

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Лазерная техника и технология»

В. О. Кузнечик  
А. Ю. Луговик

## ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА

Конспект лекций  
для студентов приборостроительных  
специальностей

Минск  
БНТУ  
2016

УДК 535.8(075.8)

ББК 22.34я7

К89

Рецензенты:

*А.И. Свистун, М.И. Филонова*

**Кузнечик, В. О.**

К89 Прикладная оптика: конспект лекций для студентов приборостроительных специальностей / В. О. Кузнечик, А. Ю. Луговик. – Минск : БНТУ, 2016. – 58 с.

ISBN 978-985-550-445-1.

На базе физической и геометрической оптики изложены элементы теории оптико-электронных приборов, приведены краткие сведения об их основных элементах, описаны типовые оптико-электронные приборы различного назначения.

Данное издание предназначено для студентов приборостроительных специальностей, для которых читается курс прикладной оптики.

**УДК 535.8 (075.8)**

**ББК 22.34я7**

**ISBN 978-985-550-445-1**

© Кузнечик В. О., Луговик А. Ю., 2016

© Белорусский национальный  
технический университет, 2016

## ВВЕДЕНИЕ

Распределение энергии излучения в зависимости от длины волны или частоты принято называть его *спектром*. Условно спектр электромагнитных колебаний делится на радиодиапазон (длина волны  $\lambda$  меняется от 1 мм до нескольких десятков километров; частота  $10^{11}$  Гц и меньше), оптический диапазон ( $\lambda$  меняется от 1 нм или  $10^{-3}$  мкм до 1 мм; частота порядка  $10^{15}$  Гц), рентгеновский диапазон ( $\lambda = 10^{-5}$ – $10^{-3}$  мкм; частота порядка  $10^{17}$  Гц) [1–3].

Оптический диапазон, в свою очередь, подразделяют на инфракрасную (ИК) область (от 0,76 мкм до 1 мм), видимую (0,380–0,76 мкм) и ультрафиолетовую (УФ) ( $10^{-3}$ –0,38 мкм). Инфракрасная область делится на коротковолновый (0,76–1,5 мкм), средневолновый (1,5–2 мкм) и длинноволновый (20 мкм–1 мм) участки.

*Оптика* – раздел физики, в котором изучаются природа, а также свойства и методы исследования оптического излучения, его распространение в различных средах и взаимодействие с веществом [5, 12].

На первых этапах развития оптики, когда приемником оптического излучения был только глаз человека, оптику (визуальную) определяли как науку о *свете* – той части электромагнитного излучения, которая воспринимается глазом (в это время использовались фотометрические (световые) и астрофизические величины, характеризующие оптическое излучение).

Глаз, во многом являясь совершенным оптическим прибором в сочетании с возможностями человеческого мозга, позволяет человеку успешно жить и работать в окружающем его мире, особенно при вооружении глаза визуальными оптическими приборами (микроскопами, телескопами и т. п.). Однако глазу присущи и существенные недостатки: узкий спектральный диапазон работы, ограниченная способность различать малые угловые или линейные величины, резкое снижение разрешения и чувствительности глаза при малых освещенностях, недостаточное быстродействие, невозможность фиксации и хранения результатов наблюдения [15].

Стремление преодолеть недостатки визуальных оптических приборов, необходимость работать в условиях низкой освещенности (приборы ночного видения – ПНВ), порой круглосуточно, не только в видимом, но и в УФ- и ИК-диапазонах, тенденции автоматизации

измерений и обработки оптических изображений в реальном времени, ужесточение требований к точности, быстродействию и объективности оптических измерений стимулировали развитие оптико-электронных приборов (ОЭП), в которых глаз человека заменен фотоэлектрическими (цифровые камеры и фотоаппараты) или тепловыми (тепловизионные приборы) приемными устройствами (в это время появляются энергетические величины, характеризующие электромагнитное излучение всего оптического диапазона).

Прикладная оптика и оптическое (оптико-электронное) приборостроение связаны друг с другом, так как проектирование оптико-электронных приборов и систем базируется на знании физической и геометрической оптики.

## Глава 1. ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

### 1.1. Основные энергетические и фотометрические величины и соотношения между ними. Астрофизические звездные величины

Для оценки оптической системы как передатчика оптического излучения (в соответствии с системой СИ и рекомендациями Международной комиссии по освещению) применяют энергетические (во всем оптическом диапазоне) или фотометрические (световые) величины (в границах видимого диапазона они имеют одинаковое буквенное обозначение, но различные индексы –  $e$  (энергетические) и  $v$  (визуальные; могут отсутствовать) и соответствующие единицы их измерений (табл. 1.1) [2].

Таблица 1.1

Энергетические и фотометрические величины и их единицы

Энергетические величины			Световые величины		
Наименование	Формула	Единица измерения	Наименование	Формула	Единица измерения
1	2	3	4	5	6
Поток излучения (мощность излучения)	$\Phi_e = \frac{dW_e}{dt}$	ватт (Вт)	Световой поток	$\Phi = \frac{dW}{dt}$	люмен (лм)
Энергетическая сила света (сила излучения)	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega_1}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$	Сила света	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	кандела (кд)
Энергетическая светимость (поверхностная плотность потока излучения)	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dQ_1}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	Светимость	$M = \frac{d\Phi}{dQ_1}$	$\frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$
Энергетическая освещенность (плотность мощности)	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dQ_2}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	Освещенность	$E = \frac{d\Phi}{dQ_2}$	люкс (лк)

Окончание табл. 1.1

1	2	3	4	5	6
Энергетическая яркость	$L_e = \frac{dI_e}{dQ \cos \varepsilon}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{срм}^2}$	Яркость	$L = \frac{dI}{dQ \cos \varepsilon}$	$\frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$
Энергетическая экспозиция (количество облучения)	$H_e = \int_0^t E_e(t) dt$	$\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	Световая экспозиция (количество освещения)	$H = \int_0^t E(t) dt$	лкс

В табл. 1.1:

$Q_1$  – площадь первичного источника;

$Q_2$  – площадь вторичного источника и приемной поверхности;

$\Omega$  – телесный угол, в котором распространяется излучение;

$\varepsilon$  – угол между нормалью к поверхности и направлением распространения излучения.

Телесный угол  $d\Omega$  – часть пространства, ограниченная конической поверхностью с вершиной в точке расположения источника:  $dQ = r^2 d\Omega$ .

Единицей телесного угла является стерадиан (ср). Если  $dQ = r^2$ , то угол  $d\Omega = 1$  ср. Максимальный телесный угол  $\Omega = 4\pi = 12,56$  ср.

**Поток излучения**  $\Phi_e$  – основная энергетическая характеристика излучения, равная отношению энергии излучения  $dW_e$  ко времени излучения  $dt$ , значительно превышающему период собственных колебаний электромагнитных волн оптического диапазона. Спектральный состав излучения характеризуется спектральным распределением потока излучения:

$$\Phi_e = \int \Phi_e(\lambda) d\lambda.$$

Распределение потока излучения в пространстве описывают следующие величины.

**Энергетическая светимость**  $M_e$  – отношение потока излучения  $d\Phi_e$ , исходящего от рассматриваемого малого участка поверхности, к площади этого участка  $dQ_1$ :

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dQ_1}. \quad (1.1)$$

Энергетическая освещенность  $E_e$  – это отношение потока излучения  $d\Phi_e$ , падающего на рассматриваемый малый участок поверхности, к площади  $dQ_2$  этого участка:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dQ_2}. \quad (1.2)$$

Для приблизительных расчетов освещенности поверхности фотоприемника в случае бесконечно удаленного объекта яркостью  $L_v$  используют формулу

$$E'_v = \frac{\tau \pi L_v}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2,$$

где  $\tau$  – коэффициент пропускания оптических сред ( $\tau = \tau_1 \tau_2 \dots \tau_n$ ), расположенных между предметом и его изображением;

$D / f'$  – относительное отверстие объектива.

В связи с суточным изменением освещенности земной поверхности (табл. 1.2), в случае необходимости, освещенность на фотоприемнике может быть уменьшена с помощью нейтральных фильтров.

Таблица 1.2

Освещенность на поверхности Земли  
от естественных источников излучения

Источник излучения	Освещенность $E$ , лк
1	2
Ночная освещенность	
Естественная ночная освещённость (ЕНО) – нормированная величина (свет звёзд без света Луны и облаков)	$5 \cdot 10^{-3}$
Темная облачная ночь	0,0001

Окончание табл. 1.2

1	2
От звездного неба (ясная безлунная ночь)	$0,3 \cdot 10^{-3}$
Молодой месяц	0,01
Полнолуние	0,1
Гражданские сумерки (от момента захода $h = 0^\circ$ до момента погружения Солнца под горизонт $h = -6^\circ$ )	800–5
Навигационные сумерки ( $-12^\circ \leq h \leq -6^\circ$ )	5–0,01
Астрономические сумерки ( $-18^\circ \leq h \leq -12^\circ$ )	0,01–0,001
Дневная освещенность	
От темных облаков	100–10000
Переменная облачность	10000–100000
Ясный день (от Солнца)	100000

Зависимость энергетической освещенности (1.2) от энергетической светимости (1.1) площадки  $dQ$  имеет следующий вид:

$$M_e = \rho E_e,$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения площадки  $dQ$ , равный отношению потока излучения  $d\Phi'_e$ , отраженного от поверхности площадки, к потоку излучения  $d\Phi_e$ , падающему на эту поверхность:  $\rho = \frac{d\Phi'_e}{d\Phi_e}$ .

Коэффициенты отражения  $\rho$  (для черного бархата – около 1 %, для почвы – 32 %, для свежеснеженного белого снега – 93 %, для кожи человека европеоидной расы – от 19 до 35 %), поглощения  $\alpha$  и пропускания  $\tau$  оптических сред в соответствии с законом сохранения энергии связаны равенством

$$\rho + \alpha + \tau = 1.$$

*Энергетический коэффициент пропускания оптической системы* – это отношение энергетического светового потока, пропущенного системой, к энергетическому потоку, упавшему на него ( $0 < \tau_e < 1$ ):

$$\tau_e = \frac{\Phi'_e}{\Phi_e}.$$



*Энергетическая сила света*  $I_e$  (для точечного источника излучения, имеющего малые размеры по сравнению с расстоянием, на котором рассматривается его действие) определяет пространственную плотность потока излучения источника и равна отношению потока излучения  $d\Phi_e$ , распространяющегося от источника в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла, к этому углу  $d\Omega$ :

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}.$$

*Энергетическая яркость*  $L_e$  – отношение энергетической силы света  $dI_e$  в данном направлении к площади проекции участка  $dQ$  излучающей поверхности на плоскость, перпендикулярную этому направлению:

$$L_e = \frac{dI_e}{dQ \cos \varepsilon}, \quad (1.3)$$

где  $\varepsilon$  – угол между нормалью к площадке и данным направлением.

Если распределение энергетической силы света  $dI_e$  источника в направлении, составляющим угол  $\varepsilon$  с нормалью к поверхности, определяется зависимостью

$$dI_e = dI_{e0} \cos \varepsilon,$$

где  $dI_{e0}$  – энергетическая сила света в направлении нормали к поверхности, то энергетическая яркость такого источника постоянна во всех направлениях (ламбертов источник):

$$L_e = \frac{dI_{e0}}{dQ}.$$

Для такого источника

$$L_e = M_e / \pi.$$

Энергетическая экспозиция  $H_e$  – произведение энергетической освещенности  $E_e$  на длительность облучения  $t$  (например, в цифровых фотоаппаратах выставляется автоматически с помощью встроенного экспонометра в зависимости от освещенности):

$$H_e = E_e t . \quad (1.4)$$

Если освещенность меняется во времени, то

$$H_e = \int_0^t E_e(t) dt .$$

Качественной характеристикой каждой из указанных величин является ее спектральная плотность, определяемая как отношение энергетической величины в рассматриваемом малом спектральном интервале длин волн к ширине этого интервала.

Для видимой части спектра в визуальных приборах пользуются световым потоком и соответствующими световыми величинами, которые рассчитывают по формулам, аналогичным (1.1), (1.2), (1.3) и (1.4).

Переход от энергетических единиц к световым и наоборот выполняется через световую эффективность излучения:

$$K_\lambda = K(\lambda) = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} .$$

Отношение

$$v(\lambda) = K_\lambda / K_m$$

называется *относительной спектральной световой эффективностью*, где  $K_m = 680 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$  – максимальное значение спектральной световой эффективности (для  $\lambda = 0,555 \text{ мкм}$ , на которой лежит максимальная спектральная чувствительность глаза человека; при малых яркостях наблюдаемых объектов, т. е. сумеречном зрении, максимум

смещается в сторону коротких длин волн, в отличие от животных, обладающих хорошим ночным зрением (змеи, кошки, совы), у которых реакция в ближнем ИК-диапазоне лучше чем, у человека).

График  $v(\lambda)$  называется *кривой видности* или *спектральной чувствительности глаза*.

Система астрофизических звездных величин, используемая задолго до установления рассмотренной выше системы фотометрических величин, принятая в астрофизике, основана на понятии *звездная величина*.

Звездная величина обычно обозначается  $m$  и определяет блеск звезды.

*Блеском* называется величина, применяемая при визуальном наблюдении удаленного точечного источника и измеряемая освещенностью, которую создает источник в плоскости зрачка наблюдателя, перпендикулярной лучам:

$$m = -2,5 \lg E_v - 13,89,$$

где  $m$  – звездная величина;

$E_v$  – освещенность, создаваемая звездой у границы земной атмосферы.

Специальными измерениями было установлено, что освещенность, равную 1 лк (соответствующая энергетическая освещенность  $E_e = E_v/K_\lambda = 3,1 \cdot 10^{-9}$  Вт/м<sup>2</sup>), создают звезда величины  $m = -13,75 \pm 0,03$ , если ее рассматривают за пределами земной атмосферы, и звезда величины  $m = -14,01 \pm 0,04$ , если рассматривается на уровне моря, что объясняется потерями света в земной атмосфере.

Другой распространенной в астрофизике единицей является *абсолютная звездная величина*  $M$ , которая соответствует освещенности, создаваемой звездой, находящейся на расстоянии, равном 10 парсекам ( $10 \text{ пк} = 3,086 \cdot 10^{17}$  м).

Силу света звезды, выраженную в долях силы света Солнца, принято называть светимостью (не следует путать её со светимостью в табл. 1.1).

## 1.2. Основные законы теплового излучения

Все тела, нагретые до температуры выше абсолютного нуля, излучают электромагнитные волны. Излучение нагретых тел называ-

ют тепловым. Оно некогерентное, не является направленным и для твердых и жидких тел имеет непрерывный спектр [2, 7].

Одновременно с испусканием каждое тело поглощает падающее на него излучение, в результате чего устанавливается равновесная температура. Спектральные излучательные свойства тел характеризуются спектральной плотностью энергетической светимости, а поглощательные – спектральным коэффициентом поглощения, который показывает, какая часть падающего на поверхность тела монохроматического потока излучения при определенной температуре  $T$  и длине волны  $\lambda$  поглощается. Тело, полностью поглощающее весь падающий поток независимо от направления падения, спектрального состава и поляризации излучения, называют *абсолютно черным телом* (а. ч. т.). Излучение этого источника подчиняется законам, которые применяются и для расчета реальных (серых) тел с использованием поправочных коэффициентов.

Основной закон теплового испускания, применимый для любых тел, – закон Кирхгофа: *в точке поверхности теплового излучателя при любой температуре и длине волны спектральный коэффициент направленного излучения для заданного направления равен спектральному коэффициенту поглощения для противоположно направленного неполяризованного излучения*, т. е. чем больше тело поглощает энергии, тем больше оно ее излучает (тела с хорошей отражающей способностью являются плохими излучателями):

$$M_e(\lambda, T) = \alpha_{\lambda, T} M_e(\lambda, T)^{\text{а. ч. т.}},$$

где  $\alpha_{\lambda, T} = \varepsilon_{\lambda, T}$  – спектральный коэффициент излучения (поглощения) тела;

$M_e(\lambda, T)^{\text{а. ч. т.}}$  – спектральная плотность энергетической светимости а. ч. т. для заданной длины волны [8].

Закон Стефана–Больцмана описывает зависимость между энергетической светимостью тела и его температурой:

$$M_e = \varepsilon \sigma T^4,$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент теплового излучения реального тела ( $\varepsilon_{\text{а. ч. т.}} = 1$ );

$$\sigma = 5,66971 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ К}^{-4},$$

$T$  – температура по абсолютной шкале, К.

Закон Планка (может быть представлен графически в виде так называемых кривых Планка) описывает распределение энергии по спектру длин волн:

$$M_{e,\lambda} = M_e(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp[(C_2 / \lambda T) - 1]^{-1}, \quad (1.5)$$

где  $C_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{ м}^2$ ,  $C_2 = 1,43879 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{ К}$ .

При  $\lambda T < 3000 \text{ мкм} \cdot \text{ К}$  формулу можно представить в виде

$$M_{e,\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \exp(C_2 / \lambda T).$$

Положение максимума излучения зависит от температуры а. ч. т. и определяется законом Вина (закон смещения):

$$\lambda_{\max} = 2898/T \quad \text{или} \quad \lambda_{\max} = 3000/T,$$

где  $\lambda$  выражается в микрометрах,  $T$  – в кельвинах.

При решении практических задач также следует учитывать пропускание среды и спектральные коэффициенты излучения объекта и фона.

### 1.3. Источники излучения

С физической точки зрения любое тело, способное излучать энергию в окружающую среду, можно назвать источником излучения.

По физической природе излучения источника следует различать собственное и отраженное излучение [1, 3].

Все существующие источники излучения можно разделить на две группы: искусственные и естественные, которые в свою очередь классифицируются либо по физической природе излучения, либо по назначению [9].

В зависимости от характера распределения энергии излучения по спектру источники принято делить на источники с непрерывным спектром, к которым в первую очередь относятся источники теплового излучения, источники с полосовым и линейчатым спектром, к которым относятся люминесцентные излучатели и лазеры, а также

источники смешанного типа, излучение которых наряду со сплошным спектром имеет отдельные полосы или линии.

При тепловом излучении (лампы накаливания, галогенные лампы, модели черного тела) поток излучения и его спектральный состав определяются температурой. Световое излучение обусловлено спонтанными переходами электронов с высоких уровней на более низкие, ИК-излучение – изменением колебательного и вращательного движений атомов. Тепловое излучение происходит в широком спектральном диапазоне, является некогерентным и выходит из излучателя во все стороны.

При люминесцентном излучении (люминесцентные лампы) происходит спонтанный переход атомов и электронов с высоких уровней на более низкие, возбуждение атомов и электронов осуществляется электромагнитным полем.

Люминесцентное излучение некогерентно, выходит из излучателя во все стороны, но спектральный диапазон его уже, чем у теплового.

Газоразрядным источником (ртутные и ксеноновые дуговые лампы) излучения называется прибор, в котором излучение оптического диапазона спектра возникает в результате электрического разряда в атмосфере инертных газов, паров металла или их смесей.

В оптических квантовых генераторах (лазерах) излучение вызывается индуцированными переходами электронов с высоких уровней на более низкие, оно когерентно, монохроматично и распространяется в малом телесном угле.

#### **1.4. Распространение оптического излучения в атмосфере**

Для ОЭП (дальномеров, лидаров, теодолитов, тепловизоров, телескопов) средой распространения излучения чаще всего является земная атмосфера, представляющая собой поглощающую среду, чрезвычайно изменчивую в пространстве и времени. Газовая оболочка атмосферы состоит главным образом из азота, кислорода, аргона и углекислого газа. Помимо газов в атмосфере содержится водяной пар (главный поглотитель ИК-излучения и формирователь так называемых окон прозрачности атмосферы), количество которого является характеристикой влажности воздуха (зависит от удаленности конкретного места от морей и океанов и от температуры воздуха) [11].

Наряду с газами в атмосфере содержится большое количество частиц (аэрозолей – смеси воздуха и частиц, находящихся в равновесии) различного происхождения (например, пыль, поднятая с поверхности земли, частицы солей морской воды и т. д.), размеров и концентраций.

При распространении излучения в атмосфере, по горизонтальному пути или наклонной трассе, наблюдаются его поглощение, рассеяние, эффекты, связанные с турбулентностью атмосферы, и рефракция, что приводит к уменьшению его интенсивности.

Общие свойства ослабляющей среды, вне зависимости от того, сплошная она или дискретная, описывает экспоненциальный закон Бугера:

$$\tau_{\text{погл}}(\lambda) = \exp(-k_{\text{погл}}(\lambda)L),$$

где  $\tau_{\text{погл}}(\lambda)$  – пропускание слоя толщиной  $L$ ;

$k_{\text{погл}}(\lambda)$  – спектральный коэффициент поглощения (ослабления).

В ряде областей спектра полосы поглощения отсутствуют, эти участки называются «окнами прозрачности» атмосферы:

0,95–1,05 мкм – область лазерной дальнометрии;

1,2–1,3 и 1,5–1,8 мкм – используются в оптической связи по воздуху;

2,1–2,4 и 3,3–4,2 мкм – эти окна практически не используются из-за отсутствия мощных источников излучения;

4,5–5,0 мкм – в нем работают тепловизоры и тепловизионные приборы;

8–13 мкм – диапазон работы тепловизионных приборов [6].

В большинстве случаев потери, обусловленные молекулярным поглощением в атмосфере, при работе прибора в окне прозрачности можно не учитывать.

Рассеяние в атмосфере обусловлено флуктуациями плотности (молекулярное – обратно пропорционально  $\lambda^4$ ) атмосферы и наличием в ней аэрозолей (аэрозольное). Молекулярное рассеяние превышает аэрозольное только в ультрафиолетовой и сине-зеленой частях спектра.

*Аэрозольное рассеяние* – это рассеяние на крупных частицах, закономерности которого в значительной степени определяются отношением размера частицы к длине волны излучения; вызывает по-

явление атмосферной дымки (рассеяние излучения естественных источников) и помехи обратного рассеяния (рассеяния излучения источника подсветки в направлении «назад»), что создает дополнительный фон, на котором наблюдаются объекты.

Непосредственно из закона Бугера следует определение предельной дальности видимости невооруженным глазом объекта с абсолютным контрастом (зависит от типа погоды, например, густой туман, ясно, осадки, определяющей показатель ослабления сигнала атмосферой).

*Метеорологическая дальность видимости* (МДВ) – это наибольшее расстояние  $S_M$ , км, на котором контраст черного объекта достаточно больших размеров на фоне неба при его достаточной яркости снижается до контрастной чувствительности глаза  $\varepsilon_k$ , адаптированного к дневным условиям ( $\varepsilon_k = 0,02$ ).

Величина  $S_M$  характеризует состояние среды (её мутность) и определяется как

$$S_M = \frac{\ln(1 / \varepsilon_k)}{\varepsilon_a}, \quad (1.6)$$

где  $\varepsilon_k$  – порог контрастной чувствительности приемника;

$\varepsilon_a$  – показатель рассеяния,  $\text{км}^{-1}$ .

Коэффициент прозрачности (пропускания) атмосферы для  $\lambda = 0,555$  мкм определяется выражением

$$\tau_a(0,555) = \exp[-3,912 L/S_M].$$

Соотношение (1.6) используется для объективного измерения МДВ и позволяет расширить ее понятие для ночного времени суток.

*Турбулентностью атмосферы* называют случайные колебания температуры, влажности, плотности воздуха, в результате которых в атмосфере возникают турбулентные движения и создаются флуктуации показателя преломления (оптические неоднородности могут составлять от нескольких миллиметров до сотен и более метров). Время ( $10^{-3}$ – $10^{-2}$  с), в течение которого распределение неоднородностей остается постоянным, называют временем «замороженности» атмосферы.



Структурная постоянная турбулентности показателя преломления  $C_n^2$ , характеризующая влияние неоднородностей атмосферы на распространение оптического излучения (слабая, средняя и сильная турбулентность), зависит от времени суток, метеорологических условий, высоты над поверхностью Земли. Значение  $C_n^2$  входит во все соотношения, описывающие влияние турбулентности на распространение оптического излучения.

Турбулентность атмосферы вызывает мерцание (флуктуации интенсивности приходящего оптического сигнала вплоть до замирания) и дрожание (флуктуации фазы и угла прихода излучения) изображения. Чтобы снизить мерцание, увеличивают диаметр входного зрачка приемного объектива.

Для снижения дрожания увеличивают размер фотоприемника (если это возможно) и используют автослежение.

Кардинальный метод борьбы с влиянием турбулентности заключается в использовании адаптивных оптических систем, которые в большинстве случаев работают по принципу оперативной фазовой коррекции фронта оптического сигнала в соответствии с фазовыми искажениями, вносимыми средой [15].

При распространении излучения в неоднородной среде следует учитывать не только сравнительно быстрые изменения показателя преломления, проявляющиеся в турбулентности среды и приводящие к случайным изменениям параметров оптического сигнала, но и медленные изменения этого показателя, носящие систематический характер и вызывающие рефракцию.

**Рефракция** – искривление лучей в неоднородно нагретой атмосфере (приводит к угловому смещению объектов), снижающее точность угловых измерений (для приборов наблюдения не учитывается). Угол между касательной к направлению лучей в начальной (или конечной) точке их траекторий и прямой, соединяющей эти точки, называется *углом рефракции*.

Обычно углы рефракции имеют величину порядка десятков секунд, хотя в неблагоприятных условиях (при большом градиенте температуры) могут достигать десятков градусов (отражение солнечного света от приземного слоя воздуха вблизи нагретого асфальта).

Более подробно ознакомиться с оптикой атмосферы можно в [11].

## Глава 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

### 2.1. Определение и классификация оптико-электронных приборов

Любые окружающие нас тела (объекты наблюдения или фоны) являются источниками оптического излучения, характеристики которых изменяются в пространстве и времени. В оптических сигналах содержится информация о размерах, форме, положении и энергетическом состоянии тел. Эта информация может использоваться различным образом, однако во всех случаях происходит преобразование оптического излучения в другие виды энергии [5].

*Оптико-электронными (ОЭП)* называются приборы, в которых информация об исследуемом либо наблюдаемом объекте переносится оптическим излучением (содержится в оптическом сигнале), а ее первичная обработка сопровождается преобразованием энергии излучения в электрическую энергию. Таким образом, ОЭП – это приборы для приема, передачи, обработки и хранения информации, переносимой оптическим излучением, причем на этапе обработки носителем информации становится электрический сигнал [9, 10].

В измерительных и следящих ОЭП обработка изображения сводится к вычислению энергетических, геометрических либо временных параметров объектов простой или заданной формы, выполняемому с помощью аналоговых и цифровых устройств. Такие приборы могут работать без участия человека.

В ОЭП наблюдения осуществляется перенос изображения объектов в видимый диапазон для дальнейшего его рассмотрения человеком.

Структура многих ОЭП достаточно сложна, помимо оптических и электронных компонентов они содержат различные механические и электромеханические узлы, поэтому ОЭП часто называют оптико-электронными системами (ОЭС).

Например, для обеспечения круглосуточных и всепогодных наблюдений за объектами служат ОЭС, представляющие собой сложные приборные комплексы. Они состоят из разнородных по физическому принципу построения каналов, функционально связанных

друг с другом, с системами связи, навигации, компьютером, различными датчиками и, при необходимости, с системой вооружения.

В состав ОЭС могут входить: дневной оптический канал прямого видения через окулярную систему, тепловизионный прибор (ТПВ), дневная телевизионная (ТВ) система, низкоуровневая ТВ-система для работы при низких уровнях освещенности – в сумерках и ночью, лазерный целеуказатель – дальномер, радиолокационная станция – все вместе или различные их комбинации [5–7].

Обилие разнородных каналов, входящих в ОЭС, обусловлено многообразием задач, решаемых с ее помощью, а также несовершенством каждого канала в отдельности. Это вынуждает объединять их так, чтобы недостатки одного канала компенсировались бы достоинствами другого. В частности, дневной оптический канал прямого видения обеспечивает наивысшее качество изображения, но работает только днем. При снижении прозрачности атмосферы (туман, дождь, снегопад и пр.) дальность видения в нем падает. Кроме того, длительное наблюдение в окуляр утомляет оператора системы наблюдения. В связи с этим вместо дневного оптического канала чаще используется дневная ТВ-система. Хотя качество ее изображения (и соответственно дальность видения) ниже, оператор может наблюдать изображение с экрана ТВ-дисплея, что снижает утомляемость. Кроме того, возможны дублирование и дистанционная передача изображения другим операторам. Чтобы работать и ночью, в состав ОЭС входит низкоуровневая ТВ-система (НУТВ). От дневной ТВ-системы она отличается наличием на входе камеры электронно-оптического преобразователя (ЭОП), увеличивающего ее чувствительность. За счет автоматического диафрагмирования объектива НУТВ системы и работы устройства автоматической регулировки яркости в ее электронном канале система могла бы работать и днем. Но наличие ЭОП снижает качество изображения ТВ-системы, превращает ее из цветной в черно-белую, а сам ЭОП имеет ограниченный ресурс рабочего времени. По этим причинам НУТВ-систему используют только в сумерках и ночью. Недостатком ТВ-систем является неработоспособность при пониженной прозрачности атмосферы. Их рабочая область спектра 0,4–0,9 мкм не является для этого достаточно эффективной. Поэтому либо дополнительно к ТВ-системам, либо вместо них используют ТПВ, работающие в более благоприятной области спектра 3–5 или

8–14 мкм. Это позволяет сохранить возможность видения как при нормальной, так и при пониженной прозрачности атмосферы, обеспечивая наблюдение даже в дымах. Если дальность видения ТВ-системы зависит от уровня естественной освещенности, то ТПВ реагирует на разницу в температурах наблюдаемого объекта и окружающего его фона (ландшафта), поэтому ТПВ может работать при любой освещенности, т. е. круглосуточно. Однако качество изображения в ТПВ ниже, чем в ТВ-системе. Кроме того, его изображение специфично и не обеспечивает той детализации, которую создают ТВ-системы. В ТВ-камерах используются матрицы ПЗС, допускающие высокоточное измерение координат, что пока недоступно для ТПВ [5, 6].

Очень часто ОЭП выполняют те же функции, что и приборы радиодиапазона.

Большая частота оптических колебаний, по сравнению с радиосигналами, позволяет увеличивать объем обрабатываемой информации и скорость её передачи. При одинаковых размерах оптических и радиосистем за счет меньшей длины волны (большей частоты) в оптических приборах достигаются большие пространственное разрешение и точность измерений, чем в радиосистемах [6].

Оптический сигнал многомерен, т. е. он описывается многомерной функцией таких аргументов, как три пространственные координаты, длина волны или частота электромагнитного колебания, сравнительно медленное изменение амплитуды сигнала во времени, состояние поляризации. Управляя отдельными перечисленными параметрами, можно эффективно кодировать оптический сигнал или выделять его на фоне различных помех.

Большое число окружающих нас объектов имеет максимум энергии собственного электромагнитного излучения именно в УФ-, а чаще в ИК-областях спектра. Подавляющее число окружающих нас излучателей естественного и искусственного происхождения, имеющих температуру в пределах  $\pm 50$  °С (223–323 К), основное количество энергии излучает в ИК-диапазоне спектра. В радиодиапазоне их излучение гораздо слабее, и обнаружить или измерить его весьма трудно.

Однако из-за того что длины волн оптического излучения сравнимы с размерами неоднородностей и частиц, составляющих среды, через которые это излучение проходит на пути от источника излу-

чения к его приемнику, например, через атмосферу, ослабление оптических сигналов во многих реальных средах гораздо больше, чем радиосигналов. Поэтому многие приборы и системы, работающие в сложных эксплуатационных условиях, сегодня выполняются в виде комплексов оптико-электронных и радиоэлектронных блоков и подсистем.

Классификация изображающих ОЭС может быть проведена по ряду признаков:

- ✓ по области применения (приборы военного и гражданского назначения, медицинские приборы, системы охранной сигнализации, системы дистанционного зондирования и т. п.);

- ✓ способу анализа наблюдаемого пространства (сканирующие приборы, приборы с передающими электронно-лучевыми трубками, приборы «смотрящего» типа (обладают лучшими показателями функционирования), приборы с преобразователями яркости – приборы с электронно-оптическими преобразователями);

- ✓ спектральному диапазону работы (приборы, работающие в видимом (телевизионные камеры, цифровые фотоаппараты), ближнем ИК- (ПНВ и НУТВ камеры), в среднем ИК-диапазоне (тепловизионные));

- ✓ методу работы (пассивный – приборы видимого и ближнего ИК-диапазона, действующие по отраженному от наблюдаемых объектов излучению естественных источников; активный – используются специально созданные искусственные источники подсветки);

- ✓ виду обработки электрического сигнала (аналоговый, цифровой).

Возможны и дополнительные признаки классификации. Например, ПНВ различают по поколениям используемых в них ЭОПов.

Важно, что к настоящему времени сложились достаточно специфичные для каждой из этих групп конструктивные признаки, учитывающие характер работы прибора.

Несмотря на многообразие ОЭП и ОЭС, им присущи и некоторые общие признаки, например их элементная база. Структурные схемы многих ОЭП достаточно единообразны, поэтому существуют общие подходы, методы и методики проектирования и анализа различных ОЭП.

## 2.2. Обобщенная схема опико-электронных приборов наблюдения

На рис. 2.1 представлена одна из возможных схем работы ОЭП наблюдения, отражающая последовательность преобразования сигнала в приборе [6].

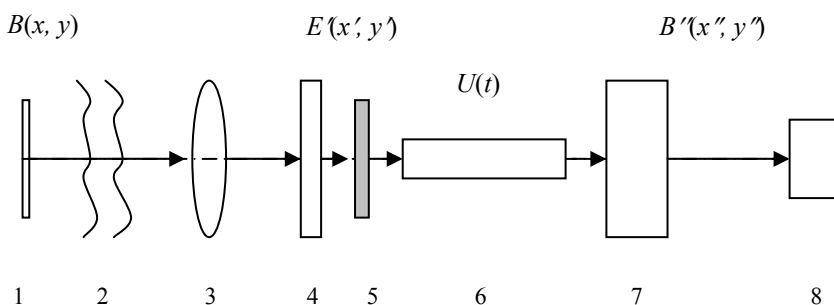


Рис. 2.1. Обобщенная схема ОЭП наблюдения:

- 1 – плоскость предметов; 2 – среда распространения излучения;
- 3 – приемная оптическая система; 4 – анализатор изображения;
- 5 – фотоприемник; 6 – электронный тракт; 7 – изображающее устройство;
- 8 – зрительный аппарат человека

Распределение яркости  $L(x, y)$  оптического излучения в предметной плоскости 1 (например, источник естественного или искусственного происхождения в ОЭП активного типа) преобразуется средой распространения излучения 2 (например, атмосферой) и приемной оптической системой прибора 3 в распределение освещенности  $E(x', y')$  в плоскости изображения, в которой установлен фотоприемник 5 (например, ПЗС-матрица), преобразующий оптический сигнал в электрический  $U(t)$ . Изображающее устройство 7 (например, мониторы, дисплеи и приемные телевизионные трубки) восстанавливает оптический сигнал в виде распределения яркости  $L''(x'', y'')$  в видимом диапазоне излучения, которое анализируется зрительным аппаратом человека.

В качестве анализатора изображения 4 может выступать элемент многоэлементного фотоприемника в приборах «смотрящего» типа.

Электронный тракт 6 осуществляет передачу, усиление и фильтрацию электрического сигнала.

Если в качестве фотоприемника использован ЭОП, то он заменяет собой фотоприемник 5, электронный тракт 6 и изображающее устройство 7, а анализатор изображения 4 в этом случае отсутствует.

Также прибор наблюдения может содержать несколько последовательных блоков, состоящих из элементов 3, 4, 5, 6, 7. Например, в телевизионном ПНВ изображение  $L'(x', y')$  с экрана ЭОПа с помощью согласующей оптической системы переносится в плоскость матричного фотоприемника, на экране дисплея сигнал формирует изображение  $L''_d(x''_d, y''_d)$ , рассматриваемое глазом.

### 2.3. Глаз как оптический прибор

Зрение – один из важнейших каналов, по которому в сознание человека поступает информация об окружающем его мире. С помощью глаза человек получает более 80 % всей информации. Диапазон изменения яркостей, воспринимаемых глазом, составляет  $10^{12}$ . Глаз различает до 25 тысяч оттенков (фиксирует цветовую информацию быстрее, чем мелкие детали объекта) в солнечном свете и может воспринять вспышку света длительностью менее миллисекунды.

Зрительные ощущения, возникающие в результате действия излучения на зрительный анализатор, позволяют судить о яркости и цветности излучения, о форме тел, излучающих или отражающих свет, об их взаимном расположении и движении. Многие оптические и, в частности, многие фотометрические приборы основаны именно на способности глаза различать яркость и цветность. Существенную роль играет то обстоятельство, что глаз способен оценивать не абсолютные величины яркости, не абсолютные характеристики цветности, а лишь сравнивать яркости или цветности смежных участков зрения.

Глаз – это универсальный оптический прибор, состоящий из оптической системы (хрусталика) и приемника (сетчатки).

Глаз представляет собой шаровидное тело, покрытое непрозрачной оболочкой – *склерой*, переднюю прозрачную часть которой называют *роговицей*. За роговицей находится *хрусталик*, разделяющий внутреннюю полость глаза на *переднюю камеру*, заполненную водянистой влагой, и *заднюю камеру*, заполненную стекловидным телом (рис. 2.2).

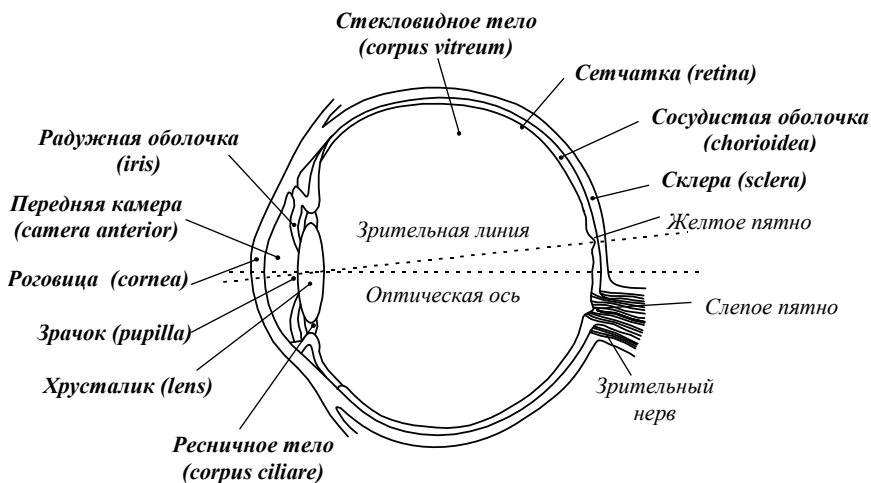


Рис. 2.2. Горизонтальный разрез правого глаза

**Хрусталик** – это двояковыпуклая линза из хрящевидного вещества, кривизна поверхностей которой может меняться под действием окружающих ее мышц, что приводит к изменению оптической силы хрусталика [2]. Хрусталик оказывает только корректирующее влияние на изображение, так как показатель преломления хрусталика мало отличается от показателей преломления окружающих его сред. Перед хрусталиком расположена диафрагма – *радужная оболочка*, содержащая большое количество пигментных клеток, через отверстие которой, называемое *зрачком*, свет поступает в глаз. Внутренняя поверхность задней камеры покрыта *сетчаткой*, являющейся разветвлением *зрительного нерва*. Между сетчаткой и склерой расположена *сосудистая оболочка*. Сетчатка содержит светочувствительные элементы – *палочки* (около 130 миллионов, содержат родопсин) диаметром около 2 мкм и *колбочки* (около 10 миллионов, содержат йодопсин) диаметром около 4 мкм (табл. 2.1) [12].



Таблица 2.1

## Основные характеристики палочек и колбочек

Колбочки	Палочки
Расположены главным образом в центральной ямке сетчатки	С наибольшей плотностью расположены вне центральной ямки сетчатки
Малое поле зрения с большим разрешением	Большое поле зрения с малым разрешением
Действуют при дневном зрении	Действуют при ночном зрении
Возможно цветное зрение	Не различают цвета
Малая светочувствительность $K_m = 683$ лм/Вт	Высокая светочувствительность $K_m = 1699$ лм/Вт
Относительная спектральная световая эффективность для дневного зрения соответствует $\lambda = 555$ нм	Относительная спектральная световая эффективность для ночного зрения соответствует $\lambda = 510$ нм

Кроме родопсина и йодопсина дно глаза обладает еще одним пигментом черного цвета, роль которого состоит в предохранении светочувствительного аппарата от чересчур сильных световых раздражений. При отсутствии светового раздражения зёрна этого пигмента находятся на задней поверхности сетчатки. Но при воздействии света начинается перемещение зёрен навстречу падающему свету. Они проникают в слои сетчатки и, поглощая значительную часть световой энергии, тем самым в сильной степени заслоняют палочки и колбочки от светового раздражения. Место входа зрительного нерва представляет собой слепое пятно (этот участок сетчатки нечувствителен к свету), в котором светочувствительные элементы отсутствуют. Диаметр слепого пятна 1,88 мм, что соответствует полю зрения  $6^\circ$ . Это значит, что человек с расстояния 1 м может не увидеть предмета диаметром 10 см, если его изображение проецируется на слепое пятно. Над слепым пятном, в месте пересечения с сетчаткой *зрительной оси* (зрительной линии), наклоненной к *оптической оси* глаза на угол  $5^\circ$ , находится *желтое пятно* овальной формы площадью около  $1 \text{ мм}^2$ , которому соответствует поле зрения около  $6\text{--}8^\circ$ . Средняя часть желтого пятна – *центральная ямка*, содержащая только кол-

бочки, является участком наиболее ясного видения (приблизительно  $2,5^\circ$ ), где глаз может различать наиболее тонкие детали.

Таким образом, глаз как прибор включает оптическую систему (хрусталик), матричный фотоприемник (сетчатку), канал передачи информации (зрительный нерв) и мощную систему обработки зрительного возбуждения (мозг). Оптическая и физиологическая системы глаза преобразуют энергию оптического излучения в зрительные ощущения.

Оптическая система глаза образует на сетчатке действительное перевернутое изображение предмета.

Основными характеристиками глаза являются:

1. Фокусное расстояние  $f'$ , определяющее масштаб изображения на сетчатке, для среднестатистического глаза в покое равно  $22,8$  мм (оптическая сила – величина, обратная фокусному расстоянию глаза, составляет  $58,6$  дптр). Так как система глаза действует в неоднородной среде:  $n = 1$ ,  $n' = 1,33$  (где  $n'$  – показатель преломления стекловидного тела), то переднее фокусное расстояние глаза  $f = -17,1$  мм (так как  $f'/f = -n'/n$ ).

2. Диаметр зрачка глаза в зависимости от условий освещенности изменяется от  $1,5$  до  $8$  мм. Таким образом, относительное отверстие глаза  $\frac{D_{\text{гл}}}{f'}$  может меняться в пределах от  $1 : 15$  до  $1 : 2,8$ , а диафраг-

менное число (величина, обратная относительному отверстию) – от  $2,8$  до  $15$ . Освещенность сетчатки глаза при этом будет изменяться примерно в  $30$  раз. При максимальном диаметре зрачка глаза человек довольно хорошо видит в полнолуние (освещенность объектов примерно  $0,1$  лк, а диафрагменное число глаза –  $2,8$ ).

3. Угловое поле зрения глаза в горизонтальной и вертикальной плоскости, составляющее  $150$  и  $125^\circ$  соответственно, большая часть которого используется для ориентации; поле зрения, пригодное для измерения, составляющее около  $8^\circ$  по горизонтали и  $6^\circ$  по вертикали; стандартным углом зрения считается угол в  $30^\circ$ . Вследствие этой особенности светочувствительного аппарата глазу для обозрения окружающего пространства приходится совершать непрерывное вращательное движение в своей орбите. Глазное яблоко может вращаться в пределах  $45$ – $50^\circ$ . Это вращение позволяет проецировать изображе-

ния различных предметов на центральную ямку и дает возможность рассмотреть их детально. Движения глаза совершаются без участия сознания и, как правило, не замечаются человеком.

4. Расстояние между центрами зрачков глаз (*глазной базис*), составляющее 56–72 мм, в среднем принимается равным 65 мм.

*Аккомодация* – свойство глаза приводить изображения предметов, расположенных на различных расстояниях, на поверхность сетчатки, т. е. приспособливаться к четкому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза.

Эта способность обеспечивается изменением оптической силы хрусталика под действием окружающих его мышц. Различают *дальнюю* и *ближнюю точки ясного зрения*. Первая определяется при отсутствии напряжения аккомодационных мышц, когда глаз ориентирован на бесконечность (задний фокус совпадает с сетчаткой), а вторая – при наибольшем напряжении мышц, когда фокусное расстояние глаза уменьшается до 18,9 мм и глаз способен видеть точку, расположенную на расстоянии 92 мм от передней поверхности роговицы. Расстояние между ближней и дальней точками, выраженное в диоптриях, называют *объемом аккомодации* (около 11 дптр). Наиболее удобное расстояние для чтения, точной работы при освещенности не менее 50 лк, составляющее 250–300 мм (расстояние до монитора – высота экрана, умноженная на семь) для нормального глаза, называют *расстоянием наилучшего зрения*.

Свойство глаза видеть раздельно две близко расположенные точки предмета называется *разрешающей способностью*, которая характеризуется угловым пределом разрешения  $\psi_{\text{гл}}$ , равным в среднем  $\psi = 60'' = 1' (0,00029 \text{ радиан})$  или пяти-шести парам линий на миллиметр (может быть от 30 до 90''). Это следует из дифракционной теории ( $\psi = 140''/D$ , при зрачке диаметром около 2 мм) и согласуется с угловыми размерами колбочек диаметром 0,005 мм при фокусном расстоянии глаза около 20 мм (т. е. две точки будут видны раздельно, если их изображение будет приходиться на разные колбочки).

Угловой предел разрешения зависит от многих факторов:

– от контраста предметов (способности глаза воспринимать различие в освещенности двух частей поля зрения, которые он может видеть раздельно);

– освещенности (при наблюдении темных предметов на светлом фоне освещенность должна быть от 50 до 200 лк, а при наблюдении светлых предметов на темном фоне – от 5 до 10 лк);

– диаметра зрачка и длины волны.

Кроме того, предел разрешения увеличивается при удалении изображения от центральной ямки и при наличии дефектов зрения. Например, разрешающая способность глаза составляет 2–3' при наблюдении изображений на экране, 1' – при наблюдении в обычные оптические приборы, а для отдельных приборов и дальномеров разрешающая способность достигает 10". Последнее объясняется большой чувствительностью глаза относительно поперечного смещения двух участков линии, что связано с мозаичным расположением колбочек.

Способность обоих глаз соединять два изображения одного предмета в единый зрительный образ называют *бинокулярным зрением*. Восприятие предмета при условии отсутствия двоения изображения обеспечивается за счет *конвергенции* – схождения зрительных осей глаз, вследствие чего изображения образуются на определенных участках сетчатки – *соответственных точках*. Наибольший угол конвергенции равен 32.

Способность трехмерного восприятия пространства (вплоть до 10–15 м) при наблюдении двумя глазами называют *стереоскопическим зрением* (если прикрыть один глаз, то будет трудно воспринимать «трехмерность» окружающего пространства). Минимальное расстояние  $R_{\min}$ , за пределами которого глаз не различает разноудаленность наблюдаемых точек, называют *радиусом стереоскопического зрения*:

$$R_{\min} = b/\Delta\varepsilon_{\min} \approx 1300 \text{ м} \quad (b = 65 \text{ мм}, \Delta\varepsilon_{\min} = 10'' = 0,5 \cdot 10^{-4}).$$

Если нормальный глаз аккомодирован на бесконечность, то изображение фокусируется на сетчатке. Такой глаз называют *эметропическим*. Если изображение удаленного предмета не совпадает с сетчаткой, глаз является *аметропическим*. Различают два типа аметропии: *близорукость* (миопию) и *дальнозоркость* (гиперметропию). В первом случае задний фокус глаза расположен перед сетчаткой, во втором – за ней. Для коррекции близорукости применяют отрицательные линзы, а для исправления дальнозоркости – положительные.

Спектральная чувствительность глаза находится в интервале длин волн 360–780 нм. Наиболее сильное воздействие на глаз оказывает излучение желто-зеленого цвета в интервале длин волн 550–570 нм (при дневном зрении максимум спектральной чувствительности глаза приходится на длину волны 555 нм, а при сумеречном – 510 нм).

Воздействие потока излучения с длиной волны 555 нм условно принимают за единицу; действие на глаз излучений других длин волн в видимом участке спектра оценивают коэффициентом относительной спектральной световой эффективности.

В основе восприятия цвета лежат сложные физико-химические процессы, совершающиеся в зрительных рецепторах. Различают три типа колбочек, проявляющих наибольшую чувствительность относительно трех основных цветов видимого спектра:

- красно-оранжевый (600–700 нм);
- зеленый (500–600 нм);
- синий (400–500 нм).

Особенности цветовой чувствительности клеток определяются различиями в зрительном пигменте. Комбинации возбуждений этих приемников разных цветов дают ощущения всей гаммы цветовых оттенков.

В видеотехнике эти цвета называются тремя первичными цветами – RGB (*Red, Green, Blue*). Все цвета, встречающиеся в природе, можно создать, смешивая свет трех этих длин волн и варьируя их интенсивность. Смесь, состоящая из 100 % каждого цвета, дает белый свет. Отсутствие всех цветов дает отсутствие света или черный цвет. Нарушение цветового зрения называется *дальтонизмом*.

Восприятие цвета заметно изменяется в зависимости от внешних условий. Один и тот же цвет воспринимается по-разному при солнечном свете и при свете свечей. Например, при погружении в воду на небольших глубинах все цвета спектра человеческого глаз различает почти так же, как и в воздушной среде. Однако с увеличением глубины восприятие некоторых цветов ухудшается и даже совсем исчезает, что объясняется свойством воды на различных глубинах избирательно поглощать одни части видимого спектра сильнее других, так как вода представляет собой тем более густой синий светофильтр, плотность которого тем выше, чем толще ее слой. Ультрафиолетовые лучи проникают довольно глубоко, зато инфракрасные поглощаются буквально несколькими сантиметрами воды. По мере

увеличения глубины последовательно отфильтровываются красные, оранжевые, желтые, зеленые, синие и фиолетовые участки спектра. Например, красный цвет на глубине около 5 м становится бордовым (вода пропускает до 45 % голубой части спектра, в то же время поглощая до 60 % красной его части), затем с погружением постепенно превращается в коричневый, а за пределами 12 м красные цвета все более превращаются в темно-зеленые. На глубине 20–30 м все цвета сизо-серые, однотонные и тусклые.

Способность глаза приспособливаться к различной интенсивности светового воздействия называют *адаптацией*. При малых яркостях предметов ( $10^{-7}$ –1 кд/м<sup>2</sup> или освещении меньше 0,01 лк) световое раздражение воспринимается в основном палочками (темновая адаптация; происходит в течение часа), а при яркостях 1– $10^5$  кд/м<sup>2</sup> или освещении 100–10000 лк – только колбочками (световая адаптация; происходит в течение 8–10 мин). Практически цветное зрение начинается с освещенности примерно 1 лк. Адаптация обеспечивается также изменением диаметра зрачка, регулирующим световой поток, поступающий в глаз.

## 2.4. Оптическая система оптико-электронных приборов

Оптическая система ОЭП активного типа включает передающий (отсутствует у ОЭП пассивного типа) и приемный каналы. Первый из них предназначен для обеспечения требуемой освещенности наблюдаемого объекта (состоит, например, из источника излучения, конденсора, светофильтра и объектива или лазера и афокальной насадки), а второй – для сбора необходимого количества энергии излучения и формирования требуемого качества изображения объекта с помощью объектива на поверхности светочувствительных приемников (ПЗС-матрица, микроболометр), сетке, экране. В обоих случаях основным элементом оптической системы является объектив. К вспомогательным элементам приемного канала можно отнести, например, окуляр визуального ПНВ и систему переноса изображения с экрана ЭОП в плоскость матричного фотоприемника в НУТВ камере.

Конструктивно объективы делятся на линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые.

По назначению их разделяют на объективы зрительных труб и телескопов, микроскопов, фотографические (киносьемочные, аэро-,

гидросъемочные, телевизионные), проекционные и специальные (спектральных приборов и для лазеров).

Различают объективы:

с фиксированным фокусным расстоянием;

телеобъективы;

панкратические объективы с переменным фокусным расстоянием, позволяющие получать изображения различного масштаба при неизменном расстоянии до объекта съемки.

К основным параметрам и характеристикам объективов относятся:

спектральный рабочий диапазон;

геометрические параметры (фокусное расстояние, угловое поле зрения, размер входного зрачка, задний фокальный отрезок);

качество изображения;

светотехнические параметры (коэффициенты светопропускания и рассеяния, относительное отверстие, диафрагменное число);

масса и габариты с учётом всех механических элементов конструкции;

условия функционирования (температурный рабочий диапазон, допустимый градиент температур, давление и влажность окружающей среды, радиационный уровень, допустимые механические нагрузки и т. п.), в которых ОС обеспечивает необходимое качество изображения.

Для объективов, работающих в ИК-области спектра, можно выделить ряд специфических особенностей (из-за работы в условиях повышенной температуры, больших по сравнению с видимым диапазоном рабочих длин волн и особенностей матричных фотоприёмников):

необходимость получения достаточно равномерной освещённости и однородного качества изображения по всему угловому полю прибора;

необходимость учёта нагрева оптической системы, компенсация термоаббераций;

большой, чем в видимом диапазоне, дифракционный предел разрешения;

увеличенная глубина резкости или увеличенный допуск на расфокусировку из-за больших длин волн в сочетании с ужесточением этого допуска для объективов с малыми диафрагменными числами для получения высокого температурного разрешения;

ограниченный выбор материалов для оптических деталей, особенно в средневолновом и длинноволновом инфракрасном диапазонах.

Основные характеристики объектива:

относительное отверстие  $D/f_{об}'$ ;

фокусное расстояние  $f_{об}'$ ;

угловое поле  $2\omega$ ;

коэффициент пропускания  $\tau_{об}$  (0,75–0,95);

показатели качества (диаметр кружка рассеяния, разрешающая способность, остаточные aberrации, функция передачи модуляции и др.).

Относительное отверстие характеризует светосилу объектива и определяет освещенность изображения. Увеличение относительного отверстия при сохранении качества изображения требует усложнения конструкции оптических элементов либо путем увеличения числа компонентов, либо заменой сферических поверхностей асферическими. В современных приборах используются объективы, у которых  $D/f_{об}$  составляет от 1 : 2 до 1 : 0,75. Близкое к дифракционному качество изображения достигнуто в двухлинзовых объективах с  $D/f_{об} = 1,1–1,2$  за счет применения асферических поверхностей (в настоящее время более 20 % поверхностей деталей в ОС являются асферическими).

Фокусное расстояние приемного объектива определяется, как правило, после выбора диаметра входного зрачка  $D$ , в зависимости от требуемого углового поля зрения  $2\omega$  (зависит от способа работы системы; при малых угловых полях легче получить хорошее качество изображения за счет уменьшения полевых aberrаций, а при больших, например, проще обнаружить объект наблюдения) и линейных размеров фотоприемника  $a_{фп} \times b_{фп}$ :

$$f'_{об} = \frac{\sqrt{a_{фп}^2 + b_{фп}^2}}{2\text{tg}\omega}.$$

Коэффициент пропускания зависит от конструкции объектива и наличия просветляющих покрытий на преломляющих поверхностях.

Простейший объектив – это одиночная линза. Основным ее недостатком является плохое качество изображения, так как ей присущи все виды aberrаций, среди которых особенно существенны



хроматизм и сферическая абберация. Гораздо лучше качество изображения за счет устранения хроматизма и уменьшения сферической абберации и комы обеспечивают сравнительно простые двухлинзовые склеенные и несклеенные объективы. Их относительное отверстие обычно не превышает 1 : 3 при угловом поле около  $10^\circ$  и диаметре входного зрачка не более 100–150 мм.

Для обеспечения хорошего качества изображения при больших угловых полях следует применять более сложные системы – триплеты, многоканальные объективы и т. д., обладающие меньшим пропусканием.

Преимущества линзовых систем по сравнению с зеркальными следующие:

- возможность хорошей абберационной коррекции;

- большие угловые поля;

- технологическая простота конструкции (проще сборка и юстировка, большая нерасстраиваемость вследствие температурных воздействий и др.);

- возможность совмещения функций защитного стекла и первого компонента.

В то же время линзовым системам присущи такие недостатки, как высокое селективное поглощение в ряде участков оптического спектра, сравнительно большие хроматические абберации, значительные продольные размеры и масса, большая стоимость некоторых оптических материалов, из которых изготавливают линзы для УФ- и ИК-диапазона, трудность осуществления оптико-механического сканирования.

Многих этих недостатков нет у зеркальных систем, основными достоинствами которых являются возможность работы в широком спектральном диапазоне с небольшими потерями энергии излучения, отсутствие хроматизма и меньшие продольные размеры. Одиночное зеркало часто служит в качестве простейшего объектива, особенно если оно является параболическим. Довольно широко используются и более сложные зеркальные системы (например, зеркальная система Кассегрена), основным недостатком которых является экранирование части входного зрачка либо приемником, либо вторичными отражателями (контррефлекторами).

Для большинства зеркальных систем характерна некоторая технологическая усложненность по сравнению с однотипными линзовыми объективами.

В последние десятилетия в связи с развитием адаптивных оптических систем появились зеркальные системы с управляемым в процессе работы ОЭП профилем отражающей поверхности – составные зеркала, зеркала с синтезированной апертурой, гибкие зеркала и др. [15].

Многими преимуществами линзовых и зеркальных систем обладают зеркально-линзовые системы, которые кроме достаточно высокого пропускания могут иметь большие относительные отверстия и значительные угловые поля.

Перечисленные достоинства и недостатки линзовых и зеркальных систем во многом свойственны не только объективам ОЭП, но и другим их оптическим звеньям, т. е. всей оптической системе ОЭП.

В результате остаточных монохроматических и хроматических, геометрических (например, сферическая, кома, астигматизм, кривизна поля, дисторсия) и волновых (например, если величина остаточной волновой аберрации не превышает  $0,25\lambda$ , то ОС считается хорошей, а если  $0,1\lambda$ , то – идеальной) аберраций (погрешностей изображения) ОС и дифракции точка изображается прибором в виде пятна (в идеальной системе точка изображается точкой), средний размер которого называется диаметром кружка рассеяния  $d_{кр}$  (диаметр центрального яркого пятна в дифракционной картине изображения точки) и является одним из критериев оценки качества ОС прибора.

Две близко расположенные точки будут изображаться раздельно, если расстояние между их изображениями больше диаметра кружка рассеяния. Это расстояние экспериментально оценивается по разрешающей способности прибора  $N$ , которое характеризуется числом штрихов разрешаемой миры на 1 мм ее длины:

$$N = 1/(2d_{кр}),$$

приведенным к плоскости изображения прибора. Понятие «разрешающая способность» используется для оценки качества различных ОС, ряда фотоприемников, ЭОП, визуализирующих устройств (электронно-лучевых трубок, жидкокристаллических экранов, плазменных панелей).

Существуют и другие показатели качества, например: число Штреля (характеризует степень коррекции aberrаций ОС и равно отношению максимальных значений реальной и дифракционной функций рассеяния точки, которое при волновой aberrации  $0,25\lambda$  будет 0,8), функция рассеяния точки (тест-объект в виде точки) или линии (тест-объект–линия), пограничная кривая (тест-объект–полуплоскость), оптическая передаточная функция, функция передачи модуляции (определяется дифракцией и aberrациями), коэффициент передачи модуляции и др.

Критерии оценки качества оптического изображения для различных ОС выбираются в зависимости от назначения и выполняемых ими задач.

## 2.5. Оптические материалы

К оптическим [4] относят материалы, прозрачные для оптического диапазона (некоторого его участка) электромагнитных волн, используемые, как правило, для изготовления оптических деталей приборов:

1. Оптические стекла: бесцветные (ГОСТ 3514–94), цветные (ГОСТ 9411–91Е), кварцевые (ГОСТ 15130–86), органические (ГОСТ 10667–90), с особыми свойствами (светорассеивающие, фотохромные, радиационно стойкие, стекла для активных элементов лазеров, инфракрасные или халькогенидные, ванадатные и др.).

2. Оптические ситаллы (стеклокристаллические материалы с температурным коэффициентом линейного расширения, близким к нулю): Zerodur, астроситалл СО-115М.

3. Оптические кристаллы: щелочные (KCl, NaCl), фториды (LiF, MgF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>), для ИК-области (Ge, Si), для генерации лазерного излучения (иттрий-алюминиевый гранат, легированный ионами эрбия для модуляции оптического излучения (KDP – дигидрофосфат калия), DKDP – дидейтерофосфат калия).

4. Оптическая керамика: оптическая (КО12), электрооптическая (КЭО10), люминесцентная (КОЛ1).

5. Полимерные (волоконная, градиентная, офтальмологическая оптика).

Материалы, используемые для изготовления оптических деталей, должны обладать определенными оптическими, механическими, термическими, химическими и тому подобному свойствами.

К основным характеристикам оптических материалов относятся:

а) *оптические*: показатель преломления, средняя дисперсия, оптическая однородность стекла по показателю преломления, двойное лучепреломление, показатель ослабления, бессвильность, пузырность;

б) *спектральные*: оптическая плотность  $D$  и спектральные кривые коэффициента пропускания ( $\tau$ );

в) *механические*: плотность, упругость, прочность, твердость;

г) *термические*: температурный коэффициент линейного расширения материала, удельная теплоемкость, теплопроводность, температурная стабильность материала.

Выбор материала оптической детали осуществляют, исходя из ее функционального назначения и требуемых показателей качества с учетом условий эксплуатации, технологии изготовления и т. д., а также руководствуясь характеристиками и показателями качества материалов, их номенклатурой, сортаментом, условиями и формами поставки.

Материалы оптической системы необходимо выбирать с учетом эксплуатационных, конструктивных и технологических характеристик конкретного ОЭП. При этом обычно нужно учитывать следующие свойства оптических материалов: спектральное пропускание или отражение, показатель преломления или коэффициент отражения, дисперсию, изменение спектра пропускания и показателя преломления при изменении температуры, твердость, стойкость к воздействию различных сред (прежде всего воды), плотность, теплопроводность, термическое расширение, теплоемкость, модуль упругости, температуру размягчения и плавления, наконец, стоимость, возможность обработки и доступность материала.

Многообразие этих свойств и требований к ОЭП приводит к тому, что выбор оптического материала становится серьезной технико-экономической задачей. Правильно выбрав материал, можно упростить конструкцию оптического узла и улучшить характеристики всей системы. При выборе материалов для оптических деталей следует помнить о технологичности как отдельных узлов, так и всей системы.

Для работы в видимой и ближней ИК-областях спектра очень широко используется обычное оптическое стекло, достоинствами которого являются дешевизна, хорошая обрабатываемость, высокие физико-механические свойства, достаточная прозрачность для излучения с длинами волн до 2 мкм, что в видимом и ближнем ИК-диапазонах делает его наиболее приемлемым материалом. Однако

для работы в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах приходится использовать либо специальные виды стекол (стекла типа ИКС), либо кристаллы или оптическую керамику.

Такие оптические кристаллы, как фтористый кальций, фтористый литий, оптические керамики, широко применяются в различных ОЭП. Выбор типа кристалла определяется как его соответствием тем условиям, в которых работает прибор (температура, влажность и т. д.), так и доступностью его получения. К сожалению, бывает трудно получить хороший кристалл нужного размера. Если из обычных и ИК-стекол удастся изготовить детали диаметром в несколько десятков сантиметров, то диаметры линз из оптических керамик обычно не превышают 200 мм, а из некоторых кристаллов – и того меньше (например, из КРС-5 – не более 125 мм).

Одним из наиболее распространенных материалов оптических ИК-систем является германий. Он широко используется для изготовления оптических элементов, прозрачных в диапазоне 8–13 мкм. В диапазоне 3–5 мкм он применяется для хроматической коррекции, например, совместное использование в объективе линз, изготовленных из германия, и линз из халькогенидных стекол. В зеркальных и зеркально-линзовых системах, работающих в ИК-диапазоне, в качестве материала для защитных элементов и коррегирующих линз часто используют германий, так как тонкие пластины и мениски или маленькие линзы обладают малыми хроматическими аберрациями.

В качестве материалов для подложек зеркал, работающих в широком диапазоне температур, используются пирекс, плавный кварц, ситаллы, бериллий и другие материалы.

Коэффициент отражения большинства металлов увеличивается с ростом длины волны излучения. Хорошей отражательной способностью обладает алюминий. В ИК-области спектра его коэффициент отражения достигает 95 %. В качестве других отражающих покрытий применяются такие материалы, как золото, палладий, родий, коэффициент отражения которых в ИК-области спектра достигает 95–98 %.

## **2.6. Приемники оптического излучения**

Приемник излучения (ПИ) является основным элементом ОЭП и представляет собой устройство, служащее для восприятия энергии излучения и преобразования её в энергию других видов (элект-

рическую, тепловую и т. д.) с целью последующей регистрации. Специальные приемники также служат для анализа закона распределения освещенности в изображении, определения координат изображений и т. п. (например, ПЗС-матрицы) [3, 5, 10].

Приемники излучения можно классифицировать по следующим признакам: виду энергии, в которую преобразуется излучение; области спектра, где они наиболее чувствительны и находят наибольшее применение (УФ, видимая, ближняя, средняя или дальняя ИК-область спектра); характеру изменения чувствительности при изменении длины волны падающего излучения (селективные и неселективные) и др.

По виду энергии ПИ делят на два основных класса: фотоэлектрические и тепловые.

*Фотоэлектрические ПИ*, действие которых основано на использовании различных явлений фотоэффекта, имеют селективную чувствительность к излучению с различными длинами волн. В таких приемниках под действием потока излучения меняется электропроводность чувствительного слоя, что ведет к изменению фототока или возникновению фотоЭДС. Их делят на приемники с внешним фотоэффектом (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, ЭОП) и приемники с внутренним фотоэффектом (фоторезисторы, фотодиоды, фототриоды).

*Тепловые ПИ*, в которых под воздействием потока излучения изменяется температура чувствительного слоя, а затем происходят изменения свойств приемника: изменяется проводимость (боллометры) или диэлектрическая постоянная (пирозлектрические приемники), являются неселективными, одинаково реагируя на излучения различных длин волн.

Отдельную группу ПИ образуют: многодиапазонные (многоспектральные), работающие в двух или более диапазонах оптического спектра; многоэлементные (приборы с зарядовой связью – ПЗС-матрицы, по англ. – ССД; микроболометры); координатные (по выходному сигналу которых определяют координаты изображения источника излучения) и др.

Для оценки возможности использования ПИ в оптических системах учитывают их основные параметры и характеристики.

Параметрами ПИ обычно называют величины, характеризующие его свойства при работе в определенных условиях и служащие критериями оценки качества приемника (чувствительность, пороговые и шумовые параметры, инерционность, сопротивление приемника, спектральные, геометрические, электрические и др.).

Зависимость, определяющая изменение какого-либо параметра ПИ при изменении внешнего воздействия на него, называется *характеристикой* (спектральные, вольт-амперные, частотные, температурные, временные и пространственные).

Выбор какого-либо ПИ для решения конкретной практической задачи – весьма трудная задача, требующая одновременного анализа самых различных и многочисленных факторов, в первую очередь относящихся как к технико-экономическим параметрам собственно приёмника, так и к конкретным условиям его применения.

*Многоэлементные ПИ* можно разделить на приемники с полной электрической развязкой отдельных чувствительных элементов и приемники с внутренними электрическими связями. Приемники первого типа представляют набор отдельных одноэлементных приемников, обычно изготавливаемых на единой подложке и часто имеющих самостоятельные каналы предварительного усиления (двух- и четырехплощадные ПИ), приемники второго типа – двумерные многоэлементные ПИ с числом элементов от нескольких десятков до нескольких тысяч, размеры которых могут составлять от единиц до десятков микрометров (например, для ИК-излучения – микроболометры, а для видимого и ближнего ИК-диапазонов – фотоприемники на базе ПЗС-структур – ФПЗС).

ПЗС – это полупроводниковые устройства, являющиеся двумерными матрицами (фотоматрицами) на основе структур металл–диэлектрик–полупроводник, состоящие из структурированного, т. е. разделенного на отдельные элементы (пиксели), фоточувствительного слоя (собственно ПИ) и электрически связанной с ним системы считывания (съема) и первичной обработки сигналов, образующихся на отдельных элементах при их облучении потоком, собираемым объективом.

Матричные фотоприемники можно классифицировать [6]:

по технологии выполнения (гибридная и монолитная);

отсутствию или наличию накопления заряда;

принципу считывания сигналов (с последовательным переносом заряда – координатной выборкой).

Фотоприемные устройства могут выполняться по гибридной технологии, когда каждый элемент фоточувствительного слоя соединяется через свой контакт с отдельной ячейкой схемы считывания (приемник излучения и схема считывания формируются в разных объемах), или по монолитной технологии, когда фоточувствительные элементы и ячейки схемы считывания формируются в одном объеме (ПИ видимого и ближнего ИК-диапазона: ФПЗС и КМОП (комплементарная структура «металл–окисел–полупроводник», по англ. – CMOS. *Комплементарная структура* – это чип, построенный по схеме, в которой *p*- и *n*-канальные полевые транзисторы используются парами и взаимно дополняют друг друга).

ПЗС-матрицы собирают всю картину в аналоговой версии и только потом оцифровывают (предназначены для создания изображений высокой степени детализации), а КМОП оцифровывают каждый пиксель на месте (большинство цифровых фотоаппаратов и видеокамер, могут применяться в телескопах и микроскопах).

Матричные ПИ можно разделить на ПИ прямого действия (без накопления) и приемники с накоплением заряда [8, 10].

В первом случае в ПИ регистрируются мгновенные значения потоков, поступающих на отдельные чувствительные элементы (представляют собой линейки отдельных элементов; обладают высоким быстродействием, но их чувствительность невелика). Во втором случае (используется в большинстве ОЭП наблюдения) каждый из чувствительных элементов присоединен к накопителю зарядов – емкости, обеспечивающей накопление зарядов от данного элемента за промежуток времени  $\tau_{\text{нак}}$ . Затем через мультиплексор (компонент, переключающий несколько сигнальных линий в одну) сигналы передаются в электронный тракт. Если время смены изображения (время продолжительности кадра) равно  $t_{\text{к}}$ , а число элементов пространственного разрешения (число пикселей) равно  $m \times n$ , то тактовая частота мультиплексора, т. е. частота считывания (определяет время считывания сигнала с одного элемента)

$$f_{\text{сч}} = mn / t_{\text{к}}.$$

Для матричных приемников  $\tau_{\text{нак}} \leq t_{\text{к}}$ . Физически частота считывания ограничивается накопительной емкостью, поэтому при боль-



шом числе элементов, когда обеспечивается высокое разрешение, частота кадров снижается.

Увеличение времени накопления приводит к повышению чувствительности, но ограничивается емкостью накопительной ячейки: при большом времени накопления ячейка переполняется даже при небольшой освещенности, что снижает контраст изображения, в ПЗС накопленные заряды перетекают в соседние ячейки (блюминг) и вокруг ярких объектов возникают ореолы или пропадают мелкие детали в изображении. Таким образом, переполнение ячейки ограничивает диапазон экспозиций. Поэтому конструкторы ПИ создают дополнительные каналы, позволяющие «сливать» часть заряда (антиблюминг) или используют отсекающие фильтры.

По принципу считывания сигналов с отдельных элементов (пикселей) ПИ можно разделить на два класса: с последовательным переносом зарядов (для ПЗС – строчная, кадровая и строчно-кадровая схемы) и с координатной (произвольной) выборкой. Общий недостаток считывания на базе ПЗС – невозможность произвольной выборки сигналов с отдельных элементов приемника.

К габаритным параметрам следует отнести формат и число элементов ПИ.

*Формат* – это линейные размеры фоточувствительной зоны ПИ.

Для телевизионных матриц с отношением сторон 4 : 3 он указывается одним числом, равным длине диагонали, выраженной в дюймах (видиконовые (оптические) или телевизионные дюймы – единица измерения, равная 0,7 английского дюйма или 17,78 мм):  $c = 1/4''$  (4 мм),  $1/3''$  (6 мм),  $1/2''$  (8 мм),  $2/3''$  (11 мм) и т. д.

Вместе с фокусным расстоянием объектива  $f'_{об}$  формат определяет угловое поле зрения прибора  $2\omega_{зр}$ :

$$\operatorname{tg}\omega_{зр} = c/2f'_{об}.$$

Число элементов  $m \times n$  соответствует произведению числа строк  $m$  и числа элементов в строке  $n$ .

Зная формат и число элементов, несложно найти размеры пикселя  $d_x$  и  $d_y$  (обычно они указываются производителем), которые определяют разрешение матрицы (например, 25 мкм).

ПЗС используются для хранения, передачи или преобразования информации, заключенной в потоке излучения, в электрические сиг-

налы. Приемники на базе ПЗС применяются в устройствах ввода и вывода информации (отображающие устройства, устройства памяти).

Достоинствами ПЗС являются:

высокая разрешающая способность;

малое потребление мощности, затрачиваемой на обработку информации;

хорошие технологичность и надежность;

высокое быстродействие;

возможность обрабатывать и кодировать изображение непосредственно в самом формирователе сигнала.

Основные недостатки этих ПИ:

неоднородность фотоэлектрических свойств (например, чувствительности отдельных элементов);

ограниченный спектральный рабочий диапазон (0,5–1,1 мкм и у некоторых – 3–5 мкм);

невозможность произвольной выборки сигналов с любого элемента ПЗС;

выход из строя всей строки развертки при потере чувствительности (например, в следствии «прожига») одного из элемента этой строки.

Благодаря совершенствованию технологии КМОП-матрицы все чаще используются в ОЭП.

## **Глава 3. ТИПОВЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ**

### **3.1. Приборы ночного видения**

Приборы ночного видения (ПНВ) – это ОЭП части видимого и ближнего ИК-диапазона (0,7–1,2 мкм), предназначенные для наблюдения за удаленными объектами, скрытной передачи информации, прицеливания, управления транспортными средствами, выполнения ремонтных и спасательных работ и решения других задач в условиях плохой визуальной видимости, т. е. ночью. Некоторые ПНВ комплектуются малогабаритными инфракрасными осветителями, что дает возможность работы в полной темноте (пещеры, подвалы). Их работа основана на использовании такого специфического приемника излучения, как электронно-оптический преобразователь (ЭОП).

В настоящее время приборы ночного видения широко применяются не только войсковыми и другими структурами, но и охотниками, туристами, рыбаками, охранными подразделениями и др.

С помощью ПНВ видеть ночью можно вследствие того, что они преобразуют и многократно усиливают излучение источников естественной ночной освещенности, т. е. отражаемый от планет солнечный свет, свет звезд, свечение кислорода и озона в верхних слоях атмосферы.

Существуют два основных способа классификации ПНВ: по функциональному назначению и поколению ЭОПа, установленного в ПНВ.

На данный момент выпускаются ПНВ различных типов, конструкции которых оптимизированы в соответствии с их назначением. Основными типами ПНВ являются:

монокуляр ночного видения (предназначен для наблюдения одним глазом с увеличением от одного до нескольких крат);

бинокль ночного видения (предназначен для наблюдения двумя глазами с увеличением от одного до нескольких крат);

очки ночного видения (предназначены для наблюдения двумя глазами без увеличения, т. е. увеличение составляет один крат);

ночной прицел (ПНВ, закрепляемый на стрелковом оружии и предназначенный как для наблюдения, так и для ведения прицельной стрельбы);

псевдобинокуляры (ПНВ с одним объективом и двумя окулярами предназначены для наблюдения двумя глазами с увеличением от одного до нескольких крат).

В основе действия ЭОП лежит преобразование оптического или рентгеновского изображения в электронное, осуществляемое с помощью фотокатода, а затем – электронного изображения в световое (видимое), получаемое на катодоллюминесцентном экране. Изображение объекта проецируется на фотокатод с помощью объектива ЭОП [5].

Различают ЭОП одно- и многокамерные (каскадные); последние представляют собой такое последовательное соединение двух или более однокамерных ЭОП, при котором световой поток с экрана первого ЭОП (каскада) направляется на фотокатод второго и т. д.

ПНВ состоит из трех оптических узлов: объектива, окуляра и ЭОП (определяет предельные параметры и цену ПНВ). С помощью объектива 1 на фотокатоде 2 ЭОП создается оптическое изображение объекта б (рис. 3.1). Под воздействием светового излу-

ния на фотокатоде возникает эмиссия электронов, число которых в каждой точке фотокатода пропорционально облученности [10]. Происходит первичное преобразование световой энергии в электрическую. Ускоряющим электрическим полем электроны разгоняются и приобретают энергию, достаточную для возникновения свечения материала, из которого изготовлен экран. В момент выхода из фотокатода электроны направлены равномерно во все стороны, но электронно-оптическая фокусирующая система 3, предусмотренная в ЭОП, стягивает их в узкий пучок и на люминесцентном экране 4 формирует изображение фотокатода. В плоскости экрана преобразование электрической энергии в оптическую происходит при помощи люминесцирующего вещества, которое светится видимым светом. С экрана изображение с помощью окуляра 5 воспринимается глазом 7 человека или фотоприемным устройством.

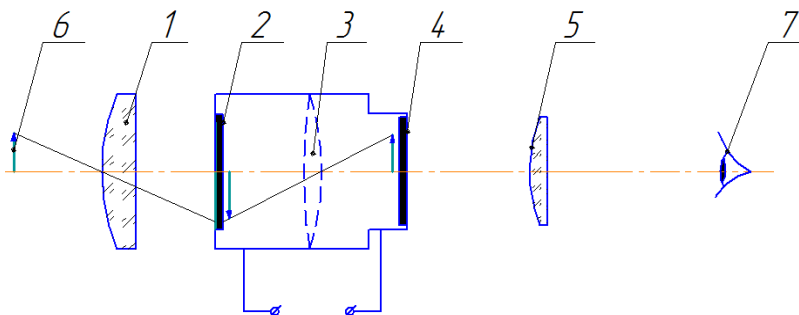


Рис. 3.1. Принципиальная схема прибора ночного видения:  
 1 – объектив; 2 – фотокатод; 3 – ЭОП; 4 – экран ЭОПа;  
 5 – окуляр; 6 – объект; 7 – глаз человека.

По принятой в мире терминологии ЭОП подразделяются на пять поколений: I, II, III, IV и V (с некоторыми промежуточными ступенями  $I^+$ ,  $II^+$ ,  $III^+$ ), отличающихся друг от друга техническими характеристиками, конструктивными параметрами, материалами, технологиями изготовления, возможностями и стоимостью.

К основным техническим характеристикам ПНВ относятся:

увеличение (другое название – кратность, видимое увеличение);

дальность видения (подразумевают дальность опознавания – расстояние, на котором можно различить детали фигуры или объекта,

или дальность обнаружения – возможность определить наличие на заданном расстоянии объектов значительно больших размеров);

световой диаметр объектива;

угол поля зрения;

коэффициент усиления света (показывает, во сколько раз световой поток, который мы наблюдаем на выходе из окуляра ПНВ, превышает световой поток, поступающий на вход оптической системы от объекта наблюдения);

разрешение в центре поля зрения.

### **3.2. Телевизионные системы наблюдения**

Основным компонентом систем телевизионного наблюдения является видеокамера, предназначенная для преобразования оптического изображения в электрический телевизионный сигнал, пригодный для передачи и воспроизведения, с помощью датчика изображения, входящего в состав видеокамеры. Как правило, в качестве такого датчика используются передающие телевизионные трубки и твердотельные преобразователи «свет–сигнал».

Все известные передающие телевизионные трубки объединяет наличие фотопроводящей мишени, малые габариты и масса, небольшое число регулировок, достаточно высокая чувствительность и разрешающая способность.

Практически все современные телевизионные малогабаритные камеры наблюдения строятся на основе ПЗС-матрицы (в настоящее время все чаще используются КМОП-матрицы), поверхность которой состоит из множества пикселей (например,  $1000 \times 1000$ ). Чем большее количество пикселей размещается на матрице ПЗС, тем выше качество и четкость получаемого изображения. Как правило, разрешающая способность по горизонтали таких камер составляет 330–600 твл (телевизионных линий). Этот параметр приводится в паспортных данных на камеру. Разрешение по вертикали всех камер одинаково, ибо ограничено стандартом на количество строк разложения.

Сегодня в мире существует и используется несколько различных ТВ-стандартов. Международным консультативным комитетом по радиовещанию (Committee Consultative International Ties Radiotelecommunique) – CCIR установлен стандарт для чёрно-белого телевидения (этот стандарт, дополненный сигналами цветности, на-

зывается стандартом PAL). Рекомендации CCIR/PAL используются на большей территории Европы, в Австралии, Новой Зеландии, большинстве стран Африки и Азии. Аналогичная концепция используется и в рекомендациях EIA/NTSC для ТВ-стандарта, используемого в США, Японии и Канаде, а также в рекомендациях SECAM, используемых во Франции, России, Египте, некоторых бывших французских колониях и странах Восточной Европы. Главное различие между этими стандартами заключается в числе строк развертки и частоте кадров. EIA рекомендует 525 строк и 60 кадров в секунду, а PAL и SECAM используют 625 и 50 кадров в секунду.

Во всех ТВ-стандартах рекомендуемым является формат изображения телевизионного экрана 4 : 3 (4 единицы в ширину и 3 единицы в высоту). Это объясняется, главным образом, аналогичным форматным соотношением для киноплёнки, принятым еще на заре телевидения.

Формат матрицы определяет угол обзора телевизионной камеры и ее габариты.

Следующий важный параметр ТВ камеры – ее чувствительность, под которой понимают минимальную освещенность объекта, при которой еще можно различить черно-белые переходы на изображении или минимальную освещенность на матрице ПЗС. С технической точки зрения более правильно было бы указывать освещенность на матрице ПЗС, так как в этом случае не нужно оговаривать характеристики используемого объектива. Но пользователю при установке камеры удобнее работать с освещенностью объекта, которую он заранее знает. Поэтому в паспортных данных ТВ-камер обычно указывают минимальную освещенность объекта, например 0,1 лк.

НУТВ-камеры, работающие в видимом и коротковолновом инфракрасном диапазонах ( $\Delta\lambda = 0,4-1,7$  мкм) при малых уровнях входных полезных сигналов, в условиях низкой освещенности, обеспечивают дистанционную передачу изображения и его дублирование, допускают цифровую обработку изображения в реальном масштабе времени, введение текстовой, символьной и цифровой информации в электронном канале, обеспечивают удобство наблюдения, но имеют меньшую дальность действия, чем ПНВ, и обладают всеми их недостатками.

При этом наличие нескольких спектральных каналов, входящих в состав низкоуровневых оптико-электронных систем, позволяет су-

шественно повысить эффективность выделения полезных сигналов на фоне естественных природных ландшафтов.

### 3.3. Тепловизионные системы

*Тепловизоры* (ТПВ) – устройства, предназначенные для наблюдения нагретых объектов по их собственному тепловому излучению. Они преобразуют невидимое глазом человека ИК-излучение в электрические сигналы, которые после усиления и автоматической обработки вновь преобразуются в видимое изображение объектов [7].

В отличие от изображений в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, полученных за счет отраженного излучения объекта и различий в отражательной способности его элементов и отражающего фона, тепловые (инфракрасные) изображения создаются за счет собственного теплового излучения объекта и определяются различиями в температуре и излучательной способности его элементов и окружающего фона. Изменения температуры поверхности объекта в определенной мере соответствуют деталям визуально наблюдаемой картины, поэтому создаваемые ТПВ изображения в основном отвечают представлениям о форме и размерах рассматриваемых объектов.

Начало развития тепловизионной техники было положено в начале 60-х годов XX столетия исследованиями и разработкой приборов по двум основным направлениям: с использованием дискретных приемников излучения совместно с системами сканирования (развертки) изображения и аппаратуры без механического сканирования на базе двумерных ИК-приемников. Сегодня можно условно выделить четыре поколения развития такой техники.

Нулевое поколение основано на применении единичных охлаждаемых приемников и двумерной (строчной и кадровой) развертки с помощью сканирующей оптико-механической системы; первое поколение – на использовании строчных линеек приемников и упрощенной кадровой развертки; второе поколение – на применении сгруппированных линеек (с временной задержкой и накоплением) и более низкоскоростной системой развертки. Ко второму поколению относят вакуумные приборы с электронным сканированием приемной мишени – пироконы.

Принципиально новое третье поколение основано на применении «одновременно смотрящих», т. е. фокально-плоскостных (FPA – focal plate area), двумерных твердотельных многоэлементных (матричных) приемников излучения (МПИ), т. е. без использования оптико-механических систем развертки.

В последние годы развитие тепловизионной техники идет в основном по пути применения неохлаждаемых многоэлементных МПИ, физические характеристики которых весьма высоки и практически не уступают охлаждающим системам.

Современные тепловизионные системы (ТПС) имеют малые массогабаритные характеристики и энергопотребление, обеспечивают бесшумную работу и высокое качество тепловизионного изображения, широкий динамический диапазон при работе в режиме вещательного телевизионного стандарта, цифровую обработку в реальном масштабе времени, связь с ЭВМ и т. п. и делятся на два основных класса: наблюдательные (показывающие) и измерительные или радиометрические (термографы).

*Наблюдательные ТПС* предназначены для обнаружения, распознавания и визуализации на фоне тепловых помех удаленных теплоизлучающих объектов (или целей). Такие системы могут дополняться автономными каналами, содержащими, как правило, отмасштабированный телевизионный и канал дистанционного измерения температуры с лазерным целеуказателем, а также лазерными дальномерами. Такое дополнение наблюдательных ТПС позволяет им частично выполнять измерительные функции.

Например, поисковые ТПС обеспечивают возможность видения на значительных расстояниях независимо от уровня естественной освещенности, интенсивности световых помех, степени прозрачности атмосферы. Эти приборы способны регистрировать тепловое излучение от объектов через среды, непрозрачные для видимого и ближнего ИК-излучения, но прозрачные для теплового излучения: листва, маскировочные сети, небольшой слой земли, нагромождение предметов и пр., что дает возможность обнаруживать замаскированные или скрытые объекты. Поисковые тепловизионные системы могут использоваться для круглосуточного всепогодного наблюдения, разведки, прицеливания, сопровождения целей, охраны объектов, таможенного контроля, для решения криминалистических задач, вождения транспортных средств, поиска раненых и по-



страдавших в результате военных действий или стихийных бедствий, для обнаружения мин и т. п.

*Измерительные (радиометрические) ТПС* используются преимущественно для квалифицированной тепловой диагностики различных промышленных объектов, техники, зданий, сооружений, механизмов и т. п.

Классы ТПС различаются спецификой практического применения и эксплуатационными возможностями.

Основные конструктивные отличия ТПВ-камер от ТВ-камер определяются спектральным диапазоном [5, 7].

Во-первых, материалы, пригодные в видимом и ближнем ИК-диапазоне (до 2 мкм), в первую очередь стекла, поглощают в среднем ИК-диапазоне. Поэтому переход в диапазон 8–14 мкм требует заменить оптические материалы либо использовать зеркальные системы.

Во-вторых, увеличение длины волны приводит к возрастанию дифракционного размытия изображения:

$$d_{\text{дифр}} = 1,22 \frac{\lambda f'}{D}.$$

Для достижения такой же угловой разрешающей способности, что и у обычной телекамеры, диаметр входного зрачка и фокусное расстояние необходимо увеличить на порядок, примерно также увеличатся габариты и вес.

В-третьих, технология изготовления матричных приемников (например, микроболометрических матриц) этого диапазона сложнее, чем у приемников, чувствительных в видимой области. Поэтому они дороги и имеют меньшее число элементов. Дополнительные сложности вносят нелинейная связь между падающим потоком и выходным сигналом и различие характеристик отдельных элементов. Для решения этих проблем необходима дополнительная коррекция видеосигнала, качество которой непосредственно связано со стоимостью прибора. Некоторые приемники излучения требуют охлаждения, что дополнительно усложняет и удорожает конструкцию.

В-четвертых, непрозрачность в видимом диапазоне линз тепловизионных приборов осложняет юстировку объективов.

Обобщенные критерии, характеризующие качество прибора в целом, вводятся на основе представления о том, что для различения цели на фоне необходимо, чтобы воспринимаемое зрительным аппаратом отношение сигнал/шум  $\mu_{\text{восп}}$  в рассматриваемом изображении было больше порогового  $\mu_{\text{пор}}$  для данных условий наблюдения:

$$\mu_{\text{восп}} \geq \mu_{\text{пор}}$$

Для ТПВ наиболее распространенным критерием является минимальная разрешаемая разность температур  $\Delta T_p$ , т. е. разность температур штрихов миры и фона, при которой воспринимаемое глазом отношение сигнал/шум  $\mu_{\text{восп}}$  равно пороговому значению  $\mu_{\text{пор}}$  (при этом оговариваются температура фона, ширина и вид штриха миры, ее дальность, состояние атмосферы).

В реальной обстановке наблюдатель рассматривает объекты сложной формы, принадлежащие к различным классам, и при этом он должен определить их ориентацию, различить и идентифицировать объекты и т. д. Например, в описании наблюдательных ТПВ можно встретить дальность обнаружения человека, т. е. расстояние, на котором наблюдатель отличает человека от фона (различает пятно). При этом предполагается, что перепад температур между человеком и фоном составляет  $2k$ , габариты человека  $2 \times 0,5$  м, и он излучает так же, как и а. ч. т., но с коэффициентом излучения 0,3, а метеорологическая дальность видимости 10 км.

В заключение приведем основные недостатки и достоинства ТПВ-камер по сравнению с ТВ камерами. К основным недостаткам относятся:

более сложная конструкция;

высокая стоимость, которая обусловлена прежде всего стоимостью оптики и приемника;

меньшее число элементов матрицы;

более низкая частота кадров;

большие габариты и вес.

Достоинства:

большая информативность;

более высокие характеристики по дальности действия, вероятности обнаружения и распознавания объектов;

возможность измерения распределения радиационной температуры по поверхности объекта;  
выявление внешних и некоторых внутренних дефектов, не обнаруживаемых при визуальном наблюдении;  
всепогодность;  
возможность наблюдения в любое время суток без дополнительных источников подсветки;  
невосприимчивость к засветке [7].

### 3.4. Цифровые фотоаппараты

В 1981 г. компания Sony представила на рынке первую цифровую камеру Sony Mavica со сменными зеркальными объективами и разрешением  $570 \times 480$  пикселей (с этого момента начинается история современной цифровой фотографии) [13].

Применяются цифровые фотоаппараты в научных исследованиях, медицине, геологии, криминалистике, повседневной жизни.

Относительно низкая стоимость цифровых фотокамер любительского класса, возможность сразу увидеть результат, простота в эксплуатации и относительно хорошее качество изображения сделали цифровую фотографию общедоступной и незаменимой.

Все фотоаппараты условно можно разделить на любительские (фототелефоны, компактные и зеркальные) и профессиональные (зеркальные, среднеформатные и крупноформатные камеры), которые в свою очередь делятся на категории по стоимости, размеру матрицы, качеству формируемого изображения и функциональным возможностям.

*Фототелефоны* – цифровые фотоаппараты, встроенные в сотовые телефоны, относятся к самому распространенному типу фотоаппаратов из-за универсальности применения такой техники: это и телефон, и фотоаппарат, и аудиоплеер и мини-компьютер с выходом в Интернет.

Цифровой фотоаппарат состоит из объектива и ПЗС или КМОП-матрицы. Эффект удаления и приближения объекта съемки осуществляется с помощью программного обеспечения. Для хранения файлов используется память, встроенная в телефон. Принцип действия аналогичен цифровым камерам. К достоинствам можно отнести компактность, совмещенность с другими устройствами, возможность

пересылки изображения на другой телефон, простоту использования, возможность осуществлять съемку одной рукой. К недостаткам следует отнести удовлетворительное качество изображения, ограниченные функциональные возможности, примитивную оптическую систему и отсутствие оптического зума, замедленную скорость съемки, низкое разрешение. Все новейшие технические достижения, внедренные в компактные фотоаппараты, применяются в фототелефонах (сенсорные ЖК-дисплеи, ксеноновые вспышки и т. д.).

*Компактные фотоаппараты* – цифровые фотоаппараты, позволяющие получать качественное изображение средних форматов. В таких фотоаппаратах применяют оптические системы с выдвигаемым объективом или объективы с перемещением оптических деталей внутри его (удобно, например, при съемках под водой). В некоторых моделях камер помимо стандартных функций используют новые технологии: сенсорное управление камерой, функции запоминания лиц и др. Фотоаппарат состоит из оптической системы – зум-объектива, приемника, микропроцессора, вспышки, видоискателя, системы автофокусировки (инфракрасный излучатель и приемник), ЖК-монитора.

Особенно бурно цифровая фотография развивается в последние 10 лет (преодолен 14-мегапиксельный рубеж, и даже камеры, встроенные в сотовые телефоны, имеют разрешение 5–8 мегапикселей). Производители программного обеспечения для обработки изображений и производители устройств для переноса и хранения изображения (карт памяти) также совершенствуют свою продукцию.

### **3.5. Оптические локаторы**

*Пеленгация* – это определение направления на какой-либо объект через угловые координаты: горизонтные, отсчитываемые от плоскостей истинного горизонта и меридиана, или произвольные, отсчитываемые от плоскостей, ориентированных в пространстве иным образом. В зависимости от физических свойств объектов пеленгация может осуществляться с применением оптических (при оптической локации), радиотехнических (при радиолокации), акустических (при локации звуковой) и других методов [14].

Возможность пеленгации объекта обуславливается его контрастностью на окружающем фоне (различием физических свойств объ-

екта и фона). Различают *пассивную* пеленгацию, когда используется естественная контрастность пеленгуемого объекта, и *активную*, когда объект облучается электромагнитными или звуковыми волнами от искусственного излучателя и наблюдаются отраженное им излучение или ретранслированные сигналы (например, пеленгация с использованием лазерных источников излучения).

Пеленгация широко применяется в навигации для определения местоположения и параметров траектории различного рода наземных, морских, воздушных и космических объектов. Принципы пеленгации используются в системах предупреждения столкновений кораблей в море, летательных аппаратов в воздухе, в системах наведения оружия, управления полетами и посадкой самолетов, обеспечения встречи и стыковки космических станций в космосе, а также для определения поправок используемых при этом навигационных приборов и систем.

В метеорологии методами пеленгации определяются районы и характер облачности, осадков, зон грозных образований, местоположение представляющих опасность для мореплавания тропических циклонов и т. п. Пеленгацией выпускаемых в атмосферу радиозондов измеряют скорость и направление воздушных потоков на различных высотах, а пеленгацией свободно дрейфующих в воде предметов определяют скорость и направление морских течений.

*Оптическая локация* (ОЛ) – совокупность методов обнаружения, измерения координат, а также распознавания формы удаленных объектов с помощью электромагнитных волн оптического диапазона – от ультрафиолетовых до дальних инфракрасных.

В основе оптической локации, так же как и в основе радиолокации, лежат три принципа.

Первый принцип – это отражение электромагнитных волн. Цель и окружающий фон по-разному отражают падающие электромагнитные волны, в результате чего между ними возникает контраст, позволяющий выделить сигнал от цели.

В основе второго принципа локации лежит использование прямолинейности распространения электромагнитных волн. Если направить узкий пучок волн в сторону цели, то отраженная целью и принимаемая локатором волна позволяет определить направление на цель.

В основе третьего принципа локации лежит использование постоянства скорости распространения электромагнитных волн, что позволяет построить различные схемы измерения дальности.

В процессе работы оптический локаатор осуществляет поиск цели в заданном секторе: обнаружив ее, непрерывно следит за ней, в процессе чего производится измерение угловых координат и расстояния до цели. Задача определения расстояния между локатором и целью сводится к определению отраженного излучения и его параметров и изменения соответствующего параметра, например, интервала времени между зондирующим и отраженными импульсами, разности фаз и частоты этих сигналов.

Оптический локаатор облучает объект с помощью передатчика и принимает отраженное от него излучение при помощи приёмника. Электрический сигнал на выходе приемника содержит информацию о параметрах исследуемого объекта; характеристики этого сигнала в среднем пропорциональны координатам объекта. Вследствие квантового характера взаимодействия лазерного излучения с приёмником и когерентности лазерного излучения методы обработки сигнала в ОЛ являются статистическими. Если оптический локаатор определяет только расстояние до объектов, он называется дальномером (различают оптико-локационные и технологические дальномеры).

Схема и принцип действия одного из типов оптического локатора для слежения за авиационными и космическими объектами показаны на рис. 3.2. Луч лазера 1, пройдя через коллиматор 2, системой зеркал 3, 4 направляется на объект 6. Отраженный от объекта луч улавливается плоским зеркалом 7 и направляется на параболическое зеркало 8, с которого поступает одновременно на диссектор 11 (или матрицу 1 фотоприемника) – для определения угловых координат, и на фотоэлектронный умножитель 13 (или иной детектор) – для определения дальности объекта. Электрические сигналы с диссектора подаются в следящую систему, управляющую положением передающей и приемной оптических систем локатора.

Светолокационный метод также используется в светолокационных измерителях (дальномер облаков лазерный ДОЛ-1, облакомер Vaisala CL-31, «Пеленг СД-02-2006») высоты нижней границы облаков (ВНГО). Данный метод основан на концепции отличия характеристик спектральной селективности внутри облака от соответствующих характеристик атмосферы, предшествующей облачности,

благодаря чему в нижней части облака образуется световое пятно от источника света, установленного на поверхности земли, над которой измеряется ВНГО (вертикальная видимость).

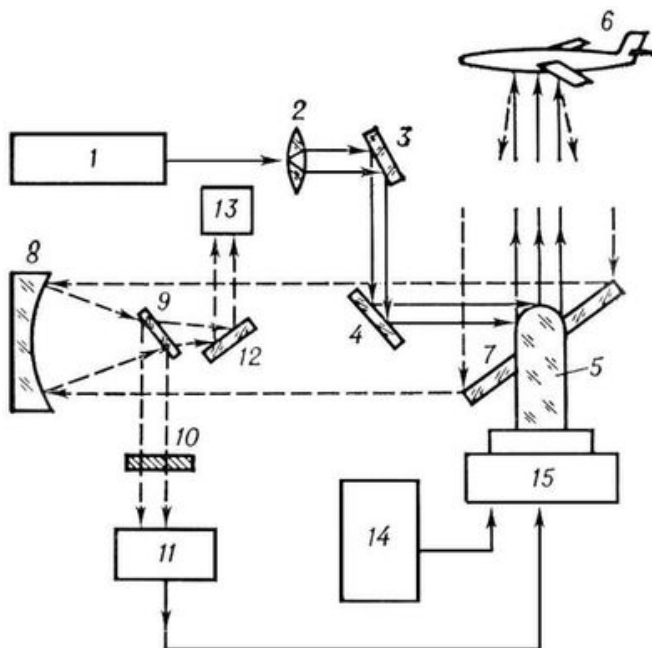


Рис. 3.2. Схема и принцип действия оптического локатора:

1 – передатчик (лазер); 2 – коллиматор; 3, 4 – зеркала;

5 – передающая оптическая система; 6 – лоцируемый объект;

7 – приёмная оптическая система; 8 – зеркало; 9 – полупрозрачное зеркало;

10 – узкополосный оптический фильтр; 11 – диссектор; 12 – зеркало;

13 – приёмник дальномерного устройства (фотоэлектронный умножитель);

14 – устройство ручного управления; 15 – следящая система.

Пунктиром показан ход лучей, отражённых от объекта

Как правило, такие приборы представляют собой измерительный блок с разделенным передающим (посылает в облако короткий импульс света) и приемным каналом излучения (воспринимает отраженный от облака импульс). Расстояние от источника световых импульсов до светового пятна на основании облака, образованного этим источником, определяется по соотношению

$$H = \frac{ct}{2},$$

где  $H$  – расстояние от светового пятна, яркость которого равна чувствительности приемника, принимаемое за нижнюю границу облаков (вертикальную видимость);

$c$  – скорость света, равная  $2,9929 \cdot 10^8$  м/с;

$t$  – время прохождения луча от передатчика (прожектора) до светового пятна и обратно к приемнику [5].

Оптические локаторы предназначены для проведения измерений ВНГО в реальном масштабе времени непосредственно над местом его установки в международных и национальных аэропортах, на аэродромах местных авиалиний и посадочных площадках, а также на метеорологических станциях. В качестве источника излучения в отличие от более старых моделей, где применялись импульсные газоразрядные лампы, в них используется светодиодный лазер.

Оптический локатор позволяет с высокой точностью (до нескольких десятков сантиметров) производить картографирование земной поверхности, поверхности Луны, определять расстояние до облаков, самолётов, космических, надводных и подводных объектов, исследовать распределение инверсионных и аэрозольных слоев в атмосфере. Практически создание оптических локаторов с большой дальностью действия, высокой точностью и разрешающей способностью стало возможным только с появлением таких мощных источников когерентного излучения, как лазеры.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Прикладная оптика / А.С. Дубовик [и др.]; под ред. А.С. Дубовика. – М.: Машиностроение, 1992. – 479 с.
2. Прикладная оптика / Н.П. Заказов [и др.]; под ред. Н.П. Заказова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
3. Источники и приемники оптического излучения / Г.Г. Ишанин [и др.]. – СПб.: Политехника, 1991. – 240 с.
4. Немилев, С.В. Оптическое материаловедение. Оптические стекла: учебное пособие / С.В. Немилев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 175 с.
5. Тымкул, В.М. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета: учебное пособие / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 215 с.
6. Ляшко, О.М. Проектирование оптико-электронных приборов наблюдения / О.М. Ляшко. – Минск: БНТУ, 2008. – 111 с.
7. Основы тепловидения / В.В. Коротаев [и др.]. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 122 с.
8. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 1999. – 480 с.
9. Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М.М. Мирошников. – СПб.: Лань, 2010. – 704 с.
10. Проектирование оптико-электронных приборов / Ю.Б. Парвулюсов [и др.] – М.: Машиностроение, 1990. – 488 с.
11. Тимофеев, Ю.М. Теоретические основы атмосферной оптики / Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев. – СПб.: Наука, 2003.
12. Шрёдер, Г. Техническая оптика / Г. Шрёдер, Х. Трайбер. – М.: Техносфера, 2006. – 424 с.
13. Дамьяновский, Владо. CCTV. Библия видеонаблюдения. Цифровые и сетевые технологии : пер. с англ. / Владо Дамьяновский. – М.: ООО «Ай-Эс-Эс Прес», 2006. – 480 с.
14. Основы импульсивной лазерной локации: учебное пособие для вузов / В. И. Козинцев [и др.]; под ред. В. Н. Рождественкина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 512 с.
15. Якушенков, Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения: учебник / Ю. Г. Якушенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2013. – 376 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>Глава 1. ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ</b> .....	5
1.1. Основные энергетические и фотометрические величины и соотношения между ними. Астрофизические звездные величины. ....	5
1.2. Основные законы теплового излучения. ....	11
1.3. Источники излучения. ....	13
1.4. Распространение оптического излучения в атмосфере. ....	14
<b>Глава 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ</b> .....	18
2.1. Определение и классификация оптико-электронных приборов. ....	18
2.2. Обобщенная схема оптико-электронных приборов наблюдения. ....	22
2.3. Глаз как оптический прибор. ....	23
2.4. Оптическая система оптико-электронных приборов. ....	30
2.5. Оптические материалы. ....	35
2.6. Приемники оптического излучения. ....	37
<b>Глава 3. ТИПОВЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ</b> .....	42
3.1. Приборы ночного видения. ....	42
3.2. Телевизионные системы наблюдения. ....	45
3.3. Тепловизионные системы. ....	47
3.4. Цифровые фотоаппараты. ....	51
3.5. Оптические локаторы. ....	52
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	57

Учебное издание

**КУЗНЕЧИК** Валерия Ольгердовна  
**ЛУГОВИК** Алексей Юрьевич

**ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА**

Конспект лекций  
для студентов приборостроительных  
специальностей

Редактор *Т. Н. Микулик*  
Компьютерная верстка *К. Д. Николаевич*

Подписано в печать 07.07.2016. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 3,43. Уч.-изд. л. 2,68. Тираж 100. Заказ 12.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.