

# ЛЕКЦИЯ 5 Основные характеристики оптических систем

## 5.1. Основные понятия прикладной оптики

Формирование оптического сигнала в любой ОИС происходит в ее *оптической системе (ОС)*. Рассмотрим основные понятия и законы, характеризующие ОС с точки зрения преобразования (формирования) в ней оптического сигнала, а также качества этого сигнала (изображения) на выходе системы.

ОС – это организованная определенным образом совокупность оптических деталей: линз, призм, зеркал, пластинок (плоскопараллельных и др.), диафрагм и т.д., - задачей которой является преобразование оптического сигнала в форму, удобную для последующей регистрации и контроля. ОС располагается между источником света и его приемником. Взаимодействие оптического излучения (ОИ) с объектом контроля (ОК) может происходить как на входе ОС, так и внутри нее. Последнее означает, что ОИ предварительно преобразуется ОС, приобретая нужную для данного вида контроля форму.

Источником оптического сигнала служит *предмет*, а результатом преобразования этого сигнала в ОС – *изображение* (этого предмета). Любые предметы конечных размеров, как источник оптических сигналов, можно считать совокупностью светящихся точек, которые образуют *пространство предметов*. Каждая светящаяся точка создает расходящийся из нее (*гомоцентрический*) пучок лучей, а каждая точка изображения формируется сходящимся световым пучком. Именно эти точки образуют *пространство изображений*.

Если каждая точка предмета после преобразования света в ОС дает только одну сопряженную ей точку изображения (сохранение гомотричности пучков), то такое изображение, как и система, называется *стигматическим* (точечным) или идеальным.

Все реальные ОС частично нарушают стигматичность пучков, (возникает *астигматизм*), что ухудшает качество изображения. Однако на практике от реальных систем не требуется, чтобы они давали идеальные изображения. Существенно лишь, чтобы погрешности изображения не искажали основную информационную структуру оптического сигнала, например, были не больше, чем погрешности фотоприемника.

## 5.2. Кардинальные точки и плоскости

Подавляющее большинство оптических систем составляют *центрированные* ОС, т.е. такие, все преломляющие и отражающие поверхности которых являются поверхностями вращения, имеющими общую ось вращения. Это *главная оптическая ось системы AA'* (рис. 5.1) Луч идущий вдоль оптической оси не изменяет своего направления.

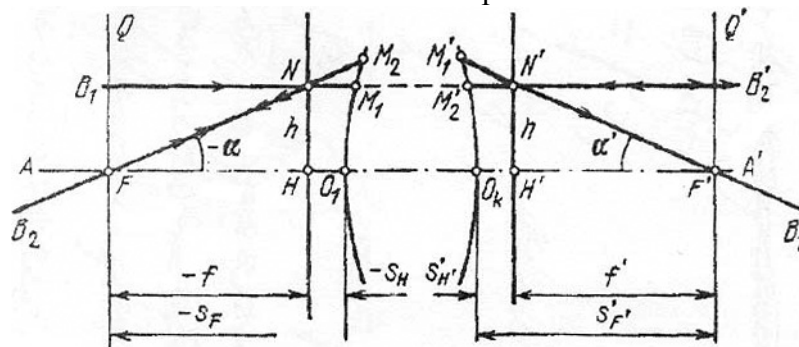


Рис. 5.1 Положительная оптическая система (свет распространяется слева направо)

Для построений изображений в идеальной ОС используют *кардинальные точки системы*: главные точки и фокусы, - а также главные и фокальные плоскости. Положение этих точек и плоскостей можно найти, пропустив через систему два луча:  $B_1M_1$  – параллельный оптической оси и  $B_2M_2$  – луч, который после выхода из ОС пойдет параллельно оптической оси. Заметим, что, если изменить направление лучей на противоположное, то картина их хода через ОС согласно принципу обратимости световых лучей, не изменится. Точки  $F$  и  $F'$  называются

передним и задним фокусом системы,  $H$  и  $H'$  – передней и задней главными точками, а плоскости, проведенные через эти точки – соответствующими плоскостями.

Отрезки  $HF = -f$  и  $H'F' = f'$  образуют переднее и заднее фокусные расстояния системы, а  $O_1F = -S_F$  и  $O_kF' = +S'_F$  – передние и задние фокальные отрезки.

Если фокусы системы действительны, то система называется положительной (рис. 5.1), если же одна из точек фокусов – мнимая, то ОС называется отрицательной (рис 5.2). Для большинства отрицательных систем  $f > 0$ , а  $f' < 0$ .

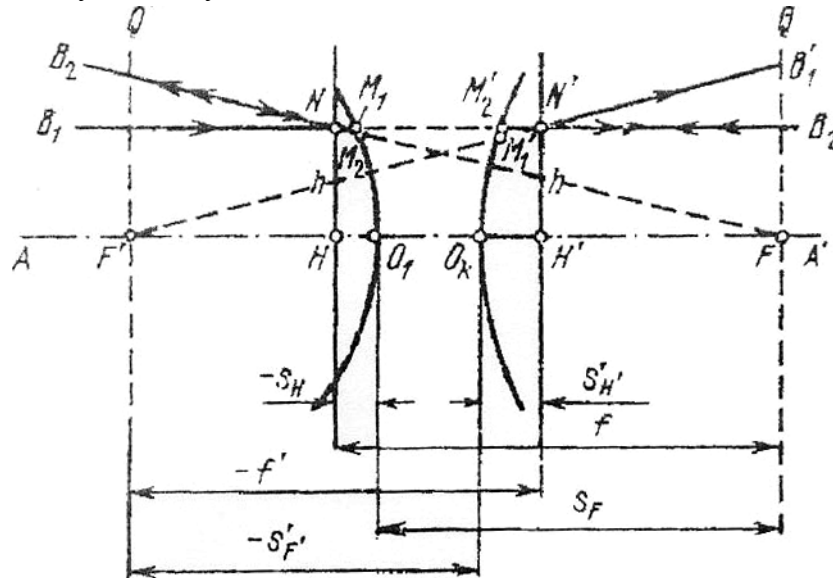


Рис. 5.2 Отрицательная оптическая система (свет распространяется слева направо)

### 5.3. Классификация оптических систем и изменение масштаба изображения

По положению предмета и изображения все ОС обычно делят на 4 типа (табл.5.1)

Таблица 5.1

	Наименование ОС	Расстояние до	
		предмета	изображения
1	Телескопические (в т.ч. системы для уменьшения расходимости лазерного луча)	$\infty$	$\infty$
2	Микроскопические (в т.ч. лупы)	конечное	$\infty$
3	Фотографические (в т.ч. фото и кинообъективы)	$\infty$	конечное
4	Проекционные ( в т.ч. осветительные ОС)	конечное	конечное

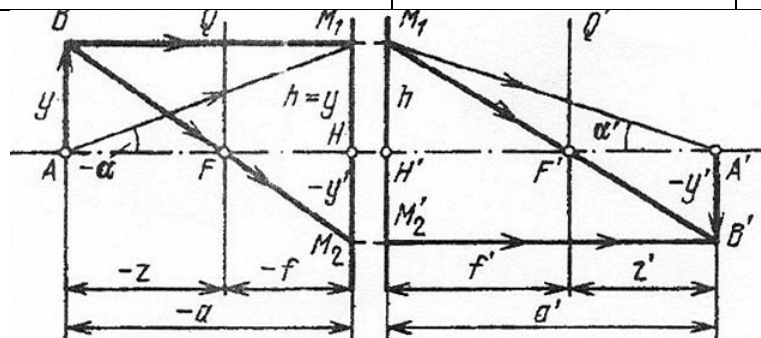


Рис. 5.3 Линейное и угловое увеличение ОС (AB и A'B' - предмет и изображение)

Отношение длины изображения  $y'$  к длине предмета  $y$  называется *линейным увеличением* ОС (рис 5.3):

$$\beta_0 = y/y' \quad (1)$$

Из рис. 5.1 и 5.2 видно, что в главных плоскостях  $\beta_0 = +1$ . Это позволяет совместить главные плоскости в одну и представить идеальную ОС в виде бесконечно тонкой (плоскости), разделяющей среды с показателями преломления  $n/n'$ . Тогда

$$f/f' = -n/n' \quad (2)$$

Для идеальной ОС имеет место теорема Лагранжа–Гельмгольца

$$ny \operatorname{tg} \alpha = n'y' \operatorname{tg} \alpha', \quad (3)$$

где  $\alpha'$  – угол луча с оптической осью в пространстве предметов,  $\alpha$  – угол сопряженного с ним луча в пространстве изображений (рис. 5.3)

Из рисунка 6.3 следует, что линейное увеличение ОС можно также представить в виде:

$$\beta = y'/y = -f/z = -z'/f'. \quad (4)$$

По определению *угловое увеличение* ОС равно

$$\gamma_0 = \operatorname{tg} \alpha' / \operatorname{tg} \alpha = a/a' = f/z' = z/f'. \quad (5)$$

Из (4) (5) следует, что

$$\gamma_0 = -\frac{f}{f' \beta_0}. \quad (6)$$

В системах, где окончательным оптическим элементом является человеческий глаз, изображения располагаются в  $\infty$  (ОС 1 и 2 из таблицы 6.1). Для таких ОС масштаб изображения характеризуется *видимым увеличением*

$$\Gamma = \operatorname{tg} \alpha' / \operatorname{tg} \alpha. \quad (6')$$

$\Gamma$  есть обычное линейное увеличение для случая, когда  $y' = L = 0,25$  м, т.е. расстояние наилучшего зрения. Следовательно

$$\Gamma = L / f'. \quad (6'')$$

В фотографических системах линейное увеличение определяется оптической длиной камеры  $z' = \Delta_k$  и равно

$$\beta_0 = \Delta_k / f' \quad (6''')$$

Сопряженные точки, для которых  $\gamma_0 = 1$  называются узловыми точками, а плоскости, проведенные через них перпендикулярно к оптической оси узловыми плоскостями. Их также можно использовать для построения изображения. Заметим, что если  $-f = f'$ , то узловые точки совпадают с главными точками.

Для ОС вводится также *продольное увеличение* (рис. 5.4)

$$\alpha_0 = dz'/dz = -\beta_0^2 f'/f \quad (7)$$

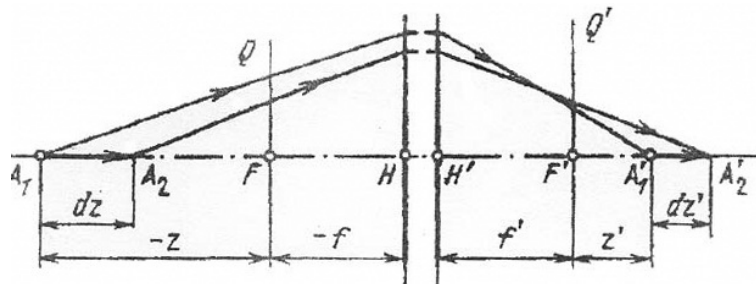


Рис. 5.4 Продольное увеличение ОС

Для расчетов полезны очевидные равенства, следующие из (6) и (7):

$$\alpha_0 \gamma_0 = \beta_0, \quad (8)$$

а также соотношения между увеличениями для ОС с  $f = f'$ :

$$\gamma_0 \beta_0 = 1, \quad \gamma_0 = 1/\beta_0, \quad \alpha_0 = \beta_0^2 \quad (9)$$

Большинство оптических деталей, а значит и ОС, имеют преломляющие и отражающие поверхности сферической или плоской формы. Можно доказать, что, такие поверхности не дают

стигматических изображений, т.е. соответствующие ОС далеки от идеальных. Однако, если световой поток от предмета к системе ограничен таким образом, что углы  $\alpha$  и  $\alpha'$  очень малы (*параксиальные лучи*), то свойства ОС близки к идеальным. Для параксиальных ОС справедливо условие синусов:  $n \sin \alpha = n' \sin \alpha'$ .

#### 5.4. Диафрагмы, зрачки и люки

Все части прибора (или ОС) – специальные преграды, оправы линз и другие детали, ограничивающие размеры световых пучков, называются *диафрагмами*. Обычно диафрагмы имеют круглые отверстия. Размеры диафрагм и их расположение определяет освещенность изображения и поле зрения ОС, т.е. ту часть пространства, которая может быть изображена данной ОС. Для визуальных ОС зрачок глаза – одна из диафрагм системы.

Диафрагма, которая ограничивает пучок лучей, выходящих из осевой точки предмета  $P_0$  (рис. 5.5), называется *апертурной диафрагмой*.

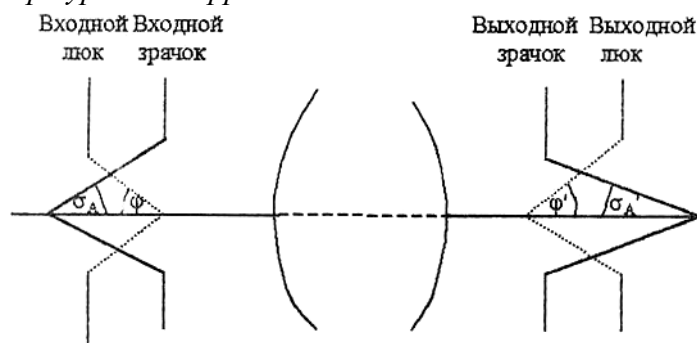


Рис. 5.5

Апертурная диафрагма располагается в пространстве изображений первого компонента ОС, а для второго компонента ОС она служит предметом. Параксиальное изображение апертурной диаграммы в пространстве предметов называется *входным зрачком* ОС. Т.е. реальная диафрагма, изображением которой является входной зрачок, и есть апертурная диаграмма.

Изображение входящего зрачка всей системой называется *выходящим зрачком* ОС.

Углы  $2\sigma_A$  и  $2\sigma'_A$ , называются *угловыми апертурами* в пространстве предметов и в пространстве изображений соответственно.

Для описания «количества света», проходящей через ОС наиболее удобно пользоваться *числовой апертурой* (в пространстве предметов):

$$NA = n \sin \sigma_A \quad (10)$$

где  $n$  – показатель преломления среды в пространстве предметов. Для описания ОС также применяются такие величины:

- *относительное отверстие*:  $-D / f'$ ,
- *диафрагменное число*:  $K = f' / D$  ( $D$  – диаметр входного зрачка),
- *геометрическая светосила*:  $F = 1 / K^2$ .

Кроме апертурных диафрагм в ОС имеются *диафрагмы поля зрения*. Изображение, которое видно из центра входного зрачка под наименьшим углом ( $2\varphi$  на рис. 5.5), называется *входным люком* системы, а угол  $2\varphi$  – *углом поля зрения*. Изображение входного люка всей ОС называется *выходным люком* системы. Угол  $2\varphi'$ , под которым виден выходной люк из центра выходного зрачка называется *угловым полем изображения*.

Если часть светового потока от предмета по тем или иным причинам не попадает в ОС (например, диафрагма с диаметром меньше входного зрачка), то говорят о *виньетировании*. Эффект виньетирования может быть и вредным (за счет него уменьшаются яркость изображения) и полезным (уничтожение внеосевых aberrаций).