + 2rx - x^2} \right] - \frac{1}{2} \arcsin \frac{(r-x)}{\sqrt{2}r},$$

$$0 \leq x \leq r(3 - \sqrt{2});$$

$$f(x) = \frac{1}{4r^2} (x-r)^2 - \frac{3}{\pi} + \arcsin \frac{(3r-x)}{\sqrt{2}r} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{(x-r)}{\sqrt{2}r} + \\ + \frac{(3r-x)}{2r^2} \sqrt{6rx - x^2 - 7r^2} + \frac{1}{4r^2} (x-r) \sqrt{r^2 + 2rx - x^2},$$

$$r(3 - \sqrt{2}) \leq x \leq 2r.$$

Модулирующее отверстие - квадрат со стороной $r\sqrt{2}$, изображение источника излучения - квадрат со стороной $2r$

$$f(x) = x^2/2r^2 \quad (0 \leq x \leq r);$$

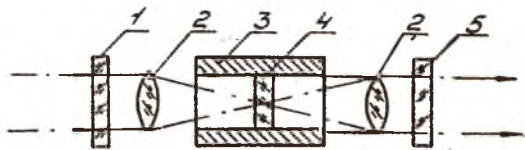
$$f(x) = 1 - (2r-x)^2/2r^2 \quad (r \leq x \leq 2r).$$

Модулирующее отверстие и изображение источника излучения - квадрат со стороной $r\sqrt{2}$

$$f(x) = x^2/4r^2 \quad (0 \leq x \leq 2r).$$

В некоторых случаях используется поляризация оптического излучения. Простейший поляризатор (призма Николя) состоит из двух половин кристалла исландского шпата ($n = 1,559$), склеенных смолой канадской сосны (рис. 6.16). Луч

света, падающий на такой кристалл, расщепляется на обыкновенный и поляризованный. Первый луч испытывает полное внутреннее отражение на слое канадского бальзама ($n = 1,549$), а второй проходит распил и на выходе из кристалла является



Р и с. 6.16. Схема амплитудного модулятора, основанного на использовании магнитооптического эффекта: 1 - поляризатор; 2 - линза; 3 - соленоид; 4 - магнитооптическая пластина (железо-иттриевый гранат $Y_3Fe_5O_{12}$ или трехбромистый хром $CrBr_3$); 5 - анализатор

плоскополяризованным. Призмы Николя можно использовать также для определения плоскости поляризации поляризованного света; в этом случае они называются анализаторами.

Обозначим через β - угол между поляризатором и анализатором амплитудного модулятора, тогда после прохождения излучением магнитооптической пластины плоскость поляризации повернется на угол $\beta' = \beta - \Psi$. Составляющая вектора электрического поля световой волны вдоль направления анализатора пропорциональна $\cos \beta'$, а интенсивность излучения, прошедшего через анализатор, пропорциональна квадрату амплитуды вектора электрического поля, т.е.

$$I = I_0 \cos^2(\beta - \Psi).$$

Если поляризатор и анализатор скреплены ($\beta = \pi/2$), то $I = I_0 \sin^2(C_H H_m l)$.

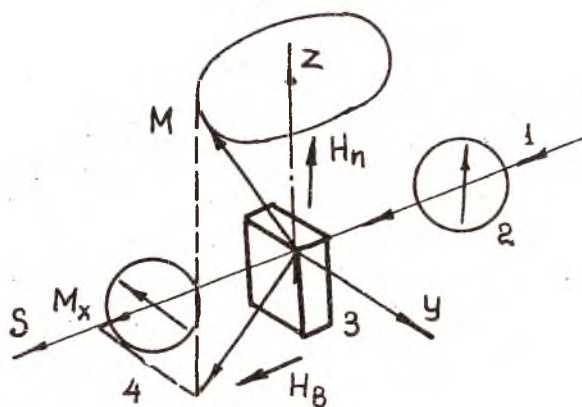
Глубина модуляции M связана с амплитудным значением угла поворота $\Psi_{\max}$ следующим соотношением:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \cos 2\Psi_{\max}.$$

Основным недостатком рассмотренного модулятора является его узкополосность, обусловленная большой индуктивностью соленоида. Расши-

рение рабочего диапазона путем использования высокочастотных резонаторов невозможно, так как потребные для модуляции напряженности магнитного поля весьма велики. Например, для модуляции с глубиной 20% амплитуда напряженности переменного магнитного поля при использовании пластины из железо-иттриевого граната должна быть порядка 2000 Э (160 кА/м). Однако это не исключает полностью возможности использования амплитудных модуляторов рассматриваемого типа на высоких и сверхвысоких частотах.

На рис. 6.17 изображена схема модулятора, использующего эффект Фарадея и явление парамагнитного резонанса. Сущность этого явления заключается в том, что если частота СВЧ-колебаний близка к частоте прецессии магнитного момента атома вокруг постоянного магнитного поля, то СВЧ-колебания синхронизируют начальную фазу прецессии элементарных магнитных моментов в соответствии с собственной начальной фазой. Поэтому в плоскости, перпендикулярной вектору напряженности постоянного магнитного поля, появляется намагниченность, вектор которой вращается с частотой прецессии. Если в этой же плоскости распространяется излучение, то составляющая намагниченности вдоль направления излучения изменяется частотой прецессии.



Р и с. 6.17. Схема амплитудного модулятора, использующего явление парамагнитного резонанса: 1 — лазерный луч; 2, 4 — поляризационные призмы Николя; 3 — парамагнитный кристалл

Модулятор состоит из двух поляризационных призм Николя 2 и 4, между которыми расположен парамагнитный кристалл 3, и магнитной системы, создающей два скрещенных магнитных поля — постоянное H_n и высокочастотное H_v . Плоскости поляризации призм Николя ортогональны, поэтому

при отсутствии магнитного поля система непрозрачна. В случае наложения скрещенных магнитных полей (постоянного и высокочастотного) и определенного соотношения между величиной H_z и величиной H_n наступает резонанс.

Под влиянием синусоидального изменяющегося магнитного поля H_z вектор намагниченности M начинает прецессировать, что вызывает вращение плоскости поляризации луча I , проходящего через кристалл, и модуляцию выходного излучения.

В качестве парамагнетика используется кристалл этилсульфат неодима, который помещен соосно в цилиндрическом резонаторе. Линейно поляризованный луч проходит вдоль оси симметрии кристалла. Вектор напряженности СВЧ поля направлен вдоль направления распространения излучения и ортогонален вектору постоянного магнитного поля.

В некоторых опытных образцах резонансных модуляторов применяли такие ферромагнетики (кристаллы железо-иттриевого граната и трехбромистого хлора) и кристаллы рубина с охлаждением жидким гелием до температуры 1,5 К. При небольшой мощности управляющего сигнала (около 10 мВт) глубина модуляции оптического излучения видимого диапазона равнялась 10%.

Резонансная частота модуляции определяется свойствами кристалла и величиной постоянного магнитного поля, но практически во всех случаях она близка к 10 ГГц. Поэтому даже при СВЧ-модуляции резонансные модуляторы являются узкополосными с полосой пропускания порядка нескольких мегагерц. К недостаткам резонансных модуляторов относится также интенсивный нагрев рабочего вещества (за счет резонансного поглощения энергии СВЧ-колебаний), в результате чего возникают упругие напряжения и появляется двойное лучепреломление. Для отвода тепла, выделяющегося при работе модулятора, требуются громоздкие криостаты, поэтому в настоящее время ведутся поиски веществ, способных работать без охлаждения при комнатной температуре. Такими веществами, в частности, являются фтористый барий с примесью цезия и двуводородистый фосфор.

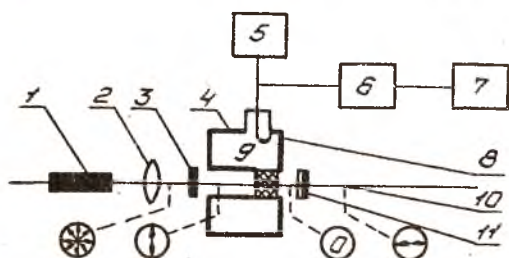
Амплитудные модуляторы, использующие магнитооптический эффект, отличаются по своим параметрам другим типам амплитудных модуляторов, в частности модуляторам, основанным на использовании электромагнитного эффекта. Этот эффект открыт Керром в 1875 г. и заключается в возникновении двулучепреломления изотропной среды (газ, жидкость, твердое тело), помещенной в электрическое поле. Дипольные молекулы среды под воздействием электрического поля приобретают ориентацию, вследствие чего среда становится подобной монокристаллу, оптическая ось которого параллельна вектору напряженности E электрического поля.

Наряду с квадратичным электрическим эффектом существует линейный эффект, возникающий лишь в твердых телах, кристаллическая структура которых не имеет центра симметрии (эффект Поккельса). Для целей модуляции используют как эффект Керра, так и эффект Поккельса.

Среди электрооптических материалов наиболее распространены одноосные кристаллы, относящиеся к кристаллографическому классу D_{2d} (первично кислый фосфат алюминия $NH_4H_2PO_4$ - АДР, первично кислый фосфат калия KH_2PO_4 - КДР, дейтерированные дигидрофосфаты калия KD_2PO_4 и рубидия RbD_2PO_4 , дигидрофосфат рубидия RbH_2PO_4 и др.), а также монокристаллы, относящиеся к кристаллографическому классу Td (цинковая обманка ZnS , хлористая медь $CuCl$, уротропин $(CH_2)_6N_4$, селенид цинка $ZnSe$, арсенид галлия $GaAs$, фосфид галлия GaP и др.).

Схема модулятора, основанная на использовании электрооптического эффекта в кристаллах, представлена на рис. 6.18. Лазер 1 и собирающая

линза 2 или система линз создает коллимированный кохерентический луч света, направленный перпендикулярно к поверхности поляризатора 3. После поляризатора плоскополяризованный луч света проходит через электрооптический кристалл 9, помещенный в объемный резонатор, и через анализатор 10. Главные плоскости поляризатора и анализатора взаимно перпендикулярны



Р и с. 6.18. Амплитудный модулятор, основанный на использовании электрооптического эффекта: 1 - лазер; 2 - оптическая система; 3 - поляризатор; 4 - полость, заполненная воздухом; 5 - измеритель мощности; 6 - СВЧ-генератор; 7 - генератор звуковой частоты; 8 - коух; 9 - кристалл; 10 - анализатор; 11 - четвертьволновая пластинка

и составляют с направлениями осей кристалла некоторый угол. Вектор напряженности электрического поля в кристалле направлен слева направо.

Приведем параметры двух типовых амплитудных модуляторов, использующих электрооптический эффект в твердых телах. В первом модуляторе материал кристалла первично кислый фосфат аммония; размеры кристалла 19x89 мм; резонансная частота объемного резонатора (частота модуляции) 850 МГц; входная мощность на сопротивлении 50 Ом - 8 Вт; полоса частот модуляции 2 МГц; глубина модуляции 30%; диаметр апертурной диафрагмы 6,35 мм; рабочая температура 25°C.

Во втором модуляторе материал кристалла - дигидрофосфат калия и

срезы; размеры кристалла $25 \times 25 \times 12,5$ мм; поверхности кристалла имеют просветляющее защитное покрытие; максимально допустимое напряжение 9 кВ; собственная резонансная частота 250 МГц; емкость 10 пФ; время нарастания импульса 10 нс; импульсная мощность управляемого оптического излучения 10 МВт; диаметр апертурной диафрагмы 16 мм; рабочая температура 30°C. Модулятор заключен в тефлоновый корпус диаметром 80 мм и длиной 38 мм.

Основные параметры электрооптических материалов, применяемых в амплитудных модуляторах, приведены в табл. 6.9. Наиболее широко используют первично кислый фосфат аммония (кристалл АФР) - бесцветный, прозрачный, пьезоэлектрический кристалл, который по хрупкости и растворимости в воде можно сравнить с поваренной солью. Кристалл АФР в случае медленного изменения температуры может работать при 90°C. При более высокой температуре начинается выделение аммония. От быстрых изменений температуры кристалл разрушается. Рабочая температура модулятора с кристаллом обычно принимается не выше 40°C во избежание искажений, вызываемых упругими деформациями.

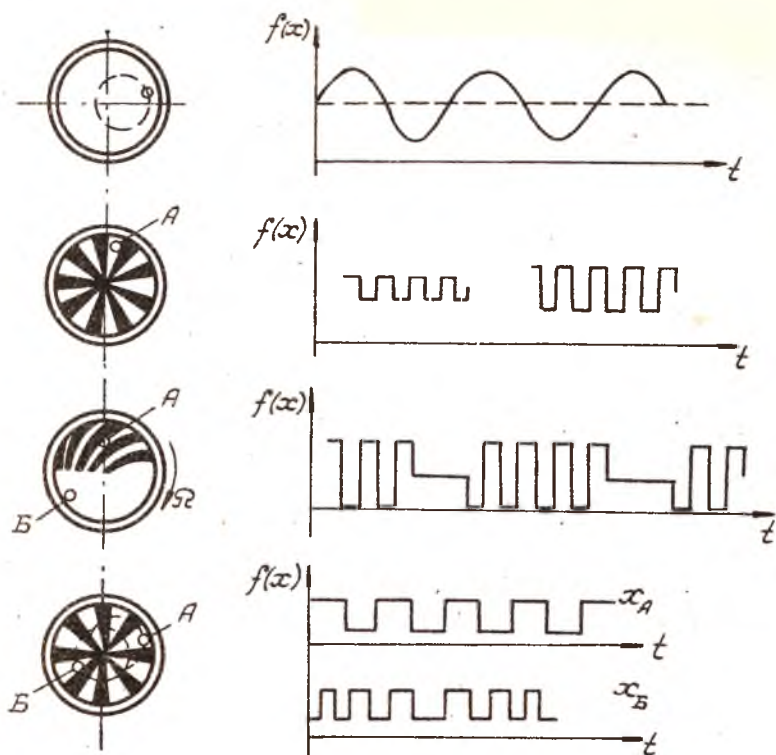
Фазовая модуляция. Метод фазовой модуляции, основанный на использовании модулирующих диафрагм, позволяет по разности фаз сигналов получить точную информацию о направлении на источник излучения. Этот метод широко применяется в современных инфракрасных системах автоматического сопровождения движущихся объектов.

Модулирующие диафрагмы для фазоимпульсной модуляции оптического излучения и соответствующие модуляционные характеристики представлены на рис. 6.10. Диафрагма I выполнена в виде круга, имеющего один прозрачный и один непрозрачный секторы равной площади. При вращении диафрагмы изображение источника излучения попеременно падает на прозрачный и непрозрачный секторы. Модуляционная характеристика представляет собой последовательность импульсов, амплитуда которых постоянна, частота равна частоте вращения диафрагмы, а фаза определяется положением изображения относительно центра диафрагмы. Опорный сигнал, необходимый для измерения фазового сдвига, получают при помощи генератора опорного напряжения (ГОН). В простейшем случае ГОН представляет собой небольшой магнит, укрепленный на периферии диафрагмы, и одну или несколько катушек. Каждый раз при прохождении магнита вблизи катушки генерируется импульс напряжения, который используют как опорный при измерении фазы. Для этой же цели применяют миниатюрные генераторы переменного тока, роторы которых вращаются синхронно и синфазно с модулирующей диафрагмой.

Частотная модуляция. Модулирующие диафрагмы, предназначенные для определения положения изображения точечного источника излучения по ме-

Основные параметры электрооптических материалов

Наименование материала	Электрооптические постоянные, м/в			Коэффц. преломления, n_0	Диэлект-рическая постоянная, ϵ	Тангенс угла электрических потерь, $(\text{tg} \delta)$	Напряж. полупроводного смещения, кВ
	$\Gamma \cdot 10^{-12}$	$\Gamma \cdot 10^{-12}$	$\Gamma \cdot 10^{-12}$				
	Тетрагональная структура материала						
Дигидрофосфат калия KH_2PO_4 (КДР)	8,6	9,7	1,468	20,2	0,0005 (при 0,1 ГГц)	8	
Дигидрофосфат аммония $NH_4H_2PO_4$ (АДР)	24,5	5,5	1,469	14,0	0,025 (при 36 ГГц)	10	
Дидейтерофосфат калия KD_2PO_4 (ДКОР)	8,8	26,4	1,470	50	0,025 (при 10 ГГц)	—	
Дигидроарсенид калия KH_2AsO_4 (КДА)	12,5	10,9	1,520	21	0,0075 (при 10 ГГц)	—	
Дигидроарсенид рубидия RbH_2AsO_4 (РДА)	—	13,0	1,520	27	0,003 (при 10 ГГц)	—	
Кубическая структура							
Хлористая медь $CuCl$	1,6-1,8	—	1,933	8,3	0,0001 (при 5 ГГц)	6,2	
Селенистый цинк $ZnSe$	2,0-2,1	—	2,364	12,5	0,002 (при 5 ГГц)	12,4	
Селенистый цинк $ZnSe$	2,0	—	2,660	8,1-91	—	—	
Уротропин $(CH_2)_6N_4$	—	—	1,591	—	—	14,9	
Тексамин	2,2	—	—	—	0,003 (при 1 ГГц)	8,3	
Оксид цинка ZnO	—	—	2-2,12	8,15	—	—	
Сернистый цинк ZnS	1,2-2,1	—	2,709	16,0	—	—	
Теллуристый цинк $ZnTe$	3,95-4,3	—	2,91-3,1	10,1	—	—	
Бромистая медь $CuBr$	0,85	—	2,1	—	—	—	
Фосфид галлия GaP	0,5	—	3,3	10-12	—	—	
Арсенид галлия $GaAs$	1,3-1,5	—	3,3-3,6	10,9-12,5	—	—	
Сернистый кадмий CdS	—	—	2,73	7,7-7,8	—	—	



Р и с. 6.19. Фазовая модуляция оптического излучения

тому частотно-импульсной модуляции, изготавливают в виде кольцевых зон, составленных из набора чередующихся прозрачных и непрозрачных секторов.

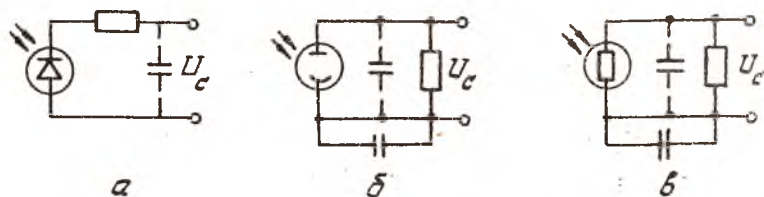
В простейшем случае диафрагма имеет две зоны с разным числом модулирующих секторов. При смещении изображения источника излучения вдоль оси z относительно точки пересечения этой оси с линией раздела кольцевых зон лучистый поток, проходящий через диафрагму, модулируется с той или иной частотой в зависимости от того, на какой из двух зон находится изображение. Диафрагма может иметь и большее число кольцевых зон. Количество модулирующих секторов обычно удваивается при каждом переходе от внутренней зоны к внешней.

6.6. Выбор лазеров и фотоприемных устройств

Параметры применяемых лазеров приводятся в приложении 9.

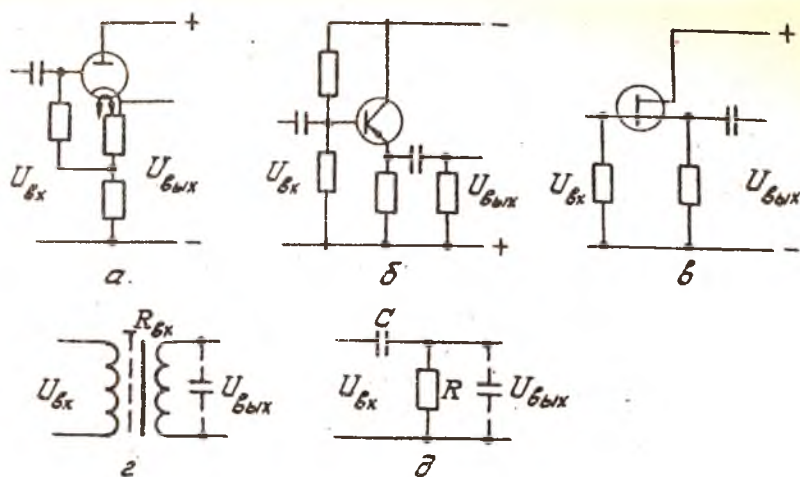
Фотоприемные устройства выбираются в зависимости от источника излучения: для галогенного ($\lambda = 0,4 \dots 3$ мкм) - кадмиевые на основе CdS , CdSe для ламп накаливания ($\lambda = 0,9 \dots 1,2$ мкм) - кремниевые, германиевые с высоким быстродействием. Обычно интенсивность излучения ограничена - невелика, так как засветка увеличивает темновой ток. Телевизионные трубки - диссектор, суперортикон и ортискон позволяют проводить преобразование потока при одновременном анализе изображения. Приборы с зарядовой связью имеют меньшие размеры, чем телевизионные трубки. Характеристики фотоприемных устройств приведены в приложении 9.

На рис. 6.20 приводятся схемы включения фотоприемных устройств, на рис. 6.21 - согласующие каскады фотоприемных устройств, а на рис. 6.22 - обобщенная, структурная схема фотоприемного устройства на основе фоторезистора.

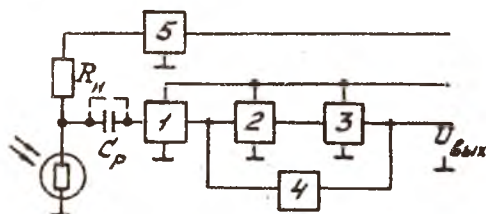


Р и с. 6.20. Типовые схемы включения приемников излучения: а - приемник-генератор ЭДС (термоэлемент, фотодиод, работающий в гальваническом режиме); б - приемник-генератор тока (БЭУ, фотоэлемент и т.п.); в - приемник-генератор измерения сопротивления (фоторезистор, болометр)

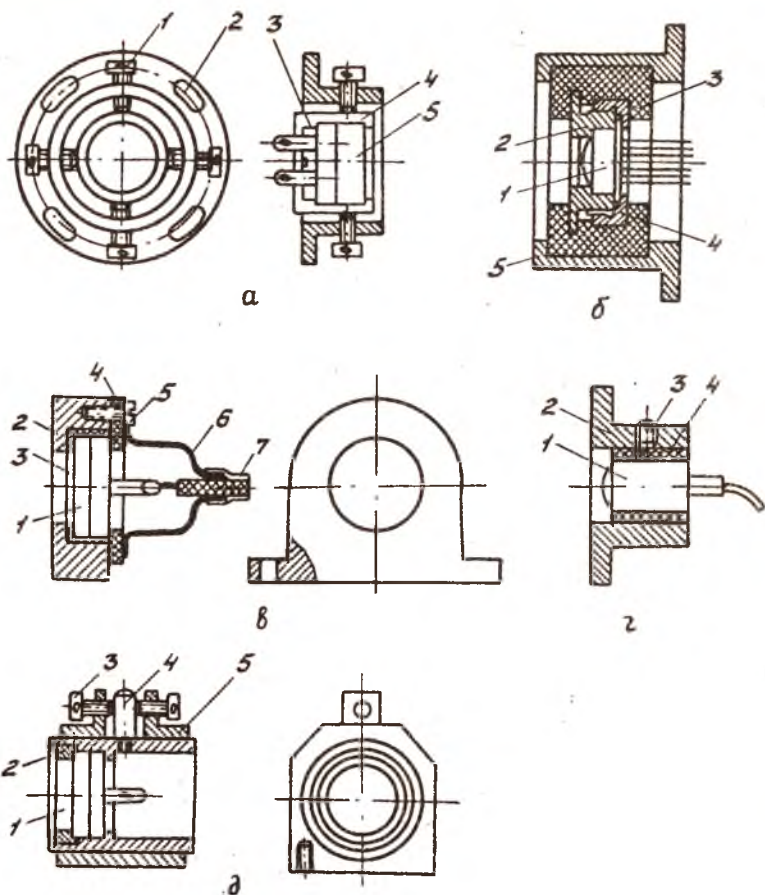
Конструкции узлов крепления фотоприемных устройств приведены на рис. 6.23. Режимы криостатирования фотоэлементов и теплофизические характеристики сжиженных газов описаны в табл. 6.10, 6.11, а примеры конструкций однокаскадных микрохолодильников изображены на рис. 6.24.



Р и с. 6.21. Согласующие каскады фотоприемных устройств:
а - катодный повторитель; б - эмиттерный повторитель; в -
источниковый повторитель; г - трансформаторная цепь; д -
RC-цепь



Р и с. 6.22. Обобщенная структурная схема
ФПУ на основе фоторезистора: 1 - согласо-
ующий каскад; 2 - усилитель; 3 - выходной
каскад; 4 - блок автоматической регулиров-
ки усиления; 5 - фильтр



Р и с. 6.23. Конструкции узлов крепления: а - конструкция узла крепления координатно-чувствительного приемника излучения: 1 - болт, 2 - отверстие, 3 - выводы, 4 - гайка, 5 - фото диод; б - конструкция узла крепления приемника излучения, чувствительного к вибрации: 1 - призмичек излучения, 2 - справа, 3 - вкладыш из пенополиуретана, 4 - зажимное кольцо, 5 - корпус; в - узел крепления фото диода с удлиненным выводом: 1 - фото диод, 2 - корпус, 3 - винт, 4 - втулка, 5 - кольцо, 6 - винт, 7 - корпус, 8 - вывод; г - узел крепления малогабаритного фото диода в металлическом корпусе: 1 - фото диод, 2 - корпус, 3 - винт, 4 - прокладка; д - конструкция узла крепления с осевым перемещением приемника излучения: 1 - приемник излучения, 2 - зажимное кольцо, 3 - винт, 4 - проводок, 5 - стойка, 6 - справа

Т а б л и ц а 6.10

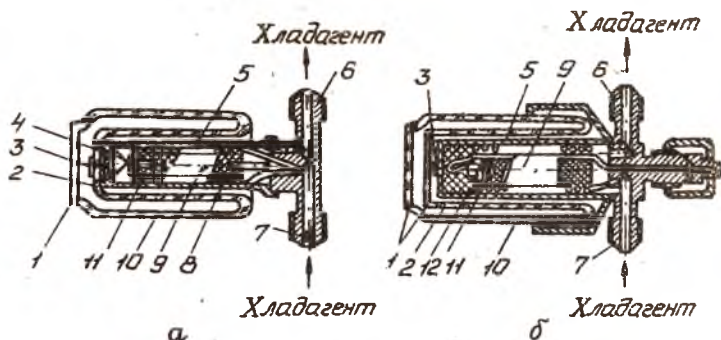
Режимы криостатирования фотоприемных устройств

№ п/п	Тип фотоприемного устройства	Длина волны λ , мкм	Темпера- тура охлаждения Т, К	Рабочий тем- пературный интервал ΔT , К
1.	Фоторезисторы из Ge, легированного Cd, Cu, Zn, Sn, Hg, Cu	40 25	4,2 10...35	0,8 1,0
2.	Фоторезистор и фотод CdHgTe	15	80	0,5
3.	Фоторезистор из InSb	6	77	
4.	Фотодиоды из InSb, фоторезисторы из PbS	4	80...150	5,0

Т а б л и ц а 6.11

Теплофизические характеристики сжиженных газов

№ п/п	Наименование газов	Температура кипения при давлении 0,1 МПа Т, К	Плотность, ρ , г/см ³	Используемый температурный интервал ΔT , К
1.	Гелий	4,22	0,124	—
2.	Неон	27,10	1,206	13...24
3.	Азот	77,86	0,804	43...63
4.	Метан	111,67	0,426	60...90
5.	Диоксид углерода	194,70	1,180	124...190



Р и с. 6.24. Примеры конструкции однокаскадных микрохолодильников с расположением приемника излучения: а - в вакуумной полости; б - в газонаполненном объеме: 1 - окно; 2 - микроохладитель; 3 - площадка приемника излучения; 4 - теплопроводящая паста; 5 - держатель; 6 - выходной штуцер; 7 - входной штуцер; 8 - металлическая трубка; 9 - стержень; 10 - сосуд Дьюара; 11 - коллектор; 12 - накопитель

Библиографический список

1. Богомолов П.А., Сидоров В.И., Усольцев И.Ф. Приемные устройства ИК-систем. М.: Радио и связь, 1987. 208 с.
2. Вагнер Е.Т. Лазеры в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1982. 164 с.
3. Воробьев В.И. Оптическая локация для радиоинженеров. М.: Радио и связь, 1983. 177 с.
4. Вычислительная оптика: Справочник /Под общ.ред. М.М.Русинова Л.: Машиностроение, 1984. 423.
5. Захаров В.М., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследование климата. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 320 с.
6. Зуев В.Е., Тазеев В.Я. Лазерные навигационные устройства. М.: Радио и связь, 1987. 160 с.
7. Источники и приемники излучения /Р.Г.Ишанин, Э.Д.Панков, А.Л.Андреев и др. СПб.: Политехника, 1991. 240 с.
8. Климов Ю.М. Прикладная лазерная оптика. М.: Машиностроение, 1985. 123 с.
9. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов.радио, 1978. 400 с.

10. Лазерная локация /под ред. Н.Д.Устинова. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.
11. Лазерная техника в мелиоративном строительстве /А.Н.Ефремов, А.К.Камальдинов, А.И.Мармалаев и др. М.: Агропромиздат, 1989. 223 с.
12. Лукин А.П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
13. Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. М.: Наука, 1991. 400 с.
14. Мажерис Р.М. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
15. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
16. Петров В.П. Контроль качества и испытание оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1985. 222 с.
17. Погарев Г.В., Киселев Н.Г. Оптические калибровочные задачи. Л.: Машиностроение, 1989. 230 с.
18. Поскачёв А.А., Чубаров Е.П. Оптико-электронные системы измерения температуры. М.: Энергоатомиздат, 1983. 248 с.
19. Проектирование оптико-электронных приборов /Под ред. Ю.Г.Якушенкова. М.: Машиностроение, 1981. 263 с.
20. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Инфракрасные лазерные локационные системы. М.: Воениздат, 1987. 175 с.
21. Сафронов Ю.П., Андрианов Ю.Г. Инфракрасная техника и космос. М.: Сов. радио, 1978. 248 с.
22. Серегин В.В., Кукулиев Р.М. Лазерные гиометры и их применение. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
23. Сигналы и помехи в лазерной локации /Под ред. В.Е.Зуева. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
24. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) /Под общ.ред. А.Н.Писаревского и А.Ф.Чернявского. Л.: Машиностроение, 1983. 424 с.
25. Справочник конструктора оптико-механических приборов /Под общ. ред. В.А.Ланова. Л.: Машиностроение, 1980. 742 с.
26. Справочник по лазерной технике /Под ред. Ю.В.Байбородина, Л.З.Криксунова, Ф.Н.Литвиненко. Киев: Техника, 1973. 288 с.
27. Справочник технолога-оптика /Под ред. С.М.Кузнецова и М.А.Скацова. Л.: Машиностроение, 1983. 414 с.
28. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. 191 с.

29. Федоров Б.Ф. Лазеры. Основы устройства и применение. М.: ДОСААФ, 1988. 190 с.

30. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1989. 360 с.

31. Ямбаев Х.К. Геодезический контроль прямолинейности и соосности в строительстве. М.: Недра, 1986. 264 с.

PROGRAM PUNKT

```

C*****
C* ПРОГРАММА АНАЛИЗА УРОВНЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКИ *
C* ОБЪЕКТА *
C*****
    LOGICAL*1 IBYTE, ITEXT(4), IAR(256), IAR1(256)
    REAL TEXT
    EQUIVALENCE (TEXT, ITEXT(1))
    COMMON ITEXT
    DATA IX, IY/128, 128/
    CALL CLRGR
    CALL REFMEM(0)
    DO 5 L=1, 256
    IAR1(L)=0
    TYPE 10
10  FORMAT(////, 15X, 'ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ОСВЕЩЕННОСТИ
    1'///, 'ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКИ ОБЪЕКТА ПО ОТНОШЕНИЮ
    2 К МАКСИМАЛЬНОМУ ЗНАЧЕНИЮ.'
    3 //5X, '(КООРДИНАТЫ ТОЧКИ ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ ПОЛОЖЕНИЕМ
    4 КУРСОРА, '/2X, 'УПРАВЛЕНИЕ КОТОРЫМ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ
    5 ПРИ ПОМОЩИ КЛАВИШ "1-9")')
15  TYPE 20
20  FORMAT('/' KOOPДИНАТЫ ТОЧКИ?')
    CALL CURS(IX, IY)
    CALL RDB(0, IX, IY, IBYTE)
    LINE=IBYTE
    IF (LINE.LT.0) LINE=LINE+256
    R=FLOAT(LINE)/255
    ENCODE(4, 25, TEXT) R
25  FORMAT(F4.2)
    DO 30 IY1=244, 255
    CALL RDSTR(0, 0, 0, IY1, IAR, 256)
    CALL WRTSTR(2, 0, 0, IY1, IAR, 256)
30  CALL WRTSTR(0, 0, 0, IY1, IAR1, 256)
    CALL TEXT1(1, 2, IX, IY)
    TYPE 35
35  FORMAT(' ПРОДОЛЖАТЬ ? (0-НЕТ, 1-ДА)', #)
    ACCEPT *, 1
    IF (I.EQ.0) GOTO 45
    CALL TEXT1(0, 0, IX, IY)
    DO 40 IY1=244, 255
    CALL RTSTR(2, 0, 0, IY1, IAR, 256)
40  CALL WRTSTR(0, 0, 0, IY1, IAR, 256)
    GOTO 15
45  CONTINUE
    STOP
    END
    SUBROUTINE TEXT1(ICOL1, ICOL2, IX, IY)
    LOGICAL*1 ITEXT(4)
    COMMON ITEXT
    CALL TEXTG(IX-2, IY-3, ICOL1, '+', 1)
    CALL TEXTG(10, 246, ICOL2, 'УРОВЕНЬ ОСВЕЩЕННОСТИ В ТОЧКЕ "+":'
    1, 33)
    CALL TEXTG(208, 246, ICOL2, ITEXT, 4)
    RETURN
    END

```

```

C*****
C*      ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ОБЪЕКТА *
C*****
LOGICAL*1 ITEXT1(4), ITEXT2(4), IAR(256), IAR1(256)
REAL TEXT1, TEXT2
EQUIVALENCE (TEXT1, ITEXT1(1)), (TEXT2, ITEXT2(1))
COMMON ITEXT1, ITEXT2
CALL REFMEM(0)
DO 5 L=1, 256
5   IAR1(L)=0
    TYPE 10
10  FORMAT(////, 10X, ' ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
    1 ЦЕНТРА')
    TYPE 20
20  FORMAT('/' ПОРОГ ? (0-1)', #)
    ACCEPT *, POR
    POR=POR+255
    S=0.0
    XSUM=0.0
    YSUM=0.0
    DO 25 IY=1, 256
    CALL RDSTR(0, 0, 0, IY-1, IAR, 256)
    DO 25 IY=1, 256
    A=IAR(IX)
    IF (A.LT.0) A=A+256
    IF (A.LT.POR) GOTO25
    S=S+A
    XSUM=XSUM+A*(IX-1)
    YSUM=YSUM+A*(IY-1)
25  CONTINUE
    IXEN=XSUM/S
    IYEN=YSUM/S
    ENCODE(3, 30, TEXT1) IXEN
    ENCODE(3, 30, TEXT2) IYEN
30  FORMAT(13)
    DO 35 IY1=244, 255
    CALL RDSTR(0, 0, 0, IY1, IAR, 256)
    CALL WRDSTR(2, 0, 0, IY1, IAR, 256)
35  CALL WRDSTR(0, 0, 0, IY1, IAR1, 256)
    CALL TEXTS(1, 2, IXEN, IYEN)
    DO 45 IY=244, 255
    CALL RDSTR(2, 0, 0, IY1, IAR, 256)
45  CALL WRDSTR(0, 0, 0, IY1, IAR, 256)
    GOTO15
45  CONTINUE
    STOP
    END
    SUBROUTINE TEXT1(ICOL1, ICOL2, IX, IY)
    LOGICAL*1 ITEXT1(4), ITEXT2(4)
    COMMON ITEXT1, ITEXT2
    CALL TEXTG(IX-2, IY-3, ICOL2, 'КООРДИНАТЫ X= ', Y=', 21)
    CALL TEXTG(124, 246, ICOL2, ITEXT1, 3)
    CALL TEXTG(166, 246, ICOL2, ITEXT2, 3)
    RETURN
    END

```

```

PROGRAM WR
C*****
C* ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО *
C* ЦЕНТРА СИСТЕМЫ ПЛОСКИХ ТЕЛ ПРИ ЕЕ ПОВОРОТЕ НА ПРОИЗВОЛЬНЫЙ *
C* УГОЛ *
C*****
LOGICAL*1 IAR(256), IAR1(256), ITEXT1(4), ITEXT2(4)
INTEGER X(10,10), Y(10,10), IUGL(10), XN(10,10), YN(10,10)
INTEGER XO, YO
DIMENSION ALFNA(10), ALFKA(10), ALFNM(10), ALFKM(10)
COMMON XN, YN, IAR1, /BLK1/ ITEXT1, ITEXT2, /BLK2/ IXEN, IYEN
DATA XO, YO/128, 128/, PI/3.1415926/
CALL CLRGR
CALL REFMEM(0)
TYPE 10
10 FORMAT(/////15X, 'ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕКТОРА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ' //
110X, 'ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА СИСТЕМЫ ПЛОСКИХ ТЕЛ')
12 CALL CLR(4)
CALL CLR(6)
CALL CLRGR
DO 13 NN=1,10
DO 13 MM=1,10
X(NN,MM)=0
Y(NN,MM)=0
XN(NN,MM)=0
13 XN(NN,MM)=0
TYPE 15
15 FORMAT (' КОЛИЧЕСТВО ЭЛЕМЕНТОВ?', #)
ACCEPT *, N
DO 45 LI=1, N
TYPE 20, LI
20 FORMAT(/2X, 12' ЭЛЕМЕНТ: КОЛИЧЕСТВО ВЕРШИН? (2-10) ', #)
ACCEPT *, IUGL(LI)
TYPE 25
25 FORMAT (' АЗИМУТАЛЬНЫЙ УГОЛ НАКЛОНА? (-90 - 90)', #)
ACCEPT *, ALFA
TYPE 27
27 FORMAT (' МЕСТНЫЙ УГОЛ НАКЛОНА? (-90 - 90)', #)
ACCEPT *, ALFM
ALFNA(LI)=ALFA*PI/180
ALFNM(LI)=ALFM*PI/180
IUROWN=165.*COS(ALFNA(LI))*COS(ALFNM(LI))+90
DO 30 II=1, 256
30 IAR1(II)=IUROWN
DO 40 I=1, IUGL(LI)
TYPE 35, 1
35 FORMAT(' КООРДИНАТЫ', 12, ' ВЕРШИНЫ?')
CALL CURS(XO, YO)
X(LI, I)=XO
Y(LI, I)=YO
XN(LI, I)=XO
40 YN(LI, I)=YO
LUGL=IUGL(LI)
CALL VECT1(200, LI, LUGL)
CALL MAXMIN(4, LUGL, LI)
45 CONTINUE
CALL REFMEM(4)
CALL ENCN(4, 236, 1)

```

```

47  TYPE 50
50  FORMAT(/' УГОЛ ПОВОРОТА ПО АЗИМУТУ?', #)
    ACCEPT *, UGLWRA
    TYPE 52
52  FORMAT(' УГОЛ ПОВОРОТА ПО УГЛУ МЕСТА?', #)
    ACCEPT *, UGLWRM
    UWRA=UGLWRA*PI/180
    UWRM=UGLWRM*PI/180
    TYPE *, ' КООРДИНАТА ОСИ ВРАЩЕНИЯ?'
    CALL CURS(XO, YO)
    IXWR=XO
    IYWR=YO
    DO 60 IEL=1, N
      ALFKA( IEL)=ALFNA( IEL)+UWRA
      OTNA=COS( ALFKA( IEL))/COS( ALFNA( IEL))
      ALFKM( IEL)=ALFNM( IEL)+UWRM
      OTNM=COS( ALFKM( IEL))/COS( ALFNM( IEL))
      DO 55 IU=1, IUGL( IEL)
        XN( IEL, IU)=(X( IEL, IU)-IXWR)*OTNA+IXWR
55      YN( IEL, IU)=(Y( IEL, IU)-IYWR)*OTNA+IYWR
      INT=165.*COS( ALFKA( IEL))*COS( ALFKM( IEL))+90
      LUGL=IUGL( LI)
      CALL VECT1(200, IEL, LUGL)
      DO 62 LM=1, 256
62      IAR1(LM)=INT
      CALL MAXMIN(4, LUGL, IEL)
60      CONTINUE
      CALL REFMEM(6)
      CALL ENCN(6, 246, 2)
      TYPE 65
65  FORMAT(' ВВОД ОБЪЕКТА-1, ПОВОРОТ-2, ВЫХОД ИЗ ПРОГРАММЫ-3=>', #)
      ACCEPT *, M
      GOTO(12, 67, 75) M
67  CALL CLR(6)
      CALL REFMEM(4)
      TYPE 68, IXEN, IYEN
68  FORMAT(' IXEN=', 13, 2X, ' IYEN=', 13)
      CALL TEXTG( IXEN-2, IYEN-3, 0, '+', 1)
      CALL TEXTG(124, 246, 0, ITEXT1, 3)
      CALL TEXTG(160, 246, 0, ITEXT2, 3)
      GOTO 47
75  CONTINUE
      STOP
      END
      SUBROUTINE MAXMIN(NMEM, LUGL, L)
      LOGICAL *1 IAR(256), IAR1(256)
      INTEGER XN(10, 10), YN(10, 10)
      INTEGER XMIN1, XMAX1, DLT
      INTEGER YMAX, YMIN, XMAX, XMIN
      COMMON XN, YN, IAR1
      YMAX=0
      YMIN=255
      XMAX=0
      XMIN=255
      DO 5 I=1, LUGL
        YMAX=MAX0( YMAX, YN( L, I))
        YMIN=MIN0( YMIN, YN( L, I))
        XMAX=MAX0( XMAX, XN( L, I))
5      XMIN=MIN0( XMIN, XN( L, I))

```

```

DO 20 IY=YMIN, YMAX
  IL=1
  DTL=XMAX-XMIN+1
  CALL RDSTR(2,0,XMIN,IY,IAR,DLT)
  DO 15 IX=XMIN,XMAX+1
    XMIN1=IX-XMIN+1
    IF(IL.EQ.2) GOTO 10
    XMIN1=IX
    XMAX1=IX
    IL=2
  GOTO 15
10  XMAX1=IX
15  CONTINUE
20  CALL WRDSTR(NMEM,0,XMIN1,IY,IAR1,XMAX1-XMIN1)
    CALL VECT1(0,L,LUGL)
    RETURN
  END
  SUBROUTINE VECT1(IAMPL,IN,LUGL)
    INTEGER XN(10,10),YN(10,10)
    COMMON XN,YN
    DO 10 L=1,LUGL
      L1=L+1
      IF(L1.EQ.LUGL+1) L1=1
10    CALL VECT(2,XN(IN,L),YN(IN,L),XN(IN,L1),YN(IN,L1),IAMPL)
      RETURN
    END
    SUBROUTINE ENCN(NMEM,KRDN,ICOL)
      LOGICAL *1 IAR(256),ITEXT1(4),ITEXT2(4)
      REAL TEXT1,TEXT2
      COMMON /BLK1/ITEXT1,ITEXT2,/BLK2/IXEN,IYEN
      EQUIVALENCE (TEXT,ITEXT1(1)),(TEXT2,ITEXT2(1))
      S=0.0
      XSUM=0.0
      YSUM=0.0
      DO 10 IY=1,256
        CALL RDSTR(NMEM,0,0,IY-1,IAR,256)
        DO 10 IX=1,256
          A=IAR(IX)
          IF(A.LT.0) A=A+256
          IF(A.EQ.0) GOTO 10
          S=S+A
          XSUM=XSUM+A*(IX-1)
          YSUM=YSUM+A*(IY-1)
10        CONTINUE
        IXEN=XSUM/S
        IYEN=YSUM/S
        ENCODE(3,15,TEXT1) IXEN
        ENCODE(3,15,TEXT2) IYEN
15      FORMAT(13)
        CALL TEXTG(IXEN-2,IYEN-3,0,'+',1)
        CALL TEXTG(40,KRDN,ICOL,ITEXT1,3)
        CALL TEXTG(160,KRDN,ICOL,ITEXT2,3)
        RETURN
      END

```

```

5 PRINT "Программа для расчета фазового показателя"
10 PRINT "преломления, фазовой скорости, длины волны"
15 PRINT "света в воздухе"
20 PRINT "
21 INPUT "Введите имя файла: "; n$
22 OPEN n$ FOR OUTPUT AS #1
25 PRINT "Введите длину волны в вакууме в нм L="
30 INPUT L
35 PRINT "Введите значение давления в торр P="
40 INPUT P
45 PRINT "Введите пределы температуры в гр. Цельсия T1, T2"
50 INPUT T1, T2
55 PRINT "Введите шаг температуры S="
60 INPUT S
65 W = 299792458.12#
70 A = 146! - (10 ^ 6) / (L ^ 2)
75 B = 41! - (10 ^ 6) / (L ^ 2)
80 C = 64.328 + 29498.1 / A + 255.4 / B
85 NO = 1 + C / (10 ^ 6)
90 PRINT #1, "Давление P="; P; "торр"
95 PRINT #1, "Длина волны в вакууме L="; L; "нм"
100 PRINT #1, "Истинное значение показателя преломления N1"
105 PRINT #1, "N1=Nтабл.+1"
110 PRINT #1, "+-----+-----+-----+-----+"
115 PRINT #1, "*Т-ра * фаз. Пок-ль * Фаз. ск-ть * Длина волны*"
120 PRINT #1, "+-----+-----+-----+-----+"
125 FOR I = T1 TO T2 STEP S
130 E = 1 + .003661# * I
135 K = (1.049 - .0157 * I) * P
140 M = 1 + K / (10 ^ 6)
145 N1 = ((NO - 1) * P * M) / (720.883 * E)
150 n = N1 + 1
155 W1 = W / n
160 L1 = L / n
165 PRINT #1, USING "###"; TAB(2); I;
166 PRINT #1, USING "##.###~^^~"; TAB(8); N1;
167 PRINT #1, USING "##.###~^^~"; TAB(22); W1;
168 PRINT #1, USING "###.###"; TAB(39); L1
169 PRINT #1, "+-----+-----+-----+-----+"
170 NEXT I
175 CLOSE #1
190 END

```

Давление P= 760 торр

Длина волны в вакууме L= 632.8 нм

Истинное значение показателя преломления N1

N1=Nтабл. +1

*Т-ра *	фаз. пок-ль *	фаз. ск-ть *	Длина волны*
-45	3.4955E-04	2.9969E+08	632.5789
-40	3.4203E-04	2.9969E+08	632.5836
-35	3.3483E-04	2.9969E+08	632.5881
-30	3.2793E-04	2.9969E+08	632.5925
-25	3.2130E-04	2.9970E+08	632.5967
-20	3.1493E-04	2.9970E+08	632.6008
-15	3.0882E-04	2.9970E+08	632.6046
-10	3.0293E-04	2.9970E+08	632.6083
-5	2.9726E-04	2.9970E+08	632.6119
0	2.9181E-04	2.9970E+08	632.6154
5	2.8654E-04	2.9971E+08	632.6187
10	2.8147E-04	2.9971E+08	632.6219
15	2.7657E-04	2.9971E+08	632.6250
20	2.7183E-04	2.9971E+08	632.6281
25	2.6726E-04	2.9971E+08	632.6309
30	2.6283E-04	2.9971E+08	632.6337
35	2.5855E-04	2.9971E+08	632.6364
40	2.5441E-04	2.9972E+08	632.6390
45	2.5040E-04	2.9972E+08	632.6416

```

5 PRINT "Программа для расчета группового показателя"
10 PRINT "преломления, групповой скорости света"
20 PRINT " "
21 INPUT "Введите имя файла: "; N$
22 OPEN N$ FOR OUTPUT AS #1
25 PRINT "Введите длину волны в вакууме в мкм L="
30 INPUT L
35 PRINT "Введите парциальное давление сухого воздуха"
40 PRINT "в мбар P1="
45 INPUT P1
50 PRINT "Введите парциальное давление водяного пара"
55 PRINT "в мбар P2="
60 INPUT P2
65 PRINT "Введите пределы температуры в гр. Цельсия T1,T2"
70 INPUT T1, T2
75 PRINT "Введите шаг температуры S="
80 INPUT S
85 W = 299792458.12#
86 T1 = T1 + 273
87 T2 = T12 + 273
90 PRINT #1, "Давление сухого воздуха P1="; P1; "торр"
95 PRINT #1, "Давление водяного пара P2="; P2; "торр"
100 PRINT #1, "Длина волны в вакууме L="; L; "мкм"
110 PRINT #1, "+-----+-----+-----+"
115 PRINT #1, "* Т-ра * гр. пок-ль * Гр. ск-ть *"
120 PRINT #1, "* * преломления * света в м/с *"
121 PRINT #1, "* * N - 1 * *"
125 PRINT #1, "+-----+-----+-----+"
130 FOR T = T1 TO T2 STEP S
135 E = 1 / L
140 A = 9.325 / (T * 10 ^ 4) - .25844 / (T ^ 2)
145 B = P1 * (57.9 / (10 ^ 8) - A)
150 D1 = (P1 * (B + 1)) / T
155 C = 2.23366 / T - 710.792 / (T ^ 2) + 77514.1 / (T ^ 3)
160 N = N1 + 1
165 W1 = W / N
170 K = -2.37321 / (10 ^ 3) + C
175 M = P2 * (1 + 3.7 * P2 / (10 ^ 4))
180 R = 1 + M * K
185 D2 = P2 * R / T
190 U = 6487.31 + 174.174 * (E ^ 2) - 3.5575 * E ^ 4 + .61957 * E ^ 6
195 X = 4547.3 * (38.9 + E ^ 2)
200 Y = (38.9 - E ^ 2) ^ 2
205 Z = 683939.7 * (130 + E ^ 2)
210 F = (130 - E ^ 2) ^ 2
215 G = (2371.34 + Z / F + X / Y) * D1 + U * D2
220 N3 = G / (10 ^ 8)
225 N = N3 + 1
230 W1 = W / N
231 T6 = T - 273
235 PRINT #1, USING "###"; TAB(2); T6;
236 PRINT #1, USING "##.####"; TAB(11); N3;
237 PRINT #1, USING "##.####"; TAB(25); W1
238 PRINT #1, "+-----+-----+-----+"
240 NEXT T
245 CLOSE #1
255 END

```

Давление сухого воздуха P1= 1013.25 торр

Давление водяного пара P2= 10 торр

Длина волны в вакууме L= .6328 мкм

* Т-ра *	* гр. пок-ль *	* Гр. ск-ть *
* * * * *	* * * * *	* * * * *
* * * * *	* * * * *	* * * * *
* * * * *	* * * * *	* * * * *
-45	3.6299E-04	2.9968E+08
-40	3.5516E-04	2.9969E+08
-35	3.4766E-04	2.9969E+08
-30	3.4047E-04	2.9969E+08
-25	3.3357E-04	2.9969E+08
-20	3.2695E-04	2.9969E+08
-15	3.2058E-04	2.9970E+08
-10	3.1446E-04	2.9970E+08
-5	3.0857E-04	2.9970E+08
0	3.0290E-04	2.9970E+08
5	2.9743E-04	2.9970E+08
10	2.9216E-04	2.9970E+08
15	2.8707E-04	2.9971E+08
20	2.8216E-04	2.9971E+08
25	2.7741E-04	2.9971E+08
30	2.7282E-04	2.9971E+08
35	2.6838E-04	2.9971E+08
40	2.6409E-04	2.9971E+08
45	2.5992E-04	2.9971E+08

Лазеры для лазерных технологических систем

№ п/п	Марка лазера	Страна изгото- витель	Актив- ная среда	Режим рабо- ты	Способ накачки ¹	Длина волны излучения (мкм)	Мощность излучения ² (Вт)
1	ЛГН-224	Россия	He-Ne	непр.	ПТ-разр.	0,633	$>10^{-3}$
2	ЛГН-201	Беларусь	He-Ne	непр. имп.	РЧ-разр.	0,633	$\geq 10^{-3}$
3	ЛГН-212	Россия	He-Ne	непр.	ПТ-разр.	0,633	$\geq 0,2 \cdot 10^{-3}$
4	ЛГН-220	Россия	He-Ne	непр.	ПТ-разр.	0,633	$\geq 70 \cdot 10^{-3}$
5	ЛГН-221	Россия	He-Ne	непр.	ПТ-разр.	0,633	$\geq 1,0 \cdot 10^{-3}$
6	ЛГН-514	Россия	Ar	непр.	ПТ-разр.	0,488	$\geq 25 \cdot 10^{-3}$
7	ЛГН-512	Россия	Ar	непр.	ПТ-разр.	0,4579 0,4380 0,5148	1 5 5
8	ЛКДЗ-2	Россия	He-Cd	непр.	ПТ-разр.	0,325	10^{-2}
9	ЛКДЗ-2	Россия	He-Cd	непр.	ПТ-разр.	0,4410	10^{-2}
10	ЛГИ-101	Россия	Cu	имп. - период	ИМ-разр.	0,51 0,58	средн. 3...5
11	ЛСО5-1	Россия	CO ₂	непр. имп.	ВЧ-разр.	10,6	2
12	КОЛОС	Россия	CO ₂	непр. имп.	ВЧ-разр.	10,6	непр. 10 ср. 70
13		Армения	ArF KrF	имп.	ИМ-разр.	0,193	3 I
14	ЛГИ-510	Россия	XeCl	имп.	ИМ-разр.	0,248 0,303	3 0,1
15	ИЛГН-706	Россия	CO	непр.	ПТ-разр.	5,1...5,2	12
16	ЛМИ-507	Россия	имп.	имп.	оптич.	0,217... 5,44	
17	ЛКИ 301-1	Россия	ПЖМА	имп.	оптич.	0,365... 0,75	
18	АПАГА 1407	Армения	Nd	имп.	оптич.	1,064	3 10^{-2}
19	ИНСТЕХ 1521-300	Россия	Nd LiNb	непр.	оптич.	0,53; 1,03; 1,31	2; 3; 30
20	СПЕКТР-1	Армения	Nd	имп.	оптич.	1,4...4,7	0 10^{-2}
21	ИЛПН-215А	Россия	AsGa	непр.	ПТ	0,85	40
22	ИЛПН-130	Россия	AsGa	имп.	ИМ	0,9	

№ п/п	Диаметр лучка (мм)	Модовый состав	Поляризац. соотнош.	Расход- ность (мрад)	Относи- тельная неста- бильность мощности	Потери
1	0,9	ТЕМ ₀₀₀	1:1	± 1,2	2%	1%
2	1,3	ТЕМ ₀₀₀	99:1	± 1,5	2%	
3	6			0,4	10%	
4	2	ТЕМ ₀₀₀	лин.	1	3%	
5		ТЕМ ₀₀₀			5%	
6	1+0,2	ТЕМ ₀₀₀	лин		0,1%	3%
7	2	ТЕМ ₀₀₀	лин	0,5	1%	0,5%
8	2		500:1	1,5	5%	
9	2		500:1	0,9	5%	
10	12			0,5...3		
11	2	ТЕМ ₀₀₀		7		
12	1,8	ЕН _н				
13	0,35x35			1		
14	7x22			4x2		
15	8	много мод	лин	4	5%	
16				2		
17				3		
18	3			4	6%	
19	0,5; 0,8; 1,0	ТЕМ ₀₀₀	4:1	5		
20	6			8		
21				400		
22						

№ п/п	Наработка на отказ (ч)	Потребляе- мая мощ- ность, Вт	Электро- питание	Габариты лазера (мм)	Масса лазера (кг)
1	7000	40	220 В; 50 Гц	ø44x475	0,85
2	5000	≤ 20	27 В	ø 55x400	1,5
3	5000			392x183x133	5
4	3000	≤ 350	220 В; 50 Гц	1925x225x195	30
5	10000	≤ II	12 В; ~220 В	ø 44x243	0,4
6	5000		220 В; 50 Гц	550x170x144	5
7	5000	$36 \cdot 10^{-3}$	380 В; 50 Гц	1800x220x195	55
8		440	220 В; 50 Гц		
9		220	220 В; 50 Гц		
10	1000	$4 \cdot 10^3$	380 В; 50 Гц	1600x250x320	50
11			~220 В; 27 В		
12	1000	320	27 В; ~220 В	80x62x500	3,5
13		$5 \cdot 10^3$			400
14	$2 \cdot 10^6$ им $9 \cdot 10^6$ им	$≤ 7 \cdot 10^3$	~380 В; 50 Гц	807x156x420	170
15	1000	500		1600x250x210	25
16		$3 \cdot 10^3$		1000x300x430	60
17	10^5 имп			320x370x450	23
18	10^6	200	220 В; 50 Гц	600x150x150	50
19			220 В; 50 Гц	140x60x60	2,5
20		$3 \cdot 10^3$	220 В; 50 Гц	1000x150x400	20
21			170 мА	ø 20x10	
22				ø 28,5x15	

¹ ЛТ - разр. - разряд постоянного тока;

ВЧ - разр. - высокочастотный разряд;

ИМ - разр. - импульсный разряд.

² Буква Э перед значением мощности излучения указывает на то, что в источнике информации приведено значение энергии в импульсе. В этом случае единицей измерения служит 1 Дж.

³ Поляризационное соотношение - это отношение поляризационных компонент. Так поляризационное соотношение 1:1 соответствует круговой поляризации, 100:1 практически плоско-поляризованному свету.

⁴ Буква Э перед значением расходимости указывает на то, что в источнике информации приведено значение энергетической расходимости.

Примечание:

ЛАЗЕР ЛГН-514

Относительная нестабильность мощности, приведенная в таблице за 8 ч, за 30 мин составит $\leq 0,05\%$. Относительный уровень шумов и пульсаций мощности измерен в диапазоне 10 Гц...10 МГц. Диапазон рабочих температур 1-40°C. Источник питания выполнен в виде двух блоков: стабилизатора тока (495x400x137 мм, 11,5 кг) и выпрямителя (495x400x137 мм, 20 кг).

ЛАЗЕР ЛГН-512

Может настраиваться в одночастотный режим, при этом мощность излучения падает до 0,5 Вт ($\lambda = 0,4579$ мкм), 2 Вт ($\lambda = 0,4880$ и $0,5145$ мкм). Нестабильность оси диаграммы направленности за 8 ч работы $\leq 10^{-1}$ рад. Габариты источника питания 530x680x1000 мм, масса 250 кг.

Нестабильность мощности приведена для 30 мин работы, шум измерялся в частотном диапазоне 20 Гц ...1 МГц.

Лазеры ЛКД 3.2; ЛКД 3.3

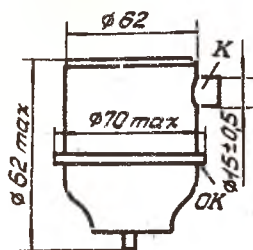
Лазеры имеют встроенную в трубку зеркала, суперинваровый резонатор, высокую степень когерентности излучения, ресурс трубки 12 месяцев.

ЛАЗЕР ЛГИ-101

Частота следования импульсов 8...12 кГц, длительность импульса 20 нс, подготовка к работе 30 мин, габариты источника питания 1800x500x600 мм, масса 350 кг, расход охлаждающей воды ≤ 3 л/мин.

Параметры фотоприемников

Наименование	Тип	Рабочий диапазон, нм	Интегральная чувствительность	Постоянная времени, с	Темновой ток, мкА (сопротивление, Ом)	Шумовая характеристика	Габариты, мм
Фотоэлемент	Ф-2	300-600	40 мкА/лм	10^{-7}	$3 \cdot 10^{-3}$		ø 20x67
	Ф-10	300-700	160 мкА/лм	$5 \cdot 10^{-9}$	10^{-7}		ø 62x62
Фотоэлектронный умножитель	ФЭУ-27	300-700	10 А/лм	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-12}$ лм Ц-1/2	ø 29,5x105
	ФЭУ-31А	300-600	1 А/лм	10^{-8}	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-12}$ лм Ц-1/2	ø 22,5x75
Фоторезистор	ФСК-1	200-900	6000 мкА/лмВ	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^6$		ø 28x4,5
	ФСА-1	300-3000	$4 \cdot 10^5$ мкА/лмВ	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^5$		ø 25x15x18
Фотодиод	ФД-1	400-1900	20 нА/лм	10^{-5}	30	$1,5 \cdot 10^{-10}$ лм	ø 8,2x8
	ФДМ	500-1120	11 нА/лм	$0,1 \cdot 10^{-5}$	1	$0,57 \cdot 10^{-10}$ лм	ø 3,85x10
Фототранзистор	ФТ-П	400-1800	500 нА/лм	$20 \cdot 10^5$	300	$5 \cdot 10^{-7}$ лм	ø 12x7
	ФТ-К	500-1120	0,4 мкА/лм	$8 \cdot 10^{-5}$	3		ø 3,9x10
Болометр	БК-1х	1000-20000	6,5 В/Вт	0,25	12	10^{-10} Вт	ø 26x131
	БК-5а	1000-20000	75 В/Вт	$4 \cdot 10^{-3}$	10^6	$5 \cdot 10^{-9}$ Вт	ø 16x13,5
Пироприемник	БП-1	1800-15000	50 В/Вт			$4,5 \cdot 10^{-6}$ Вт Ц-1/2 см	ø 10,7x5
	БП-3А	1000-20000	10 В/Вт	$0,6 \cdot 10^{-3}$		$1,5 \cdot 10^{-6}$ Вт Ц-1/2 см	ø 10x5



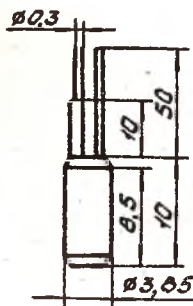
Р и с. П9.1. Фотоэлемент
Ф-10



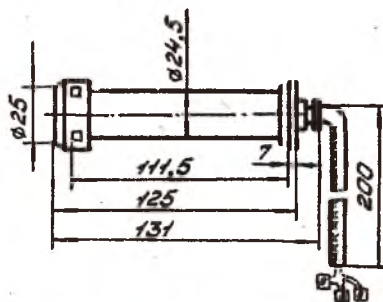
Р и с. П9.2. Фото-
электронный умно-
житель ФЭУ-31А



Р и с. П9.3. Фото-
резистор ФСА-1



Р и с. П9.4. Фото-
диод КФДМ



Р и с. П9.5. Вольтметр ТК-1х1,5

О Г Л А В Л Е Н И Е

3. Проектирование лазерных навигационных систем	3
3.1. Лазерные гироскопы	3
3.2. Лазерные системы посадки	26
3.3. Датчики горизонта	27
3.4. Тепловизионная техника	36
3.5. Приборы ночного видения	40
4. Лазерные локационные системы	47
4.1. Измерение координат целей	47
4.2. Получение изображений объектов	53
4.3. Собственная частота колебания устройства оптической визуализации	66
4.4. Измерение геометрических размеров изделий	76
5. Проектирование лидаров	84
5.1. Климатический мониторинг	84
5.2. Экологический контроль	100
6. Элементная база лазерных систем	107
6.1. Узлы крепления оптических деталей	107
6.2. Фокусировочные механизмы	115
6.3. Фокусирующие системы	116
6.4. Сканирующие оптико-механические устройства	136
6.5. Модуляция оптического излучения	138
6.6. Выбор лазеров и фотоприемных устройств ..	148
Библиографический список	152
Приложения	155

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 II)

Учебное пособие

Редактор Л.Я.Ч е г о д а е в а
Техн.редактор Г.А.У с а ч е в а
Корректор Н.С.К у п р и я н о в а

Лицензия ЛР № 020301 от 28.II.91 г.

Подписано в печать 4.03.96. Формат 60x84¹/₁₆

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 10,0. Усл.кр.-отт. 10,1. Уч.-изд.л. 98.

Тираж 300 экз. Заказ 100. Арт.С-17/95

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П.Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34

Издательство СГАУ

443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.