

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Лазерная техника и технология»

Н.К. Артюхина

ТЕХНИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-38 01 02
«Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области приборостроения*

Минск
БНТУ
2019

УДК 681.7 (0.758)
ББК 22.34
А86

Р е ц е н з е н т ы :

кандидат искусствоведения, доцент, заведующий кафедрой
кинотелеоператорства БГАИ *А.И. Чупринский*;
начальник конструкторско-исследовательского отдела
КПУ «Пеленг-Оптик» ОАО «Пеленг» *В.А. Марчик*

Артюхина, Н. К.

А86 Техническая оптика : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» / Н. К. Артюхина. – Минск : БНТУ, 2019. – 114 с.
ISBN 978-985-550-952-4.

Учебно-методическое пособие составлено с учетом учебного плана и государственного стандарта для студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы».

Излагаются теоретические положения, отражающие основные принципы проектирования оптических систем с повышенными оптическими характеристиками, вопросы выбора базовых модулей для абберационного расчета и коррекции с использованием специальных компьютерных пакетов программ по расчету оптики, методы образования оптического изображения, изучаемые в дисциплине «Техническая оптика» (специализация 1-38 01 02 01 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»).

УДК 681.7 (0.758)
ББК 22.34

ISBN 978-985-550-952-4

© Артюхина Н. К., 2019
© Белорусский национальный
технический университет, 2019

Предисловие

В дисциплине оптического цикла «Техническая оптика» для специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» изучаются вопросы выбора исходной системы для абберационного расчета оптических систем (ОС), принципы их проектирования и компьютерного моделирования.

Студенты овладевают основами композиции оптической системы; методами выбора базового модуля для абберационной коррекции; теорией синтеза базового силового элемента и коррекционных элементов; практическими навыками использования имеющейся оптической расчетной базы, включающей архивы и библиотеки, входящие в состав компьютерных программных пакетов по расчету ОС. В ходе изучения дисциплины студенты должны усвоить правила оформления конструкторской документации, уметь проводить компьютерную оценку качества изображения в геометрическом и волновом представлении.

В современном оптическом приборостроении автоматизация проектирования оптических систем (САПР-оптика), обладающих предельными значениями оптических характеристик (числовых апертур и полей зрения) при значительных требованиях к качеству изображения, является одним из основных факторов сокращения сроков новых разработок. В ходе учебного процесса студенты практически овладевают программными продуктами, пакетами прикладных программ для проектирования (ППП) и анализа оптических систем различной степени сложности.

В пособии уделено внимание актуальной проблеме классификации и составления каталогов в связи с большими архивами рассчитанных оптических схем и требованиями технологической адаптации ОС любого класса.

Глава 1. АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1. Монохроматические aberrации, фигуры рассеяния и графики aberrаций

1.1. Связь между волновыми и геометрическими aberrациями

В идеальном случае волновые поверхности в пространстве изображений восстанавливают сферическую форму, тогда выходящие пучки лучей будут гомоцентрическими. Реально этого нет. Нарушение гомоцентричности пучков лучей – *геометрические aberrации* ОС. Отступления реальной волновой поверхности от сферы сравнения – *волновые aberrации*.

Выражения для волновых и геометрических aberrаций могут быть представлены функцией переменных (линейных m и M координат по входному зрачку, соответствующих апертурным углам σ_t и σ_s) и имеют связь друг с другом. Оценку качества изображения (к примеру, по частотно-контрастным характеристикам ЧКХ) нельзя проводить без расчета волновых aberrаций.

Разложение волновой aberrации представим непрерывной и дифференцируемой функцией по отношению к главному лучу для широкого внеосевого пучка с апертурными углами σ_t и σ_s :

$$\Delta l = \Delta l(\sigma_t, \sigma_s). \quad (1.1)$$

Сфера сравнения выбирается так, чтобы она пересекала главный луч в вершине волновой поверхности и касалась волновой поверхности, тогда первый постоянный $\Delta l = \Delta l_0$ и член разложения, где σ_t в 1-й степени, могут быть исключены, при этом разложение волновой aberrации можно начать с членов 2-й степени:

$$\begin{aligned} \Delta l = & A'_t \sigma_t^2 + B' \sigma_t \sigma_s + A'_s \sigma_s^2 + A''_t \sigma_t^3 + B'' \sigma_t^2 \sigma_s + C'' \sigma_t \sigma_s^2 + \\ & + D'' \sigma_s^3 + A'''_t \sigma_t^4 + B''' \sigma_t^3 \sigma_s + C''' \sigma_t^2 \sigma_s^2 + D''' \sigma_t \sigma_s^3 + A''''_t \sigma_s^4 + \dots \end{aligned} \quad (1.2)$$

При симметрии относительно меридиональной плоскости углы σ_s входят в разложение в четных степенях и мы окончательно имеем:

$$\Delta l = A'_t \sigma_t^2 + A'_s \sigma_s^2 + A''_t \sigma_t^3 + C'' \sigma_t \sigma_s^2 + A''_t \sigma_t^4 + C''' \sigma_t^2 \sigma_s^2 + A'''_s \sigma_s^4 + \dots \quad (1.3)$$

Выделим три группы членов разложения, которые характеризуют aberrации 1-го, 2-го и 3-го порядков по отношению к апертурным углам наклонного пучка лучей:

первая $\Delta l_{\text{I}} = A'_t \sigma_t^2 + A'_s \sigma_s^2$ выражает астигматизм;

вторая $\Delta l_{\text{II}} = A''_t \sigma_t^3 + C'' \sigma_t \sigma_s^2$ – кому;

третья $A'''_t \sigma_t^4 + C''' \sigma_t^2 \sigma_s^2 + A'''_s \sigma_s^4 = \Delta l_{\text{III}}$ – сложную сферическую aberrацию широкого внеосевого пучка.

В разложение (1.3) не входят aberrации дисторсии и кривизны поля; их отсутствие не влияет на рассмотрение структуры широкого наклонного пучка: они лишь перемещают изображение точки в пространстве.

Рассмотрим участок волновой поверхности, ограниченный координатными плоскостями ZOY и ZOX (OZ – оптическая ось) с произвольной точкой M на волновой поверхности с координатами x_1, y_1, z_1 . Центр сферы сравнения совмещен с началом координат. Нормаль к волновой поверхности – луч – пересекает плоскость XOY в точке M_0 с координатами $z_0 = 0, x_0$ и y_0 .

Соединив точку M с началом координат, получим прямую MO , на которой отложим радиус R сферы сравнения; при наличии волновой aberrации Δl она определит расстояние между сферой сравнения и волновой поверхностью.

Волновая aberrация Δl

$$\Delta l = R - \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}.$$

С учетом малости величины волновой aberrации имеем:

$$R^2 - 2R\Delta l = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2. \quad (1.4)$$

Продифференцировав уравнение (1.4) в частных производных от волновой aberrации по x и по y и считая текущую координату $Z = 0$, а x и y координатами x_0 и y_0 , имеем выражения:

$$x_0 = z_1 \frac{\partial f}{\partial x} + x_1; \quad y_0 = z_1 \frac{\partial f}{\partial y} + y_1$$

или

$$x_0 = -R \frac{\partial \Delta l}{\partial x} = \delta G'; \quad y_0 = -R \frac{\partial \Delta l}{\partial y} = \delta g'.$$

Величины x_0 и y_0 можно рассматривать как *поперечные aberrации*, определенные в плоскости, перпендикулярной к главному лучу, который имеет с оптической осью полевой угол ω' . Меридиональная составляющая поперечной aberrации в плоскости, перпендикулярной оси, будет равна

$$\overline{\delta g'} = \frac{\delta g'}{\cos \omega'} = -\frac{R \partial \Delta l}{\cos \omega' \partial y}. \quad (1.5)$$

Величина же сагиттальной составляющей остается неизменной:

$$\overline{\delta G'} = \delta G' = -\frac{R \partial \Delta l}{\partial x}. \quad (1.6)$$

От прямоугольных координат можно перейти к угловым координатам: апертурным углам $\sigma_x \approx \frac{x}{R}$; $\sigma_y \approx \frac{y}{R}$.

Дифференцируя последние выражения, получаем:

$$\partial x = R \partial \sigma_x; \quad \partial y = R \partial \sigma_y, \quad (1.7)$$

что позволяет привести формулы (1.5) и (1.6) к виду:

$$\overline{\delta g'} = -\frac{\delta \Delta l}{\partial \sigma_y} \cdot \frac{1}{\cos \omega'}; \quad \overline{\delta G'} = -\frac{\partial \Delta l}{\partial \sigma_x}. \quad (1.8)$$

При оценке качества изображения телескопических систем, дающих изображение, расположенное в бесконечности, используют

угловые aberrации: углы γ_x и γ_y , как отношения поперечных aberrаций к радиусу сферы сравнения:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\gamma_x = \gamma_x &= \frac{\delta G'}{R} = -\frac{\partial \Delta l}{\partial x}; \\ \operatorname{tg}\gamma_y = \gamma_y &= \frac{\delta'_g}{R} = -\frac{\partial \Delta l}{\partial y}. \end{aligned} \tag{1.9}$$

1.2. Анализ aberrаций наклонного пучка

Волновая aberrация астигматизма

Величины поперечных aberrаций в плоскости, перпендикулярной главному лучу, находим, дифференцируя формулу волновой aberrации астигматизма:

$$\Delta l_1 = A'_t \sigma_t^2 + A'_s \sigma_s^2. \tag{1.10}$$

Имеем поперечные составляющие астигматизма:

$$\begin{aligned} -\delta'_g &= 2A'_t \sigma_t; \\ -\delta'_G &= 2A'_s \sigma_s. \end{aligned}$$

Для продольного астигматизма:

$$\begin{aligned} z_t &= \frac{\delta'_g}{\sigma_t} = -2A'_t; \\ z_s &= \frac{\delta'_G}{\sigma_s} = -2A'_s. \end{aligned}$$

Характерные случаи астигматизма

- $A'_t = A'_s = A'$.

Волновая aberrация $\Delta l = A' \sigma^2$,

где $\sigma^2 = \sigma_t^2 + \sigma_s^2$; $\delta'_g = -2A'_t \sigma_t$; $\delta'_G = -2A'_s \sigma_s$.

Возводя величины δ'_g и δ'_G в квадрат и складывая их друг с другом, получаем:

$$(\delta'_g)^2 + (\delta'_G)^2 = 4A'^2\sigma^2 = (\delta'_{g0})^2 = \text{const.}$$

Фигура рассеяния – окружность. Следовательно, поперечные аберрации при расфокусировке сохранят центрированность изображения точки.

$$2. A'_s = 0; A'_t \neq 0; \Delta l = A'_t \sigma_t^2.$$

Поперечные аберрации выразятся для этого случая уравнениями:

$$-\delta'_g = 2A'_t \sigma_t;$$

$$-\delta'_G = 0.$$

Волновая аберрация вдоль меридионального фронта – парабола второго порядка от апертурного угла σ_t , независимо от угла σ_s , поэтому равным значениям угла σ_t будут соответствовать и равные значения волновой аберрации (рис. 1.1).

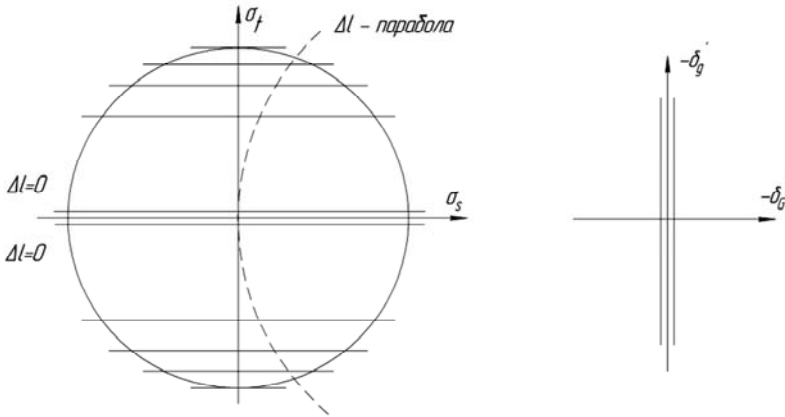


Рис. 1.1. Волновые и поперечные аберрации для астигматизма при совмещении плоскости наводки с сагиттальным изображением

Фигура рассеяния – отрезок прямой вдоль меридиональной плоскости, начало и конец которого располагаются на равных расстояниях по обе стороны от начала координат.

В случае $A'_t = 0$; $A'_s \neq 0$ имеем аналогичную картину, повернутую на 90° .

3. $A'_t = -A'_s$. Выражение для волновой aberrации

$$\Delta l = A'_t \sigma_t^2 + A'_s \sigma_s^2 = A'_t (\sigma_t^2 - \sigma_s^2).$$

Поперечные aberrации астигматизма:

$$-\delta'_g = 2A'_t \sigma_t;$$

$$-\delta'_G = 2A'_s \sigma_s.$$

Кривые волновых aberrаций (рис. 1.2) вдоль меридионального и сагиттального фронта:

$$\Delta l_t = A'_t \sigma_t^2;$$

$$\Delta l_s = A'_s \sigma_s^2.$$

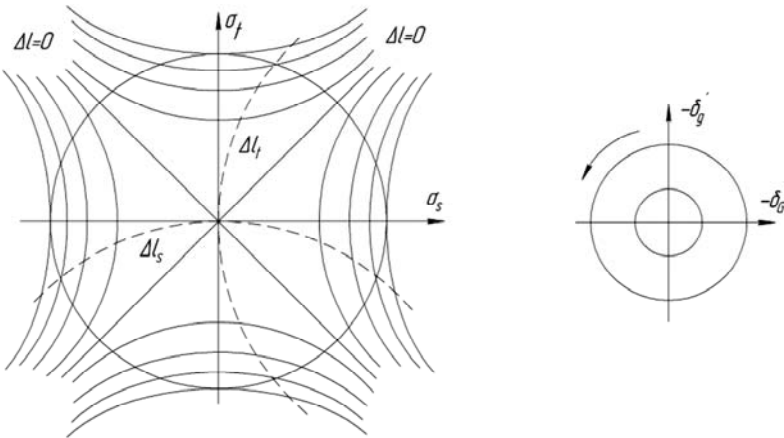


Рис. 1.2. Волновые и поперечные aberrации астигматизма при размещении плоскости наводки между сагиттальным и меридиональным изображениями

В этом случае фигура рассеяния является окружностью (при круговом обходе лучом по контуру зрачка движение по окружности фигуры будет происходить в обратном направлении к движению луча по контуру выходного зрачка).

Кривые равных волновых aberrаций – гиперболы, расположенные между двумя асимптотами (под углом 45°). Кривая волновой aberrации вдоль меридионального фронта – парабола.

Волновая aberrация комы

Выражение для комы в волновой форме:

$$\Delta l_{II} = A_t'' \sigma_t^3 + C'' \sigma_t \sigma_s^2. \quad (1.11)$$

Составляющие поперечной aberrации комы:

$$\begin{cases} -\delta'_g = 3A_t'' \sigma_t^2 + C'' \sigma_s^2; \\ -\delta'_G = 2C'' \sigma_t \sigma_s. \end{cases} \quad (1.12)$$

Откуда следует, что при $\sigma_s = 0$, волновая кома вдоль сагиттального фронта будет отсутствовать.

На рис. 1.3 дан график изменения коэффициентов A_t'' и C'' по углу поля зрения ω . Вблизи оси системы коэффициенты A_t'' и C'' равны; кривые совпадают, так как существует один независимый коэффициент комы, через который выражается сагиттальная и меридиональная кома.

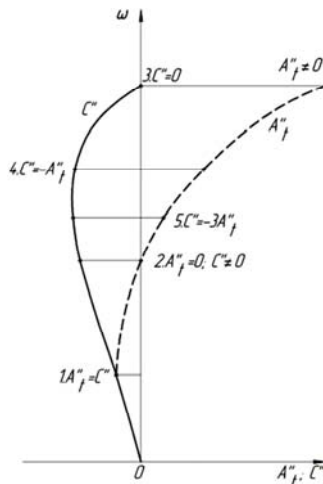


Рис. 1.3. Картина изменения коэффициентов комы по полю зрения

Характерные случаи комы:

1. $A''_t = C''$.
2. $A''_t = 0$; $C'' \neq 0$.
3. $A''_t \neq 0$; $C'' = 0$.

Случай $A''_t = C''$ характерен для небольших полей зрения. Выражение для волновой aberrации:

$$\Delta_{II} = A'_t (\sigma_t^2 + \sigma_s^2) \sigma_t;$$

для поперечных aberrаций:

$$\begin{cases} -\delta'_g = A'_t (3\sigma_t^2 + \sigma_s^2); \\ -\delta'_G = 2A''_t \sigma_t \sigma_s. \end{cases}$$

Картина меридионального волнового фронта представлена на рис. 1.4. При $\sigma_s = 0$ кривая волновой aberrации вдоль меридионального фронта – кубическая парабола (3-й степени) $\Delta_{II} = A''_t \sigma_t^3$.

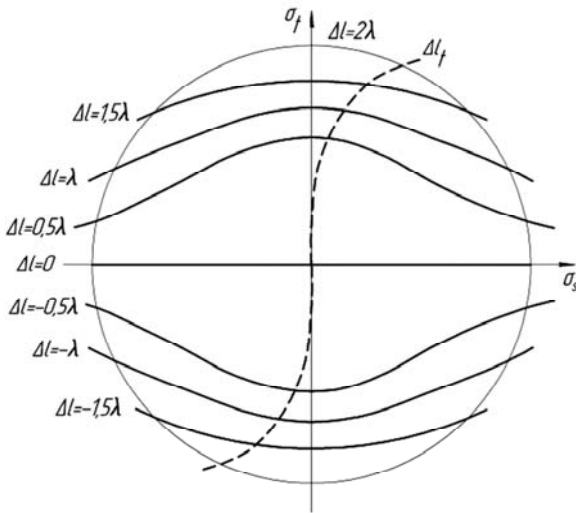


Рис. 1.4. Простая кома $A''_t = C''$ (волновая aberrация)

Вычисление кривых равных волновых aberrаций по уравнению для заданной волновой aberrации относительно апертурного угла σ_s проводится по формуле

$$\sigma_s = \pm \sqrt{\frac{\Delta l_{II}}{A_t'' \sigma_t} - \sigma_t^2}. \quad (1.13)$$

Эти кривые отличаются по знаку и симметричны относительно сагиттального волнового фронта; при увеличении угла σ_s асимптотически приближаются к оси абсцисс и больше расходятся в центральной части зрачка, что выгодно, когда зрачок по M сечению имеет меньший диаметр, чем в S . В полярных координатах имеем $\sigma_t = \sigma \cos \gamma$; $\sigma_s = \sigma \sin \gamma$; $\sigma_t^2 + \sigma_s^2 = \sigma^2$.

Подставляя эти значения в формулу (1.12, а), получаем после некоторых преобразований:

$$\begin{cases} -\delta'_g = A_t'' \sigma^2 (2 + \cos 2\gamma); \\ -\delta'_G = A_t'' \sigma^2 \sin 2\gamma. \end{cases} \quad (1.14)$$

Кривые, описываемые формулами (1.14), есть окружности с радиусом $R = A_t'' \sigma^2$ со смещением центра, равным $2A_t'' \sigma^2 = 2R$ относительно начала координат. Фигура рассеяния – окружности с уменьшающимся радиусом (по мере уменьшения σ радиус уменьшается по квадратичному закону). Семейство окружностей ограничено касательными с углом равным 60° (рис. 1.5).

Связь комы и неизопланатизма. Сферическая aberrация 3-го порядка определена суммой Зейделя S_I , а мерой меридиональной комы является сумма S_{II} . Величина неизопланатизма η характеризует отступление от условия изопланазии и используется для расчета меридиональной комы.

$$K_{III} = 3y' \eta, \quad (1.15)$$

$$\text{где } \eta = \frac{\Delta s'}{s'_{0,P} - s'_0} + \frac{\Delta f'}{f'} = \frac{1}{2} \text{tg}^2 \sigma' \bar{S}_{II}.$$

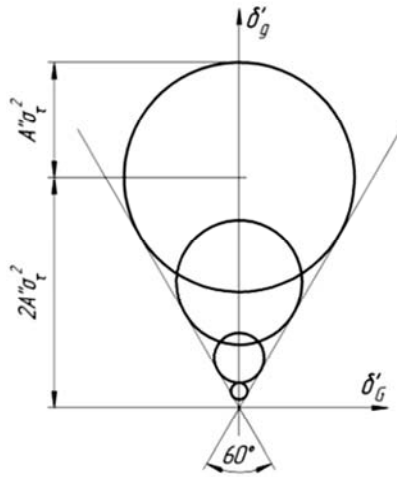


Рис. 1.5. Фигура рассеяния для простой комы $A'' = C''$

1.3. Сферическая aberrация III и V порядков

Одним из способов компенсации aberrаций 3-го порядка является введение aberrаций высшего порядка.

Рассмотрим этот способ на примере сферической aberrации.

Суммарная волновая aberrация:

$$\Delta l = \Delta l_{III} + \Delta l_V = A^{III} \sigma^4 + A^V \sigma^6.$$

Поперечные суммарные aberrации:

$$-\delta'_g = 4A^{III} \sigma^3 + 6A^V \sigma^5 = -\delta'_{gIII} - \delta'_{gV} = -\frac{4\Delta l_{III}}{\sigma} - \frac{6\Delta l_V}{\sigma}. \quad (1.16)$$

Для продольной сферической aberrации имеем выражение:

$$\Delta s' = \frac{\delta'_g}{\sigma} = \frac{\delta'_{gIII}}{\sigma} + \frac{\delta'_{gV}}{\sigma} = \Delta s'_{III} + \Delta s'_{V} = -\frac{4\Delta l_{III}}{\sigma^2} - \frac{6\Delta l_V}{\sigma^2}.$$

При исследовании продольной сферической aberrации обязательно добавляют расфокусировку Δ (aberrация 1-го порядка):

$$\Delta l_I = -\frac{\Delta}{2} \cdot \sigma^2,$$

тогда

$$\Delta l = \Delta l_I + \Delta l_{III} + \Delta l_V = -\left(\Delta + \frac{\Delta s'_{III}}{2} + \frac{\Delta s'_V}{3}\right) \cdot \frac{\sigma^2}{2}.$$

Выразив величину сферической aberrации через коэффициенты a и b , имеем:

$$\Delta s' = a\sigma^2 + b\sigma^4.$$

При коррекции продольной сферической aberrации на оси обычно добиваются ее устранения только для некоторого апертурного угла σ_0 :

$$\Delta s = 0 = a\sigma_0^2 + b\sigma_0^4 = \Delta s'_{III} + \Delta s'_V.$$

Это условие удовлетворяется для $\sigma_0 = 0$ и $\sigma_0 = \sqrt{-\frac{a}{b}} \rightarrow a = -b\sigma_0^2$.

Из выражения $\frac{d\Delta s'}{d\sigma} = 0$ получаем экстремальные значения.

Имеем:

$$\sigma_{\text{extr}} = 0; \quad \sigma_{\text{extr}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_0,$$

то есть наибольшая остаточная aberrация будет на зоне входного зрачка.

Для сферической aberrации, когда $a = -b\sigma_0^2$, имеем

$$\Delta s' = -b\sigma_0^2\sigma^2 + b\sigma^4 = (-\sigma_0^2 + \sigma^2)b\sigma^2.$$

Величина волновой aberrации:

$$-\Delta l = -\frac{b}{4}\sigma_0^2\sigma^4 + \frac{b}{6}\sigma^6.$$

На рис. 1.6 представлены графики волновой и геометрической aberrации.

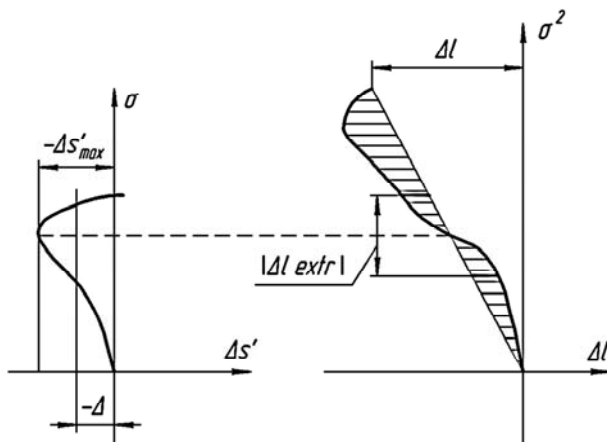


Рис. 1.6. Сферическая aberrация при смещении плоскости наводки

Беря производную по σ^2 , имеем $\sigma_0^2 = \sigma_{max}^2$, то есть наибольшая волновая aberrация будет на краю отверстия входного зрачка. Приравнивая 2-ю производную $\frac{d^2\Delta l}{d(\sigma^2)^2}$ к нулю, найдем, что точка пере-

гиба на кривой волновой aberrации, являющейся функцией квадрата апертурного угла, будет соответствовать точке наибольшей остаточной зоны сферической aberrации. Уменьшение волновой aberrации на краю достигается путем введения расфокусировки. Величина расфокусировки определяется формулой

$$\Delta = -\frac{2}{3}\Delta s'_{max}. \quad (1.17)$$

1.4. Определение абберационных составляющих по графикам поперечных аббераций

На рис. 1.7 представлены поперечные абберации широкого наклонного пучка в меридиональной плоскости.

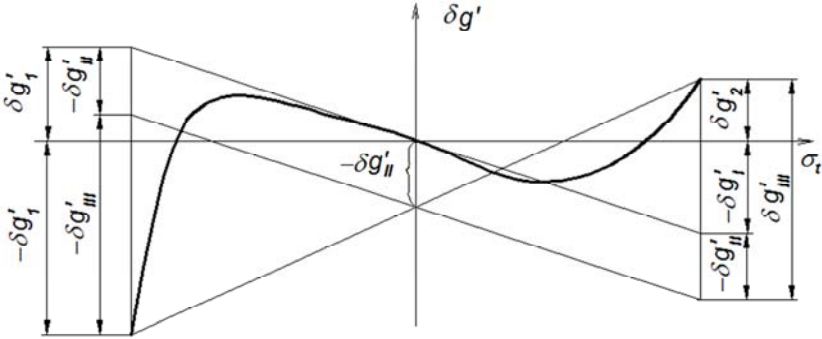


Рис. 1.7. Поперечные абберации в меридиональной плоскости

Обычно ход лучей широкого наклонного пучка задают, полагая апертурные углы σ_r одной величины, но разных знаков, к примеру, $\sigma_2 = -\sigma_1$.

Поперечные абберации для этих углов:

$$-\delta g'_1 = 2A'_1\sigma_1 + 3A''_1\sigma_1^2 + 4A'''_1\sigma_1^3;$$

$$-\delta g'_2 = 2A'_1\sigma_2 + 3A''_1\sigma_2^2 + 4A'''_1\sigma_2^3;$$

$$-(\delta g'_1 + \delta g'_2) = 6A''_1\sigma_1^2.$$

Величина поперечной абберации меридиональной комы:

$$-\delta g'_k = -\frac{\delta g'_1 + \delta g'_2}{2} = 3A''_1\sigma_1^2. \quad (1.18)$$

Графически величину комы определяют, соединяя концы меридиональной кривой поперечной абберации прямой линией; отрезок на оси ординат, отсекаемый этой линией – величина комы.

Преобразуя формулу (1.18), получим

$$\delta g'_2 - \delta g'_1 = 4A'_t \sigma_1 + 8A''_t \sigma_1^3 = 2(-\delta g'_1 - \delta g'_{III}),$$

где $\delta g'_1$ – меридиональная кривизна;

$\delta g'_{III}$ – меридиональная составляющая сферической аберрации в широком внеосевом пучке;

$-\delta g_1 = 2A'_t \sigma_1$ можно выразить продольной величиной Z_t , которая определяется вдоль главного луча от меридиональной точки изображения до общей плоскости изображения:

$$Z_t = \frac{\delta g_1}{\sigma_1}. \quad (1.19)$$

2. Хроматизм и оптические характеристики стекол

Причиной возникновения хроматических аберраций является *дисперсия* (зависимость показателей преломления материалов от длины волны света). В отличие от монохроматических хроматические аберрации появляются уже в параксиальной области (это следует из рассмотрения параксиальных инвариантов Аббе и Гюйгенса – Гельмгольца). К хроматическим аберрациям 1-го порядка относят хроматизм положения и хроматизм увеличения.

2.1. Условия нормировки

Условия нормировки задаются в начале расчета. Они определяют начальные координаты для двух параксиальных лучей:

- 1-й луч идет из осевой точки предмета на край входного зрачка,
- 2-й – с края предмета в центр зрачка P .

Они описывают важнейшие характеристики ОС: апертуру и поле. Координаты 1-го параксиального луча – α , h , а для 2-го – β , H .

На рис. 2.1 представлены эти лучи с координатами: $\alpha' = 1$, $h_1 = \alpha_1 S_1$, $\beta_1 = 1$, $S_p = H_1$. Вводят обозначения переднего S и заднего S' отрезков, определяющих положения предмета и изображения,

а также S_p и S'_p , определяющих расстояния от оптических поверхностей до центров входного и выходного зрачков P и P' с диаметрами D и D' .

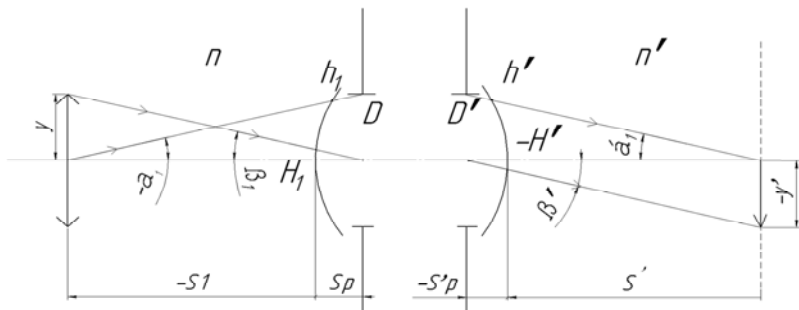


Рис. 2.1. Условия нормировки

На входе ОС вводят начальные координаты параксиальных лучей:

$$\alpha_1 = \frac{m_1}{e}, \quad \beta_1 = \frac{y_1}{e},$$

где $e = S_p - S$;

$$m_1 = \frac{D}{2};$$

$y = y_1$ – размер линейного поля;

система при этом считается центрированной.

Далее эти лучи рассчитывают по формуле

$$\frac{n'_k \alpha'_k - n_k \alpha_k}{h_k} = \frac{n'_k \beta'_k - n_k \beta_k}{H_k} = \frac{(n'_k - n_k)}{r_k}. \quad (2.1)$$

2.2. Хроматизм положения

Длина света λ_0 , соответствующая максимуму чувствительности приемника излучения, считается основной. Для визуальных оптических систем основная длина волны $\lambda_0 = 546,1$ нм (линия спектра e), рабочий диапазон от $\lambda_1 = 479,99$ нм (линия F') до $\lambda_2 = 643,85$ нм

(линия C'). Для фотосистем и высококачественных объективов микроскопов принято использовать более широкий спектральный диапазон, начиная от $\lambda_1 = 435,83$ нм (линия g).

Хроматизм положения равен разности задних отрезков для соответствующих длин волн: $dS'_{XP} = S'_{\lambda_1} - S'_{\lambda_2}$.

Для расчета ОС, состоящих из бесконечно тонких линз, разделенных конечными воздушными промежутками, введены *основные параметры* компонентов. Два основных параметра P и W описывают монохроматические аберрации.

Основными хроматическими параметрами тонкого компонента считаются величины:

C^* для бесконечно удаленной плоскости предметов, когда $\alpha_1 = 0$, $h_1 = 1$, $\alpha' = 1$;

C для предмета, находящегося на конечном расстоянии.

Соотношение между ними $C = (\alpha' - \alpha)C^*$.

Параметр C^* зависит только от *внутренних конструктивных элементов компонента*: относительных оптических сил линз компонента и марок стекол этих линз.

$$C^* = \frac{s'_{F'} - s'_{C'}}{f'} \quad (2.2)$$

где $s'_{F'} - s'_{C'}$ – хроматизм положения компонента в визуальной области спектра.

Параметр C зависит также от *внешних элементов*: оптической силы компонента Φ_i и от расстояния до плоскости предметов.

Для одиночной линзы основной хроматический параметр равен:

$$C^* = \frac{-1}{v_e}$$

Для компонента, состоящего из двух склеенных или близко расположенных линз:

$$C^* = - \left[\frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{1 - \Phi_1}{v_2} \right]$$

Для любого тонкого компонента сложной ОС (склейка или несколько соприкасающихся тонких линз), обладающего основным параметром C^* , хроматизм положения:

$$s'_{F'} - s'_{C'} = -\left(\frac{1}{\alpha'}\right)^2 \sum h^2 \cdot \Phi \cdot C^*. \quad (2.3)$$

Общая формула хроматизма положения для системы из p поверхностей (суммирование до p):

$$dS'_{XP} = \frac{1}{n'\alpha'^2} \sum_{k=1}^{k=p} h_k C_k,$$

где хроматический параметр

$$C_k = \frac{\Delta \alpha_k}{\Delta \frac{1}{n_k}} \Delta \frac{\delta n_k}{n_k};$$

$\delta n_k = n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$ – разность показателей для двух длин волн; величины α и n соответствуют основной длине волны λ_0 в заданном спектральном интервале.

Для простой линзы в воздухе имеем

$$C = \frac{\alpha' - \alpha}{1 - n} \delta n = -\frac{n\Phi}{v}, \quad dS'_{XP} = -\frac{1}{\alpha'^2} \cdot \frac{h^2\Phi}{v} = -\frac{S'^2\Phi}{v}. \quad (2.4)$$

Хроматизм положения ОС, состоящей из одиночных линз, для положения предмета на конечном расстоянии равен:

$$-\alpha'^2 dS'_{XP} = \frac{h_1^2 \Phi_1}{v_1} + \frac{h_2^2 \Phi_2}{v_2} + \dots + \frac{h_m^2 \Phi_m}{v_m}. \quad (2.5)$$

Используется нормировка: $h_1 = \alpha_1 S_1$ или $h_m = \alpha'_m S'_m$.

В случае бесконечно удаленной плоскости предметов имеем:

$$dS'_{XP\infty} = f' \sum_{i=1}^{i=m} h_i C_i = f' \sum_{i=1}^{i=m} h_i \Phi_i C_i^*, \quad (2.5, a)$$

где f' – фокусное расстояние системы.

Условие нормировки: $\alpha' = 1$, $h_1 = 1$, $\sum h_i \Phi_i = 1$.

Для системы из m простых линз:

$$dS'_{XP} = -f' \left(\frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{h_2^2 \Phi_2}{v_2} + \dots + \frac{h_m^2 \Phi_m}{v_m} \right). \quad (2.5, б)$$

2.3. Ахроматизация

Рассмотрим возможность ахроматизации, то есть устранения хроматизма положения. Ахроматы состоят обычно из двух соприкасающихся (склеенных) линз, одна из которых положительная, а другая отрицательная.

Алгоритмом расчета является решение системы из двух уравнений:

1-е уравнение описывает суммарную оптическую силу склеенного (расклеенного) компонента ($\Phi_1 + \Phi_2 = 1$, где Φ_1 и Φ_2 – оптические силы линз);

2-е уравнение описывает условие ахроматизации $dS'_{XP} = 0$.

Имеем $\frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{1 - \Phi_1}{v_2} = 0$, откуда следует, что

$$\Phi_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2}. \quad (2.6)$$

Прием ахроматизации основан на введении *хроматических радиусов* в линзах и использовании марок стекол, обладающих близкими значениями показателей преломления для λ_e , но существенно различными коэффициентами дисперсии v_e . Варьируя радиуса-

ми склеиваемых поверхностей, удается корригировать хроматические aberrации, почти не изменяя монохроматические aberrации. Для осуществления ахроматизации, обязательным условием которой является неравенство коэффициентов дисперсии $\nu_1 \neq \nu_2$, в видимой области спектра разработано большое количество пар стекол, предусмотренных стандартом ГОСТ 3514–94. Обычно это кроны, у которых $\nu_e \geq 50$, и флинты ($\nu_e \leq 50$).

В качестве «хроматических» пар рекомендуют следующие: СТК19 (СТК9) – ТФ4, ТК16 – Ф1, СТК12 – ТФ8, СТК 7 – ТФ8, ФК24 – ЛФ9, ТК23 – ЛФ9, СТК12 – ТФ4.

Получил распространение прием расчета, при котором на первом этапе осуществляется исправление монохроматических aberrаций, а затем корригируются хроматические aberrации (линзы заменяются склейками).

2.4. Вторичный спектр

Вторичный спектр рассчитывают для ахроматических ОС. Предмет расположен в бесконечности. Оптическую силу первой линзы Φ_1 определяют из формулы (2.6), полагая $C^* = 0$.

Для нахождения параметра C^{**} , соответствующего вторичному спектру, в формулу (2.2) следует подставить коэффициенты дисперсии ν^* , в которых разности показателей преломления $n_{F'} - n_C$ заменены на разности $n_{F'} - n_e$; величина Φ_1 – из формулы (2.4).

В результате этих подстановок получаем:

$$C^{**} = -(\nu_1/\nu_1^* - \nu_2/\nu_2^*)/(\nu_1 - \nu_2). \quad (2.7)$$

Отношения ν/ν^* представляют собой относительные частные дисперсии. Существует линейная зависимость между относительной частной дисперсией $p_{F',e}$ и коэффициентом дисперсии ν_e , поэтому основной параметр C^{**} , характеризующий вторичный спектр, равен

$$C^{**} = 0,5702 \cdot 10^{-3}. \quad (2.8)$$

Вторичный спектр компонента из двух соприкасающихся линз, изготовленных из обычных стекол:

$$s'_{F'} - s'_e = 0,5702 \cdot 10^{-3} f'. \quad (2.9)$$

Формула (2.9) верна при любом количестве линз, входящих в компонент, когда предмет расположен в бесконечности.

Системы с исправленным вторичным спектром называются *апохроматами*.

Конструктивно для устранения вторичного спектра необходимо, чтобы компонент содержал три линзы, выполненные из различных стекол, одно из которых не должно находиться на нормальной прямой.

С этой целью разработаны специальные стекла, которые названы *особыми*: отклонения коэффициентов дисперсий этих стекол от нормальной прямой приводятся в каталогах. Для особых кронов $\Delta v_e > 0$, а особых флинтв $\Delta v_e < 0$. Наибольшие отклонения имеют стекло ОК1 – $\Delta v_e = 16,4$ и ОФ6 – $\Delta v_e = -6,7$.

Среди новых разработок отметим особый крон ОК4 ($v_e = 91,53$, а $\Delta v_e = 28,4$), который образует идеальную апохроматическую пару ($C^{**} = 0,4 \cdot 10^{-5}$) со стеклом К8, которое играет роль флинта, то есть из него выполняется линза с отрицательной оптической силой. Кроме особых стекол для апохроматов (особенно объективов микроскопов), традиционно используют флюорит (CaF_2), обладающий уникальными оптическими константами, которые располагаются весьма далеко от нормальной прямой ($v_e = 94,97$, $p_{F,e} = 0,5087$, $\Delta v_e = 35,0$), оптическая сила $\Phi_{oc} = 2,71$. Недостатками флюорита являются малый показатель преломления $n_e = 1,43496$ и большой коэффициент термического расширения, не позволяющий склеивать флюоритовые линзы с линзами из обычных стекол, при диаметрах больше 10–15 мм. Благодаря большому значению величины Δv_e , использование флюорита даже с обычными стеклами, приводит к существенному уменьшению вторичного спектра. Наименьшее значение у комбинации «флюорит – сверхтяжелый крон СТК15» – $C^{**} = 0,3 \cdot 10^{-4}$.

2.5. Хроматизм увеличения

Аберрация проявляется в виде разноразмерности парааксиальных изображений для двух дополнительных длин волн λ_1 и λ_2 в плоскости Гаусса, соответствующей основной длине волны λ_0 (парааксиальные лучи длин волн λ_1 и λ_2 пересекают плоскость изображения для длины волны λ_0 в разных точках, образуя поперечную хроматическую аберрацию $y'_2 - y'_1$).

Хроматизм увеличения – это изменение величины изображения за счет изменения угла 2-го парааксиального луча β'

$$dy' = -s' \cdot d\beta'. \quad (2.10)$$

Задний отрезок определяется формулой $s' = h/\alpha'$; инвариант Лагранжа – Гельмгольца равен $J = \alpha \cdot y = \alpha' \cdot y'$, тогда

$$dy' = y'_{F'} - y'_{C'} = -\frac{h \cdot H \cdot \Phi}{J \cdot v_e} y'. \quad (2.11)$$

Для предмета в бесконечности используется нормировка: $h_1 = 1$, $f' = 1$, $\beta_1 = 1$, тогда

$$\frac{dy'}{y'} = \frac{h \cdot H \cdot \Phi}{v_e}. \quad (2.12)$$

Используя хроматический параметр C^* , получим для группы тонких компонентов:

$$\frac{(y'_{F'} - y'_{C'})}{y'} = -h \cdot H \cdot \Phi \cdot C^*.$$

Для системы, образованной несколькими компонентами,

$$\frac{(y'_{F'} - y'_{C'})}{y'} = -\sum h \cdot H \cdot \Phi \cdot C^*. \quad (2.13)$$

Из (2.13) следует, что хроматизм увеличения равен нулю, когда зрачок совпадает с компонентом.

При равенстве параметра нулю $C^* = 0$ устраняются оба вида хроматизма. Ахроматизация называется *стабильной*.

2.6. Характеристики бесцветных оптических стекол

Для изготовления оптики применяются различные марки материалов, отличающиеся составом и физическими свойствами.

Спектральные характеристики оптических материалов необходимы для согласования интервалов длин волн в пространствах предмета и изображения. Оптические стекла условно делят на две группы: кроны и флинты.

Кроны имеют обычно малую дисперсию, а флинты – высокую. Кроновые стекла имеют большие коэффициенты дисперсии и относительно меньшие показатели преломления по сравнению с флинтами.

Наиболее широко применяемые марки оптического стекла: ЛК – легкий крон, ФК – фосфатный крон, К – крон, БК – баритовый крон, ТК – тяжелый крон, СТК – сверхтяжелый крон, ОК – особый крон, КФ – кронфлинт, БФ – баритовый флинт, ТБФ – тяжелый баритовый флинт, ЛФ – легкий флинт, Ф – флинт, ТФ – тяжелый флинт, ОФ – особый флинт.

Стекла типа ОФ и ОК имеют особый ход относительно частных дисперсий.

Большинство оптических бесцветных стекол прозрачно в диапазоне длин волн 0,365 – 2,6 мкм и используется в приборах, работающих в видимой, в ближней ИК и УФ областях спектра.

При расчетах ОС, обеспечивающих высокое качество *цветопередачи*, рабочая область спектра продлевается в коротковолновую часть до длин волн до $\lambda_h = 404,66$ нм.

Оптические стекла большей части марок имеют близкую к линейной зависимость относительных частных дисперсий от коэффициентов дисперсий («нормальная» прямая).

В отечественном каталоге – это прямая, проходящая через координаты $p_{F',e}$ и v_e стекол марок К18 и Ф13 (рис. 2.2), уравнение которой $p_{F',e} \cdot 10^3 = 542,9 - 0,5702 \cdot v_e$.

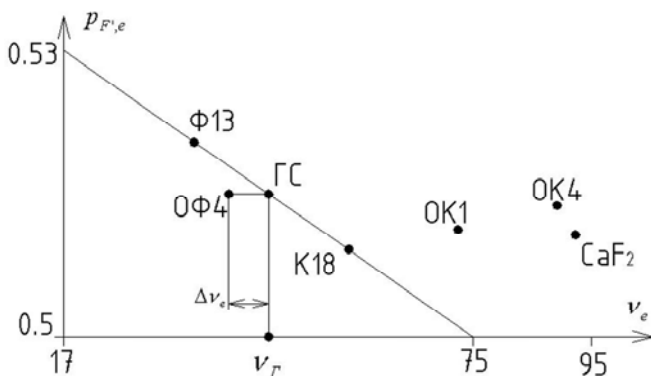


Рис. 2.2. Нормальная прямая

Для работы оптических приборов в условиях сильного облучения предусмотрены радиационно-оптические устойчивые стекла, мало темнеющие в этих условиях. Марки таких стекол образуются путем прибавления числа 100 к марке обычного стекла с практически теми же оптическими постоянными, которые называются стеклами серии 100. Некоторые стекла (ЛК107, ТК123, КФ100, ФК114, Ф101, 102, 104, 106, 108, 109, 113, ТФ103, 104, 107) имеют отличные от обычных марок оптические постоянные.

2.7. Оптические характеристики материалов для инфракрасной области спектра

Для работы в *ближней ИК области* спектра, где длина волны λ не превышает 2,6 мкм (приборы ночного видения), могут применяться обычные бесцветные оптические стекла. В диапазоне $\lambda = 1\text{--}1,8$ мкм подавляющее большинство оптических бесцветных стекол имеет коэффициент дисперсии порядка $v_{1,4} \approx 50$, исключая возможность коррекции хроматизма. Только сочетание особых стекол позволяет исправить хроматизм в этом диапазоне (стекло ОК1 имеет $v_{1,4} = 75,62$, а ОФ4 – $v_{1,4} = 41,83$).

В области $\lambda = 2\text{--}2,6$ мкм у обычных бесцветных стекол наблюдаются существенные различия в коэффициентах дисперсии (стекло К8 – $v_{2,3} = 47,04$, ТФ4 – $v_{2,3} = 78,01$). При использовании стекла ОК1

и ОФ4 или материала флюорита ($\nu_{1,4} = 105,63$) возможно создание ахроматов от видимой области спектра до длины волны 2,6 мкм.

В дальней ИК области спектра земная атмосфера имеет *два окна прозрачности*: 3–5 мкм и 8–12 мкм (используются в тепловидении). Количество материалов, обладающих малым поглощением излучения в этих диапазонах и хорошими физико-химическими свойствами, крайне ограничено. В особенности это относится к диапазону 8–12 мкм. Оптические константы основных материалов, используемых для области спектра 3–5 мкм, приведены в табл. 2.1 (основная длина волны $\lambda = 4$ мкм).

Таблица 2.1

Материалы для области спектра 3–5 мкм

Наименование материала	n_4	ν_4
Флюорит	1,40966	21,68
Фтористый литий LiF	1,34942	8,74
Германий Ge	4,02453	101,9
Кремний Si	3,42550	239,0
Селенид цинка ZnSe	2,43410	192,5

Оптические константы основных материалов, используемых в диапазоне с длинами волн 8–14 мкм, приведены в табл. 2.2. Здесь основная длина $\lambda_0 = 10,6$ мкм.

Таблица 2.2

Материалы для области спектра 8–14 мкм

Наименование материала	n_0	ν_0
ИКС25	2,76563	93,27
ИКС29	2,59822	74,65
Германий Ge	4,00203	93,81
Селенид цинка ZnSe	2,40553	33,07

Наиболее часто используется сочетание германия с селенидом цинка для создания ахромата, когда относительные оптические силы положительной линзы из германия Φ_1 и отрицательной линзы Φ_2 из селенида цинка порядка: $\Phi_1 = 1,037$, $\Phi_2 = -0,037$.

Часто используют сочетание флюорита с фтористым литием, так как материалы предпочтительны с технологических позиций: они оба прозрачны и в видимой области спектра, что упрощает центрировку и юстировку линз.

3. Аберрационные полиномы

3.1. Основные формулы разложения Зейделя

На предварительных этапах проектирования расчет сложных ОС сводят к расчету его отдельных компонентов, которые имеют невысокие оптические характеристики. При этом наиболее эффективны расчеты в области аберраций 3-го порядка (область Зейделя). Используют математическую зависимость между входными координатами лучей и поперечными аберрациями – *систему алгебраических уравнений*. Формулы, основанные на разложениях аберраций 3-го порядка по степеням апертуры и поля зрения, называют *абберационными полиномами*.

В практике расчетов принято разделять аберрации на две группы: монохроматические и хроматические.

Условия нормировки:

$$1) h_1 = \alpha_1 S_1; \beta_1 = 1; S_p = H_1 \text{ (для } S_1 = \text{const}; S_p = \text{const});$$

$$2) \alpha_1 = 0, \alpha' = 1, h_1 = 1, \beta_1 = 1, I = -1; (S_1 = -\infty).$$

Выражения для сумм (коэффициентов) Зейделя, определяющих пять основных аберраций монохроматического пучка:

$$S_I = \sum_{k=1}^{k=p} h_k P_k;$$

$$S_{II} = \sum_{k=1}^{k=p} h_k P_k \left(\frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k} \right);$$

$$S_{III} = \sum_{k=1}^{k=p} h_k P_k \left(\frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k} \right)^2; \quad (3.1)$$

$$S_{IV} = \sum_{k=1}^{k=p} \frac{1}{h_k} \cdot \frac{\Delta(\alpha_k n_k)}{n_k n_k};$$

$$S_V = \sum_{k=1}^{k=p} \left[h_k P_k \left(\frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k} \right)^2 - I^2 \left(\frac{\Delta \chi_k}{r_k} \right) \right] \frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k}.$$

$S_{IV} = - \sum_{k=1}^{k=p} \frac{\Delta \chi_k}{r_k}$ описывает кривизну Петцваля, которая зависит

от радиусов поверхностей. P , W – вспомогательные абберационные величины:

$$P_k = W_k \frac{\Delta \alpha_k}{\Delta \chi_k}, \quad W_k = \left(\frac{\Delta \alpha_k}{\Delta \chi_k} \right) \Delta(\alpha_k \chi_k). \quad (3.2)$$

При расчете новых ОС используют выражения, полученные после исключения уравнений для 2-го параксиального луча, и понятие *тонкого компонента*.

Если m – число бесконечно тонких компонентов в воздухе, то:

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=m} h_i P_i;$$

$$S_{II} = \sum_{i=1}^{i=m} H_i P_i - I \sum_{i=1}^{i=m} W_i;$$

$$S_{III} = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{H_i^2}{h_i} P_i - 2I \sum_{i=1}^{i=m} \frac{H_i}{h_i} W_i + I^2 \sum_{i=1}^{i=m} \Phi_i; \quad (3.3)$$

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^{i=m} \Phi_i \pi_i;$$

$$S_V = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{H_i^3}{h_i^2} P_i - 3I \sum_{i=1}^{i=m} \frac{H_i^2}{h_i^2} W_i + I^2 \sum_{i=1}^{i=m} \frac{H_i}{h_i} \Phi_i (3 + \pi_i).$$

Недостаток разложения Зейделя в том, что сферические и несферические поверхности (НП) рассматриваются раздельно. Базовой считается ОС из сферических поверхностей, которая усовершенствуется введением 1–2 несферических поверхностей. Абберрационный расчет проводится в два приема:

сначала для базовой системы,
далее с деформациями поверхностей.

3.2. Преобразованные коэффициенты

Преобразованные коэффициенты – абберрационные полиномы в переменных Ланге (m – число поверхностей).

Вспомогательные величины

$$S_S = \sum_{k=1}^{k=S-1} \frac{\chi_{k+1} d_k}{h_k h_{k+1}}, \quad S_1 = 0;$$

$$Q_S = T_S \sigma_S + P_S;$$

$$T_S = \frac{(\chi_S \alpha_{S+1} - \chi_{S+1} \alpha_S)^3}{\chi_S \chi_{S+1} (\chi_{S+1} - \chi_S)^2}; \quad (3.4)$$

$$P_S = \left(\frac{\alpha_{S+1} - \alpha_S}{\chi_{S+1} - \chi_S} \right)^2 (\chi_{S+1} \alpha_{S+1} - \chi_S \alpha_S);$$

$$W_S = \frac{\alpha_{S+1} - \alpha_S}{\chi_{S+1} - \chi_S} (\chi_{S+1} \alpha_{S+1} - \chi_S \alpha_S).$$

Обычно используют «коэффициенты с нулями» для положения входного зрачка $S_p = 0$.

$$\left. \begin{aligned}
 B_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s; \\
 K_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s S_s; \\
 C_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} \frac{\chi_{s+1} \alpha_{s+1} - \chi_s \alpha_s}{h_s} - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} W_s S_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s S_s^2; \\
 D_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} \frac{\chi_s \alpha_{s+1} - \chi_{s+1} \alpha_s}{h_s} + C_0; \\
 E_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} \frac{\chi_{s+1}^2 - \chi_s^2}{h_s^2} + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} S_s \frac{\chi_s \alpha_{s+1} - \chi_{s+1} \alpha_s}{h_s} + \\
 &+ \frac{3}{2} \sum_{s=1}^{s=m} S_s \frac{\chi_{s+1} \alpha_{s+1} - \chi_s \alpha_s}{h_s} - \frac{3}{2} \sum_{s=1}^{s=m} S_s^2 W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s S_s^3 Q_s.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Достоинства абберационных полиномов («коэффициентов с нулями»): в формулы в явном виде входит параметр σ_s , характеризующий отступление оптической поверхности от сферической формы (деформация поверхности), то есть они могут использоваться для сферической и НП. Формулы привлекательны для зеркальных ОС.

Радиусы поверхностей r_s и расстояния между элементами системы d_s связаны координатами нулевых лучей:

$$\begin{aligned}
 d_s &= \frac{1}{\alpha_{s+1}} (h_s - h_{s+1}); \\
 r_s &= h_s \frac{\chi_s - \chi_{s+1}}{\chi_s \alpha_{s+1} - \chi_{s+1} \alpha_s}.
 \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.3. Монохроматические абберации третьего порядка

В формулы (3.1)–(3.5) входят суммы монохроматических аббераций 3-го порядка: для широкого пучка – сферической и комы и узкого – астигматизма, кривизны поля, дисторсии. Абберации 3-го порядка взаимозависимы: если заданы три абберации, то две остальные вполне определены.

Предмет на бесконечности

Условия нормировки $S_1 = \infty$; $\alpha_1 = 0$; $\alpha' = 1$; $h = f'$; $\beta_1 = 1$.

В расчетных формулах $\bar{S}_I, \bar{S}_{II}, \bar{S}_{III}, \bar{S}_{IV}, \bar{S}_V$ – приведенные суммы Зейделя для $f' = 1$;

σ' – задний апертурный угол;

ω_1 – угол поля зрения;

y' – размер изображения.

Описание aberrаций

Сферическая aberrация $\Delta s' = -\frac{1}{2} f' \text{tg}^2 \sigma' \bar{S}_I$;

кома $\Delta y'_k = -\frac{3}{2} f' \text{tg}^2 \sigma' \text{tg} \omega_1 \bar{S}_{II}$;

астигматизм $z'_s - z'_m = f' \text{tg}^2 \omega_1 \bar{S}_{III}$; (3.7)

кривизна поверхности Петцваля $z'_p = -\frac{y'^2}{2} \frac{\bar{S}_{IV}}{f'}$;

дисторсия $\Delta y'_D = -\frac{1}{2} f' \text{tg}^3 \omega_1 \bar{S}_V$.

Величина $\eta = \frac{\Delta s'}{s'_{0,p} - s'_0} + \frac{\Delta f'}{f'} = \frac{1}{2} \text{tg}^2 \sigma' \bar{S}_{II}$ характеризует отступление от условия изопланатизма и используется для расчета меридиональной комы.

$$\eta = \Delta s' / (Sp'_i - S') + \Delta f' / f',$$

если $s_1 = \infty$; $\eta = \Delta s' / (Sp'_i - S') + \Delta \beta / \beta$, если $s_1 \neq \infty$.

Предмет, расположенный на конечном расстоянии: $S \neq \infty$

$$\alpha_1 = \beta^x, \quad \alpha' = \beta_1 = 1, \quad h_1 = s_1 \alpha_1:$$

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} f' \text{tg}^2 \sigma' S_1;$$

$$\begin{aligned} \Delta y'_k &= -\frac{3}{2} f' \operatorname{tg}^2 \sigma' \operatorname{tg} \omega_1 S_{II}; \\ z'_s - z'_m &= \operatorname{tg}^2 \omega_1 S_{III}; \quad z'_p = -\frac{y'^2}{2} S_{IV}; \\ \Delta y'_D &= -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^3 \omega_1 S_V; \\ \eta &= -\frac{1}{2} (\operatorname{tg}^2 \sigma' S_{II}) / I, \quad \eta = \frac{\Delta s'}{s'_{0,P} - s'_0} + \frac{\Delta \beta_0}{\beta_0}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

где $I = n_1 \alpha_1 y_1 = \beta^\times (s_p - s)$.

Описание аберраций

$$\begin{aligned} \Delta s' &= -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' S_I; \\ \Delta y'_k &= -\frac{3}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' \left(\frac{y}{y_0}\right) S_{II} = -\frac{3}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' \left(\frac{y'}{y'_0}\right) S_{II}; \\ \eta &= -\frac{1}{2} (\operatorname{tg}^2 \sigma') S_{II} / I = -\frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg}^2 \sigma'}{y'_0} S_{II}; \\ z'_s - z'_m &= \frac{y^2}{y_0^2} S_{III} = \left(\frac{y'}{y'_0}\right)^2 S_{III}; \\ z'_n &= -\frac{y'^2}{2} \frac{\bar{S}_{IV}}{f'}; \\ \Delta y'_D &= -\frac{1}{2} \left(\frac{y}{y_0}\right)^3 S_V = -\frac{1}{2} \left(\frac{y'}{y'_0}\right)^3 S_V, \end{aligned}$$

где y и y' – размеры реального предмета и изображения;
 y_0 и y'_0 – их параксиальные размеры.

4. Методы коррекции aberrаций

Аберрационный расчет – такой расчет ОС, в результате которого определяются конструктивные параметры элементов схемы, обеспечивающие необходимое качество изображения или нужную структуру выходящих пучков. Типы аберрационного расчета: проектный и проверочный.

4.1. Метод проб

Метод решает задачу изучения влияния различных параметров выбранной ОС на ее aberrации и отысканию таких значений конструктивных параметров, при которых aberrации будут допустимыми. Первоначально из каталогов, архивных данных, патентов, а если есть машинные архивы, то с помощью ИПС (информационно-поисковая система), по требуемым характеристикам подбирают наиболее подходящую ОС (прототип), которую пересчитывают при необходимости на требуемое фокусное расстояние или линейное увеличение. Для этого определяют коэффициент масштабирования:

$$\gamma = f'_{\text{тр}} / f'_k,$$

где $f'_{\text{тр}}$ – требуемое значение фокусного расстояния;

f'_k – значение фокусного расстояния из каталога; все значения радиусов кривизны, толщин и воздушных промежутков умножают на этот коэффициент.

Базовая система (прототип) выбирается по оптическим характеристикам: полю зрения $2\omega_{\text{тр}} \leq 2\omega_k$, фокусному расстоянию $f'_{\text{тр}} \approx f'_k$.

Метод проб (перерасчет известных систем) чрезвычайно прост, но весьма продолжителен по времени, увлечение им неизбежно связано с опасностью застоя и не способствует созданию оригинальной оптики. Оптик-конструктор должен иметь при этом высокую квалификацию и хорошую интуицию.

4.2. Алгебраический метод

Вводятся условия нормировки и составляется система аберрационных уравнений.

Выражения для aberrаций при бесконечно удаленном предмете значительно проще, поэтому при возможности ОС разбивают таким образом, чтобы использовать блоки для предмета – на бесконечности ($S = \infty$); часто такие блоки рассчитывают в обратном ходе (расчет окуляров, проекционных объективов и т. п.).

Целесообразно, чтобы aberrации блоков компенсировали друг друга. Например, в системе с тремя независимыми параметрами $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ три основных aberrации – сферическая aberrация, кома и астигматизм – могут быть равны нулю в области третьих порядков:

$$S_{\text{I}} = f_1(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = 0;$$

$$S_{\text{II}} = f_2(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = 0;$$

$$S_{\text{III}} = f_3(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = 0.$$

Один параметр обычно оставляют свободным. К aberrационным уравнениям добавляют выражения, вытекающие из конструктивных, технологических и других требований, предъявляемых к оптике прибора. Получаемая таким образом система уравнений служит для определения неизвестных оптических параметров: углов α_S , осевых расстояний d_S (или высот лучей на главных плоскостях h_S), радиусов r_S и деформаций σ_S поверхностей.

Параметры α_S, h_S , связанные с d_S и r_S , определяют параксиальные характеристики, причем так называемые «воздушные» углы определяют оптическую силу компонентов. На произвольном k -м компоненте координаты 1-го луча описываются выражениями:

$$\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \alpha_k + h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1} r_k}, \quad h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} \cdot d_k. \quad (4.1)$$

Метод имеет ограниченное применение в связи с невысокими оптическими характеристиками рассчитываемых систем (относительного отверстия D/f' и поля зрения 2ω).

При увеличении D/f' необходимо вести учет aberrаций высших порядков и проводить решение алгебраическим методом с помощью компьютерных программ.

4.3. Комбинированный метод

Метод применяется для расчета оптических систем средней сложности. В первом приближении оптику рассчитывают по теории aberrаций III-го порядка, получая базовую систему. Далее выполняется расчет хода действительных лучей; определяются aberrации высших порядков; вводят поправки в коэффициенты aberrаций III-го порядка базовой ОС (существуют формулы, связывающие aberrации и коэффициенты aberrаций).

После введения поправок решается система алгебраических уточненных уравнений и заново рассчитываются высоты действительных лучей на оптических поверхностях. Таких операций (шагов) может быть несколько до получения удовлетворительного качества изображения или необходимой структуры пучков лучей на выходе из системы.

4.4. Метод автоматической оптимизации

Задача оптимизации – поиск такой комбинации параметров, при которой проектируемая ОС обладает наилучшим качеством коррекции aberrаций при обеспечении контроля граничных значений всех конструктивных параметров, а также функциональных, эксплуатационных и технологических характеристик.

Процедура оптимизации: определяется структура критерия качества ОС, составляются списки параметров и ограничений.

Этапы оптимизации:

выбор базовой системы первого приближения (знание минимального числа параметров конструкции схемного решения); удачный выбор исходной системы на ранних этапах разработки в значительной мере сокращает общее время проектирования;

оптимальное решение находят компьютерным путем, используя специальные программные комплексы: ZEMAX, CODE-5, OSLO, OPAL и др.

Программы автоматизированного расчета ОС способны привести заданную ОС к ближайшей оптимальной конфигурации с помощью минимизации определенной оценочной функции, которая обычно представляется в виде суммы квадратов величин выбранных aberrаций.

Список параметров – описание варьируемых параметров (кривизны поверхностей, толщины, осевые промежутки, квадраты эксцентриситетов асферических поверхностей второго порядка, коэффициенты асферики высшего порядка, коэффициенты деформации ДОО, передний и задний отрезок, положение АД). *Список ограничений* – описание областей допустимых решений. Параксиальные характеристики: увеличение, положение плоскости Гаусса, задний отрезок либо габариты – контролируются ограничениями; при необходимости можно контролировать aberrации отдельных лучей.

Критерий качества – положительная функция от параметров ОС, значение которой определяет степень близости к «идеальному» решению. К примеру, это сумма квадратов отступлений от требуемых значений характеристик заданного набора (aberrации отдельных лучей или других характеристики: увеличение, задний отрезок, длина системы и пр.). Чем меньше критерий, тем лучше очередной вариант. Часто вводят индивидуальные весовые множители и масштабные коэффициенты для определения относительной роли характеристик, участвующих в формировании критерия. Подбор конкретных значений весов или норм – задача сложная и трудоемкая. Коэффициенты разложения волновой aberrации описываются в единицах основной длины волны спектрального интервала.

4.5. Композиционный метод

Метод затрагивают вопрос о выборе исходной ОС, обладающей необходимыми aberrационными свойствами.

Композиция дает возможность заранее выполнить необходимую коррекцию и избежать неоправданного нагромождения ненужных элементов.

Типы создания оптической системы методом композиции:

по набору из поверхностей с известными aberrационными свойствами;

путем синтеза по базовым компонентам;

простейшим параметрическим синтезом для систем с невысокими оптическими характеристиками.

В качестве поверхностей с известными свойствами используют изопланатические поверхности, вносящие примерно одинаковые aberrации по всему полю; к ним относят:

апланатическую, которая образует идеальное изображение одной сферы на другую (тип А);

концентрическую к зрачку (КЗ);

концентрическую к осевой точке предмета (КП).

Кривизну поверхностей определяют по главному лучу (при наборе поверхностей в гауссовой области в ОС могут не проходить реальные лучи); формулы для вычисления кривизны вводятся в компьютерные программы.

Такой синтез дает ОС, обладающую хорошими коррекционными возможностями для последующей оптимизации. В качестве параметров оптимизации выбираются осевые расстояния и положение АД, а в качестве оптимизируемых функций – отклонения от заданных значений основных параксиальных характеристик (β_0 , S' , S_p , S'_p) и неконтролируемые автоматически аберрации. В ограничения включаются условия прохождения главного и апертурного лучей на всех поверхностях, а также условия конструктивной реализации оптики.

Композиционный метод позволяет

просматривать множество вариантов,

менять в широких пределах схему для получения требуемых результатов, пригодных для последующей оптимизации.

Метод синтеза используют для создания особо светосильных (1: 0,7–1: 1,2) и широкоугольных ($2\omega > 60^\circ$) объективов, для которых другие методы расчета практически отсутствуют.

5. Компьютерные программы анализа

5.1. Процедура «Анализ»

В процессе *анализа* вычисляются значения оптических характеристик по известным конструкционным параметрам. Проводят анализ на различных уровнях.

Первый уровень:

анализ в гауссовом приближении;

анализ габаритов пучков;

анализ в области аберраций третьего порядка;

экспресс-анализ аберраций, то есть вычисление аберраций небольшого количества действительных лучей, достаточного для начальной эвристической оценки качества коррекции;

полный анализ аберраций, то есть получение коэффициентов аппроксимирующего выражения, полностью описывающего аберрационную функцию;

анализ пропускания по зрачку.

Математический аппарат анализа на этом уровне основан на геометрической оптике, и его значительную часть представляет собой расчет хода лучей через ОС.

Второй уровень анализа (экспресс-анализ и полный анализ):

функция рассеяния точки (ФРТ);

оптическая передаточная функция (ОПФ).

5.2. Программное обеспечение

Специалисты предлагают несколько десятков универсальных пакетов программ для проектирования ОС различного назначения и ряд программных систем, предназначенных для проектирования специализированной оптики.

Универсальные программные системы, в свою очередь, можно разделить на две группы. Основной операцией при анализе работы ОС является расчет лучей.

В первой группе пакетов программ для представления и анализа работы ОС используется классический подход, когда явно указывается последовательность взаимного расположения оптических элементов, то есть расчет лучей выполняется последовательно (к примеру, проектирование и анализ изображающих ОС).

Вторая группа программных сред для представления и анализа работы ОС использует глобальную систему координат и непоследовательную (недетерминированную) процедуру расчета лучей, к примеру, проектирование и анализ осветительных систем).

В программных системах с последовательным описанием элементов ОС используются такие возможности:

диалог с пользователем;

двух- и трехмерная графика;

описание исходных данных с помощью простого языка и таблиц;

встроенный мультитекраный редактор;

встроенная база данных для хранения ОС и результатов расчета;

каталоги оптических материалов;

задание асферических поверхностей второго и более высоких порядков;
операции перестройки, поворота, сдвига, оборачивания, масштабирования;
библиотека ОС на основе патентов.

6. Оценка качества изображения оптических систем

6.1. Исходные принципы оценки качества изображения

Оптическая система, полученная в результате синтеза и оптимизации, должна иметь определенное качество изображения, зависящее от ее применения. Однако ОС никогда не изображает точку в виде точки.

С одной стороны этому препятствуют аберрации, с другой – дифракция света. Это приводит к тому, что изображение точки становится нерезким, расплывчатым, мелкая структура предметов передается неправильно, в результате две близко расположенные точки сливаются в одно пятно, изображения решеток расплываются в серый фон и т. п.

Под *качеством изображения* обычно понимают степень соответствия геометрических, фотометрических и спектральных характеристик изображения и предмета.

Для оценки качества изображения существуют количественные и качественные характеристики.

Количественные критерии – мера оценки качества. Количественные критерии должны быть разными в зависимости:

от назначения оптической системы,
ее оптических характеристик,
типа приемника.

Количественные критерии:

разрешающая способность (N ; δ);
размер кружка рассеяния, обычно размер $2\Delta y'$; приблизительно считают, что $N = 1/2\Delta y'$;

ОПФ – оптическая передаточная функция;

частотно-контрастная характеристика ЧКХ (количество сформированных элементов изображения с соответствующим контрастом);

ФПК – функция порогового контраста, вычисляемая по результатам измерения характеристик используемой пленки (ЧКХ, коэффициент контрастности, показатель гранулярности);

критерий оценки изобразительных свойств ОС – предельная разрешающая способность, определяемая точкой пересечения ЧКХ фотооптической системой с ФПК;

функция светораспределения;

геометрические аберрации;

волновые аберрации (например, в микроскопе $W = \Delta A^2 / 2\lambda A$, где Δ – расфокусировка – выбирается плоскость установки; при $W = 0,5\lambda$ объектив микроскопа считается ахроматическим);

точечные диаграммы (ТД);

численные критерии пограничной кривой (исследуется тест-объект, яркость которого меняется функцией скачка).

Требования к качеству изображения определяются назначением системы.

Примеры:

1) объективы телескопов, предназначенных для наблюдения звезд и других объектов, должны иметь качество изображения, которое бы позволило различать две звезды при наименьшем расстоянии между ними;

2) при малом поле зрения (астрономические объективы) достаточно оценивать качество изображения осевой точки, которое должно быть практически идеальным;

3) при художественном воспроизведении объекта (фотографические объективы) важным является соответствие изображения и предмета не только по геометрическим и фотометрическим, но и по спектральным характеристикам (для них рассчитывается коэффициент цветопередачи, а для оценки качества изображения важна связь количественных оценок изображения с его психофизиологическим восприятием);

4) ОС, используемые в каналах связи, должны передавать и регистрировать максимальное количество информации, поступающей от объекта.

Существуют 2 класса систем по требованиям к качеству изображения – дифракционно-ограниченные, геометрически-ограниченные.

Дифракционно-ограниченные – это высококачественные ОС, формирующие изображение, близкое к дифракционному, где дифракция оказывает существенное влияние на распределение энергии в пятне рассеяния.

К ним относятся: объективы телескопов, геодезических зрительных труб, микрообъективы, имеющие небольшое поле и объективы для микроэлектронного производства с достаточно высокими оптическими характеристиками.

Геометрически-ограниченные системы составляют наиболее обширный класс, где остаточные аберрации не позволяют получить изображение, сравнимое с дифракционным.

К ним относятся кино-, фото- и телевизионные объективы, многие системы для оптико-электронных приборов и т. п. Они имеют достаточно большое угловое поле (от 40° до 120°). Для этих систем распределение энергии в изображении точки и малой светящейся площадки полностью определяется геометрическими аберрациями, а не дифракцией.

6.2. Разрешающая способность оптических систем

Разрешающая способность – наиболее важная характеристика качества изображения, которая показывает сколько линий или предметных точек может изобразить раздельно фотосистема на отрезке длиной 1 мм (фото – N) или при каком минимальном расстоянии между двумя точками они изображаются системой в виде двух точек (микроскопы $\delta = \lambda / 2A$). Разрешающая способность объективов телескопических систем выражается в угловой мере, чаще в секундах, для фотообъективов – в мм^{-1} , для объективов микроскопов – в линейной мере (в мкм).

Недостатки этого критерия:

не несет информацию о качестве формирования элементов, имеющих размеры больше минимальных;

не дает представлений о передаче контраста;

зависит от свойств приемника;

не дает полного представления о качестве изображения.

Изображение точки ИОС представляет собой дифракционную картину (вид центрального светлого пятна (диск Эри), окруженного

дифракционными кольцами. Распределение интенсивности J света приведено на рис. 6.1.

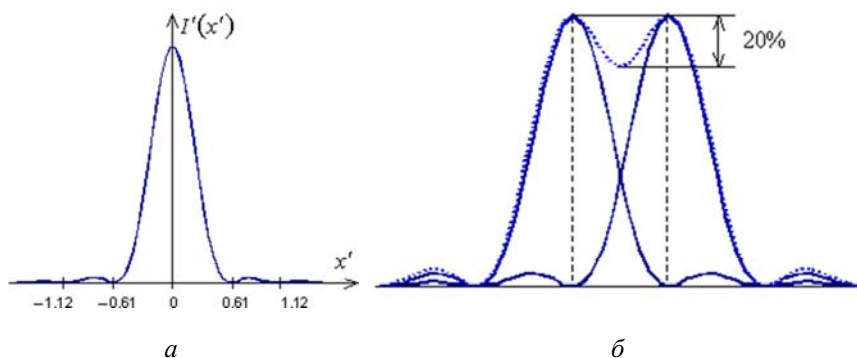


Рис. 6.1. Распределение интенсивности J света:

a – дифракционное изображение точки;

b – разрешение двух дифракционных точек по критерию Рэлея

Разрешающая способность – критерий количественной оценки качества изображения, создаваемого ОС. Угловое расстояние Ψ_{\min} для первого темного кольца определяется по теоретическому критерию Рэлея:

$$\Psi_{\min} = (1,22/D) \lambda;$$

где D – диаметр входного зрачка;

λ – длина волны света.

Критерий Рэлея позволяет количественно определить разрешающую силу различных оптических приборов: изображения двух одинаковых точечных источников света считаются разрешимыми, если центральный максимум дифракционной картины от одного точечного источника совпадает с первым минимумом дифракционной картины от другого (рис. 6.1, b).

Разрешаемое угловое расстояние в пространстве предметов $\psi = 140''/D$.

Визуальная разрешающая способность для идеально-го объектива	$N = 1 / \delta'_0 = 1 / (\psi f'_{06}) \text{ [мм}^{-1}\text{]}$	
Линейный предел разрешения	$\delta'_0 = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} = 1,22 \cdot \lambda \cdot k$	6,1
Для $\lambda = 0,546 \text{ мкм}$	$N_0 = \frac{1500D}{f'}$	6,2

Для фотообъективов изображения удаленных точек находятся в задней фокальной плоскости, где линейный предел разрешения равен: $\delta'_0 = \psi f'_{06}$, где f'_{06} – фокусное расстояние объектива.

Определение визуальной разрешающей способности объектива производится при помощи тест-объектов и штриховых мир.

6.3. Влияние aberrаций на разрешающую способность

При малых aberrациях качество изображения достаточно хорошо характеризуется освещенностью в центре кружка Эри. Если ОС не свободна от сферической aberrации, распределение освещенности в дифракционном пятне рассеяния изменяется, причем часть световой энергии переходит из кружка Эри в кольца, центральный максимум понижается, максимумы в кольцах становятся более высокими, в минимуме падение освещенности не достигает нуля.

Одним из критериев качества изображения является *критерий резкости изображения* – определительная яркость или число Штреля.

$$K = \frac{E}{E_0},$$

где E_0 – освещенность в центре кружка Эри при отсутствии сферической aberrации;

E – при малых aberrациях.

При $k \leq 0,75$ изображение почти не отличается от изображения безaberrационной системы. Допустимым является $k = 60 \%$.

Нахождение величины k требует предварительного определения волновых aberrаций Δl конкретной ОС.

Коэффициент Штреля равен

$$\frac{E}{E_0} = \frac{4}{(m')^4} \left[\left(\int_0^{m'} y \cos \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} dy \right)^2 + \left(\int_0^{m'} y \sin \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} dy \right)^2 \right]. \quad (6.1)$$

Должны быть известными:

m' – половина диаметра выходного зрачка;

y – произвольные координаты на зрачке.

6.4. Качественные параметры оценки качества изображения

Качество оптического изображения – степень соответствия геометрической, фотометрической и спектральной характеристик изображения и предмета.

Изображение должно быть подобно предмету не только по контуру, но и в каждой его точке: из-за аббераций и дифракций изображение получается размытое и мелкая структура передается неправильно.

Необходимо учитывать:

1) при малом поле зрения (астрономические системы) достаточно рассматривать изображения по осевой точке, которые должны быть идеальными;

2) при художественном воспроизведении (фотообъективы) смотрят соответственно по геометрическим и спектральным характеристикам и требуемом коэффициенте цветопередачи;

3) оптические системы, используемые в канале связи, должны передавать и регистрировать максимальное количество информации, поступающей от объекта.

Качественные критерии:

подобие изображения предмету не только по общему контуру, но и в каждой отдельной его точке;

контраст составляющих элементов изображения, их количество и взаимное расположение по полю;

возможность регистрации элементов изображения приемниками (глазом, светочувствительным слоем пленки, фотоприемникам и т. д.) с минимальными искажениями;

ЧФХ (ФПФ) – качественное соответствие геометрического положения элементов изображения по отношению к предмету;

функция рассеяния ФР – математически описывает распределение освещенности в изображении, образуемом ОС; предмет рассматривается как совокупность светящихся точек или линий:

$$\text{ФРЛ} \quad A'l(x') = \int_{-\infty}^{+\infty} A'(x, y') dy';$$

$$\text{ФРТ} \quad A'(x', y') = \left[\frac{2J_1(x)}{x} \right]^2.$$

Эти функции обычно нормируют, принимают объем, ограничиваемый ими равный единице ($= 1$).

Функция рассеяния точки ФРТ описывает распределение интенсивности в изображении светящейся точки (пятно рассеяния). Картина ФРТ для идеальной оптической системы (рис. 6.2) симметрична относительно оптической оси и состоит из центрального максимума (диска Эри) и вторичных максимумов в виде колец.

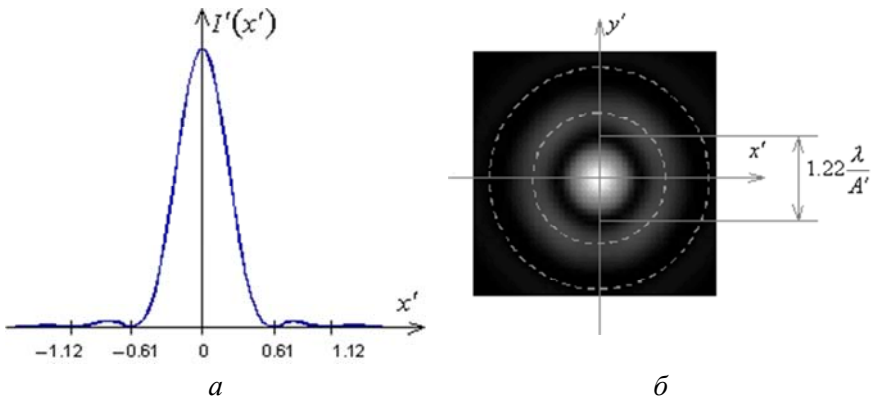


Рис. 6.2. Функция рассеяния точки:
а – сечение; б – распределение интенсивности

Функция рассеяния линии ФРЛ представляет собой распределение интенсивности в изображении бесконечно длинной линии (в направлении Y – меридиональная; X – сагиттальная ФРЛ).

ФРТ и ФРЛ – импульсная реакция или импульсный отклик (аналогия с теорией связи). В ОС аналоги бесконечно короткого импульса – это бесконечно малая точка или бесконечно узкая щель.

Функция рассеяния точки выводится в виде карты уровней равной интенсивности или в трехмерном виде. В заголовке рабочего окна выводится число Штреля (рис. 6.3). Вид отображения устанавливается в окне «Edit». Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ функции рассеяния точки».



Рис. 6.3. Функция рассеяния точки

Анализ геометрического изображения. Работа предназначена для анализа структуры изображения центрированных ОС в геометрическом приближении. Режим используется при анализе изображения геометрически-ограниченных систем, в которых не учитываются дифракционные эффекты, искажающие истинную структуру изображения. Вычисление всех характеристик в геометрическом приближении основано на определении поперечных aberrаций для большого количества точек. Количество точек устанавливается в поле «Количество точек на зрачке» окна «Edit».

При задании нескольких длин волн можно рассчитывать полихроматические характеристики с учетом функции спектральной эффективности или монохроматические характеристики для центральной длины волны (поле «Характеристики < Полихроматические / Монохроматические >»).

6.5. Волновые критерии оценки качества изображения

1. *Критерий Рэля* предложен для оценки высококачественных систем. Рэлей показал, что остаточная сферическая aberrация не оказывает заметного влияния на качество изображения, если оптическая разность хода любой пары лучей из всего пучка не более $\lambda/4$. Оптическую систему можно считать практически идеальной, если она удовлетворяет критерию Рэля $W \leq 0,25\lambda$. Этот критерий успешно применяется в тех случаях, когда график волновой aberrации имеет плавный вид (дефокусировка, сферическая aberrация третьего порядка). Этому критерию примерно соответствует критерий Штреля, равный 0,8.

2. Для некоторых оптических систем (микрообъективы, астрономические объективы) с малым полем выполнение критерия Рэля недостаточно для получения хорошего качества изображения. К таким системам применяют *критерий Рождественского* $N \leq \lambda/10$.

3. *Наибольшие отклонения или деформация* ΔW_{max} волнового фронта.

Величина ΔW_{max} характеризуется алгебраической суммой наибольших отклонений волнового фронта от сферы сравнения (рис. 6.4).

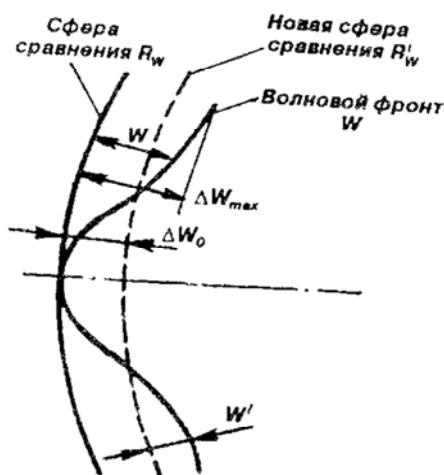


Рис. 6.4. К определению среднеквадратического отклонения волнового фронта

Критерий Рэлея $W \leq 0,25\lambda$. нельзя применять, если волновая aberrация меняется по сложному закону и распределение освещенности в осевой точке (функция рассеяния точки) может быть существенно искажено. Качество изображения зависит не только от величины ΔW_{\max} , но и от формы волнового фронта, от его местных деформаций, их расположения.

4. Для учета этих факторов удобно применять *критерий среднеквадратической деформации* или отклонения волнового фронта. Среднеквадратическое отклонение $W_{\text{СКВ}}$ монохроматического волнового фронта – этот критерий был предложен Марешалем.

Выясним геометрический смысл величины $W_{\text{СКВ}}$. Обозначим через R_w сферу сравнения (рис. 6.4) через W – волновую aberrацию относительно этой сферы. Введем новую сферу сравнения R'_w , обозначим волновую aberrацию относительно новой сферы сравнения через W' .

Считаем, что $R - R' = \Delta W_0$ – постоянная величина. Тогда

$$\overline{W}^2 - (\overline{W})^2 = \overline{W'}^2 - (\overline{W}')^2.$$

Подберем сферу сравнения R'_w так, чтобы среднеарифметическое значение волновой aberrации

$$\overline{W'} = \frac{1}{S} \iint W' ds = 0,$$

где S – площадь выходного зрачка, тогда

$$\overline{W'}^2 = W_{\text{СКВ}}^2 = \overline{W}^2 - (\overline{W})^2,$$

Таким образом, величину $W_{\text{СКВ}}$ можно вычислить двумя способами.

Первый способ

$$W_{\text{СКВ}} = \left[\overline{(W - \overline{W})^2} \right]^{0,5} = \left[\iint_s (W - \overline{W})^2 ds \right]^{0,5} = \left[\overline{W}^2 - (\overline{W})^2 \right]^{0,5}. \quad (6.2)$$

Вторым способом монохроматическую среднеквадратическую волновую aberrацию можно найти по формуле

$$W_{\text{СКВ}} = \overline{W'} = \left[\frac{1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W'^2 \rho d\rho d\varphi \right]^{0,5},$$

в которой W' определяется относительно оптимальной сферы сравнения $R'_{w'}$.

Если aberrации малы, то освещенность в центре дифракционного изображения можно выразить через средний квадрат $W_{\text{СКВ}}^2$. Для нормированной освещенности, когда в центре дифракционного пятна освещенность равна единице, получим известную *формулу Марешаля*

$$E'_{0,\text{норм}} \approx 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 W_{\text{СКВ}}^2. \quad (6.3)$$

Для безaberrационной системы $E'_{0,\text{норм}} = 1$. При наличии aberrаций освещенность уменьшается на величину, пропорциональную среднеквадратическому отклонению волнового фронта. Приближенная формула достаточно точна, погрешность составляет 1–2 %, если относительная освещенность не менее 0,75.

Если принять, что волновая aberrация понижает освещенность в центре дифракционного пятна на 20 %, что почти не влияет на качество, то и из (6.3) получим известный *критерий Марешаля*

$$W_{\text{СКВ}}^2 \leq \lambda^2/196, \quad W_{\text{СКВ}} \leq \lambda/14. \quad (6.4)$$

Этот критерий означает, что среднеквадратичное отклонение волнового фронта относительно оптимальной сферы не должно превышать $\lambda/14$.

5. *Полихроматическое среднеквадратическое отклонение волнового фронта* $W_{\Sigma\text{СКВ}}$.

Полихроматическую среднеквадратическую волновую aberrацию можно определить интегрированием по спектральному интервалу монохроматического волнового фронта $W_{\text{СКВ}}$:

$$W_{\Sigma_{\text{СКВ}}} = \left[\frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 W^2(\rho, \varphi, \chi) \rho d\rho d\varphi d\chi - \frac{1}{\pi^2} \left[\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 W(\rho, \varphi, \chi) \rho d\rho d\varphi d\chi \right]^2 \right]^{0,5},$$

где вместо длины волны λ введена безразмерная относительная спектральная координата χ , изменяющаяся от -1 до $+1$:

$$\chi = (\lambda - \lambda_0) / \Delta\lambda,$$

где $\lambda_0 = 0,5 (\lambda_{\text{max}} + \lambda_{\text{min}})$ – средняя длина волны;

$\Delta\lambda = 0,5 (\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}})$ – полуширина рабочего спектрального интервала.

При расчете предполагается, что функция спектральной эффективности постоянна во всем спектральном интервале.

6.6. Частотно-контрастная характеристика

Оптическая передаточная функция ОПФ описывает формирование предмета от максимальных элементов до минимальных, контраст которых близок к нулю; это наиболее информативный критерий качества, позволяющий оценить два параметра:

количество сформированных элементов изображения с соответствующим контрастом, определяется функцией передачи модуляции ФПМ (ЧКХ, МТФ);

качественное соответствие геометрического положения элементов изображения по отношению к предмету, определяется функцией передачи фазы ФПФ.

Выполнив различные преобразования ОПФ, можно получить частные критерии, включая известные классические критерии Рэля и Штреля, применяемые для оценки качества изображения высококачественных систем с небольшим угловым полем.

Частотно-контрастная характеристика – один из основных параметров оценки качества ОС, показывающий, насколько резкие изображения способен формировать объектив (рис. 6.5).

Значение ЧКХ зависит от пространственной частоты деталей сформированного изображения, измеряемой в количестве строк на миллиметр. Вывод частотно-контрастной характеристики возможен

в виде двумерной функции для всех направлений частот. Настройка способа отображения производится в поле «Вид отображения». Все настройки соответствуют работе «Анализ функции рассеяния точки».

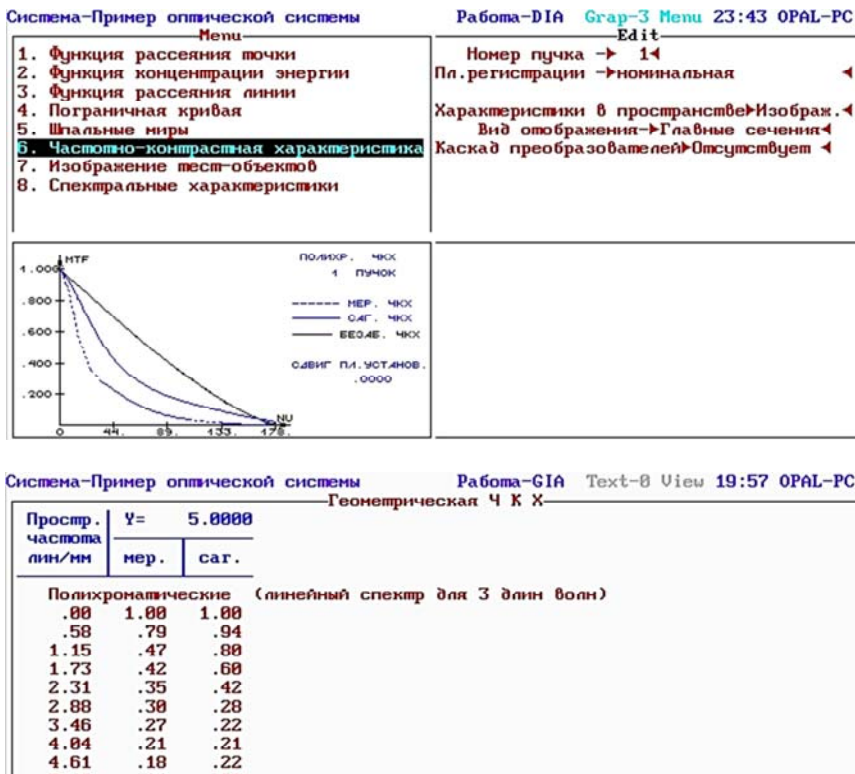


Рис. 6.5. Частотно-контрастная характеристика

Геометрическая ЧКХ рассчитывается для 20 значений пространственных частот до частоты, заданной пользователем (поле «Пространственная частота»). Вывод результатов возможен в виде графика или таблицы. В графической форме для справки выводится безаберрационная ЧКХ, определяемая с учетом дифракции.

ЧКХ дает количественную оценку контраста в изображении структур предметов различных частот и его качества, тогда разрешающая способность – это частота в изображении периодически располо-

женных объектов (светящихся точек или штрихов миры), при которой контраст между изображениями объектов и окружающим их фоном находится на границе контрастной чувствительности приемника (глаза, фотоэлемента и т. д.), воспринимающего изображение. ЧКХ является составной частью ОПФ и определяет отношение контраста изображения k' к контрасту предмета k в зависимости от частоты точек предмета $k(N) = \frac{k'}{k}$.

В качестве предмета используют обычно синусоидальную миру, штрихи которой имеют синусоидальное распределение яркости, которая меняется от 0 до L_{\max} . Контраст миры $k = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$.

Изображение миры также имеет \sin распределение освещенности.

Тогда ЧКХ – зависимость контраста изображения миры от ее пространственной частоты при контрасте самой миры, равной единице ($k = 1$, если $L_{\min} = 0$).

Чем больше частота ν миры ($\nu = \frac{1}{e}$), тем сильнее падает контраст.

Для каждой ОС существует граничная частота, для которой $T(\nu_{\text{гр}}) = 0$, то есть для всех $\nu \geq \nu_{\text{гр}}$ имеем $T(\nu) = 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu_{\text{гр}} = \frac{2 \sin \sigma'}{\lambda}; \quad S \neq \infty \\ \nu_{\text{гр}} = \frac{D}{\lambda \cdot f'}; \quad S = \infty. \end{array} \right. \quad (6.5)$$

Различают дифракционную и геометрическую ЧКХ.

ДЧКХ имеет смысл применять для хорошо исправленных систем ($\lambda - 2\lambda$), или если аберрации изображения точки не превышают ее дифракционного изображения.

Когда $\nu \ll \nu_{\text{гр}}$, можно ограничиться ГЧКХ.

Полихроматическая ЧКХ имеет смысл только для зеркальных систем и для тех линзовых, у которых хорошо исправлен хроматизм увеличения ($y'_{\lambda_1} - y'_{\lambda_2} \leq 0,02$ приблизительно).

6.7. Точечная диаграмма лучей

Точечная диаграмма лучей ТД – картина точек пересечения лучей, равномерно распределенных по зрачку, с плоскостью изображения (рис. 6.6).

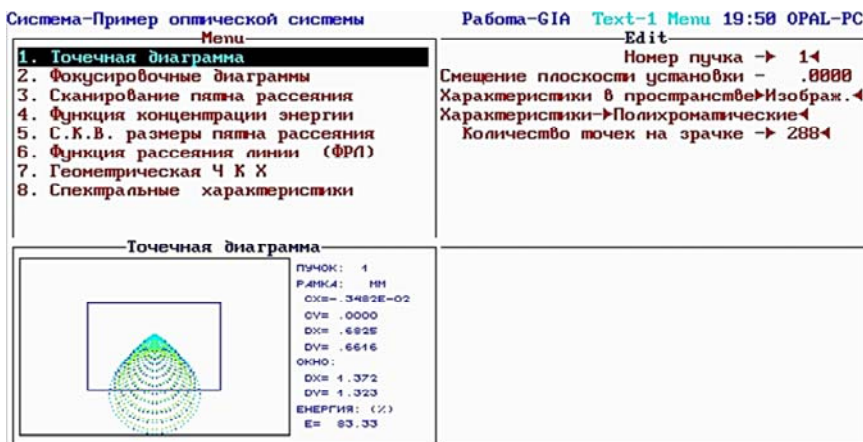


Рис. 6.6. Точечная диаграмма

ТД может выводиться для одного пучка или для всех пучков.

При выводе точечной диаграммы для одного пучка выводится рамка: по клавише «Space» выделенная часть изображения отобразится на все окно, по клавише «Enter» производится расчет концентрации энергии в прямоугольнике с размерами рамки. Могут быть выведены для справки значения размеров окна и размеров и положения рамки в плоскости изображения справа.

Все настройки этого пункта – стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».

Фокусирувочные диаграммы характеризуют изменение точечных диаграмм при сдвиге плоскости изображения. Для всех пучков выводятся ТД для номинальной плоскости установки и для четырех сдвинутых на расстояния $\pm DS'$ и $\pm 2 \cdot DS'$ плоскостей. Величина сдвига DS' задается в поле «Шаг по расфокусировке» окна «Edit» (рис. 6.7). Остальные настройки этого пункта стандартные для работы «Анализ геометрического изображения».

6.8. Функция рассеяния линии и пятно рассеяния

Сканирование пятна рассеяния. В этом пункте отображается то-пограмма пятна рассеяния. «Шаг сканирования» определяет минимальный размер элемента этой картины.

Среднеквадратические размеры пятна рассеяния СКВ выводятся в табличной форме ($X_{скв}$, $Y_{скв}$); дополнительно положение энергетического центра пятна ($Y_{цэ}$). По их значениям можно оценить размеры пятна в меридиональном и сагиттальном направлениях (рис. 6.7).

Система-Пример оптической системы

Меню

1. Точечная диаграмма
2. Фокусирующие диаграммы
3. Сканирование пятна рассеяния
4. Функция концентрации энергии
5. С.К.В. размеры пятна рассеяния
6. Функция рассеяния линии (ФРЛ)
7. Геометрическая Ч К X
8. Спектральные характеристики

Работа-GIA Grap-3 Menu 19:52 OPAL-PC

Edit

Номер пучка → 14

Смещение плоскости установки - .0000

Характеристики в пространстве Изображ. ←

Характеристики → Полихроматические ←

Количество точек на зрачке → 2884

Шаг по расфокусировке - .0000

Система-Пример оптической системы

Меню

1. Точечная диаграмма
2. Фокусирующие диаграммы
3. Сканирование пятна рассеяния
4. Функция концентрации энергии
5. С.К.В. размеры пятна рассеяния
6. Функция рассеяния линии (ФРЛ)
7. Геометрическая Ч К X
8. Спектральные характеристики

Работа-GIA Grap-3 Menu 19:52 OPAL-PC

Edit

Номер пучка → 14

Смещение плоскости установки - .0000

Характеристики в пространстве Изображ. ←

Характеристики → Полихроматические ←

Количество точек на зрачке → 11524

Шаг сканирования - .03308

Сканирование пятна рассеяния

Работа-GIA Text-1 Menu 19:54 OPAL-PC

Edit

Номер пучка → 14

Смещение плоскости установки - .0000

Характеристики в пространстве Изображ. ←

Характеристики → Полихроматические ←

Система-Пример оптической системы

Меню

1. Точечная диаграмма
2. Фокусирующие диаграммы
3. Сканирование пятна рассеяния
4. Функция концентрации энергии
5. С.К.В. размеры пятна рассеяния
6. Функция рассеяния линии (ФРЛ)
7. Геометрическая Ч К X
8. Спектральные характеристики

С.К.В. размеры пятна рассеяния

(мм)	$Y_{цэ}$	5.0000
$Y_{скв}$		-.121066
$Y_{скв}$.189525
$X_{скв}$.092981

Рис. 6.7. Окно «Edit»

Функция рассеяния линии ФРЛ представляет собой распределение интенсивности в изображении ОС бесконечно длинной линии в меридиональном или сагиттальном сечении (рис. 6.8). Все настройки стандартны для работы «Анализ геометрического изображения». Вывод возможен в графическом и текстовом режимах.

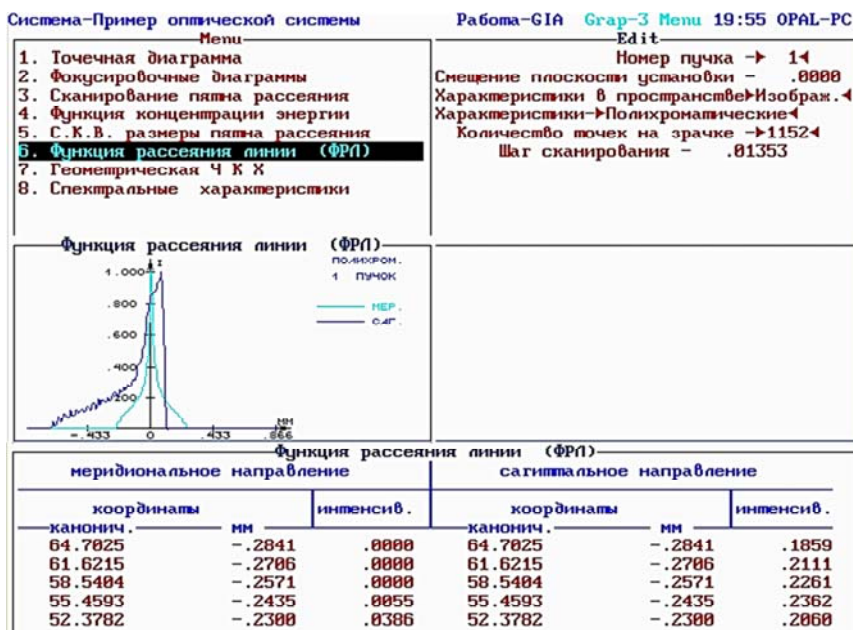


Рис. 6.8. Функция рассеяния линии

Спектральные характеристики. В окне «Edit» можно задать способ вычисления полихроматических характеристик и значения спектральной эффективности. Функция спектральной эффективности показывает «вес» данной длины волны в вычисляемой полихроматической характеристике. Для режима «Спектральный диапазон <непрерывный>» определяют максимальную и минимальную рабочую длину волны, которую задают в работе «Формирование». Если «Спектральный диапазон <дискретный>», то полихроматические характеристики определяются как средневзвешенные с весом, равным спектральной эффективности по заданным длинам волн.

Глава 2. СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

7. Теория коллиениарности и оптика Гаусса вдоль главного луча

7.1. Главные фокусные расстояния

В теории синтеза оптических систем рассматривается предметное пространство, расположенное в окрестностях главного луча, принятого за новую оптическую ось (ω и ω' – углы главного луча с осями OZ и $O'Z'$ в соответствующих пространствах). При этом элементы предмета dy и изображения dy' перпендикулярны осям OZ и $O'Z'$ и определяют линейное (поперечное) увеличение

$$\frac{dy'}{dy} = \beta.$$

Сопряженные точки H и H' , в которых $\beta = 1$, называются *главными*. Отрезки от главных точек H и H' до фокусов вдоль главного луча называются *главными фокусными расстояниями*: f ; f' .

Обозначим расстояния от фокусов до элементов предмета и изображения соответственно z и z' .

Тогда имеем выражение

$$-\beta = -\frac{dy'}{dy} = \frac{f}{z} = \frac{z'}{f'},$$

откуда получаем формулу Ньютона для главных фокусных расстояний:

$$zz' = ff'. \quad (7.1)$$

7.2. Угловое увеличение. Узловые фокусные расстояния

Главные фокусные расстояния отсчитываются от главных точек, величина их изменяется с изменением положения этих точек, завися-

ших от выбора системы координат. Узловые фокусные расстояния отсчитываются от узловых точек (точки отсчета, положение которых не зависит от системы координат).

Угловое увеличение равно отношению приращений углов главного луча с оптической осью:

$$\gamma = \frac{dw'}{dw} = \frac{z+f}{z'+f'} \cdot \frac{\cos w'}{\cos w}.$$

Имеем $z' = f' \cdot \beta$, далее используем формулу Ньютона (7.1).

$$\gamma = \frac{\frac{f \cdot f'}{z'} + f}{z' + f'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega} = \frac{f}{z'} \cdot \frac{f' + z'}{z' + f'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega} = \frac{f}{z'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega} = \frac{z}{f'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega}.$$

После преобразований получим рабочие формулы:

$$\begin{aligned} \gamma &= -\frac{f}{f' \cdot \beta} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega}, \\ \beta \gamma &= -\frac{f}{f'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega} = \text{const.} \end{aligned} \tag{7.2}$$

Линейное увеличение в узловых точках, когда $\gamma_N = 1$, будет равно $\beta_N = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{\cos \omega'}{\cos \omega}$.

Обозначим расстояния от фокусов до узловых точек через z_N и z'_N : Это и есть *узловые фокусные расстояния*:

$$\begin{aligned} z_N &= -\frac{f}{\beta_N} = \frac{f' \cos w}{\cos w'} = -\underline{f}; \\ z'_N &= -f' \beta_N = \frac{f \cos w'}{\cos w} = -\underline{f'}. \end{aligned} \tag{7.3}$$

Перемножая формулы (7.3), приходим к равенству, выражающему связь между главными и узловыми фокусными расстояниями.

$$\underline{f f'} = \underline{ff'} = \text{const.} \tag{7.4}$$

7.3. Инвариант Лагранжа – Гельмгольца

Развернем формулу (7.2) и выразим через элементарные приращения:

$$\frac{f'}{\cos \omega'} dy' d\omega' = -\frac{f}{\cos \omega} dy \cdot d\omega. \quad (7.5, a)$$

Формула (7.5, a) выражает инвариант Лагранжа – Гельмгольца через главные фокусные расстояния. Используя формулу (7.3), получим инвариант Лагранжа – Гельмгольца через узловые фокусные расстояния:

$$\frac{dy'}{f'} \cos \omega' d\omega' = -\frac{dy}{f} \cos \omega \cdot d\omega. \quad (7.5, б)$$

7.4. Меридиональный и сагиттальный инварианты Гульстранда – Юнга

Инварианты описывают узкий пучок лучей, проходящий через сферическую преломляющую поверхность.

Меридиональный инвариант Гульстранда – Юнга.

$$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'_m} - \frac{n' \cos \varepsilon'}{r} = \frac{n \cos^2 \varepsilon}{t_m} - \frac{n \cos \varepsilon}{r}. \quad (7.6)$$

Для малых углов падения, которые представляют собой параксиальную область, меридиональный инвариант Гульстранда – Юнга преобразуется в инвариант Аббе.

Сагиттальный инвариант Гульстранда – Юнга.

Положение сагиттального изображения определяется точкой пересечения преломленного луча с прямой, проходящей через предметную точку и центр преломляющей поверхности.

Для сагиттального пучка лучей инвариант имеет вид

$$\frac{n'}{t'_S} - \frac{n' \cos \varepsilon'}{r} = \frac{n}{t_S} - \frac{n \cos \varepsilon}{r}. \quad (7.7)$$

Выражения (7.6) и (7.7) позволяют получить *обобщенную формулу инварианта Гульстранда – Юнга*:

$$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'_m} - \frac{n \cos^2 \varepsilon}{t_m} = \frac{n'}{t'_S} - \frac{n}{t_S} = \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r}. \quad (7.8)$$

Разность $t'_S - t'_m$ называется *астигматической разностью*, или *астигматизмом*.

Если $t_m = t_S = -\infty$, то в этом случае отрезки t'_S и t'_m представляют собой задние фокусные расстояния астигматического пучка лучей.

8. Базовые (силовые) элементы

Понятия синтеза и композиции. Синтез – процесс соединения или объединения ранее разрозненных предметов или понятий в целое или набор; это понятие происходит от греческого слова «совмещение, помещение вместе».

Базовые элементы решают задачу обеспечения внешних требований (габариты, увеличение, поле зрения), создавая необходимую оптическую силу, то есть обеспечивая фокусное расстояние. Простейшие базовые элементы – одиночные линзы в воздухе. При создании базовых линз располагают 4 видами поверхностей: *a* – апланатической; *b* – близфокальной (вблизи изображения); *k* – концентричной (концентрична зрачку); *o* – плоской поверхностью.

Всего можно получить 16 сочетаний попарно, но практически применение нашли только 6.

8.1. Основные базовые элементы

Когда рассматривается работа базовых линз (рис. 8.1), ставятся условия исправления полевых аберраций (астигматизма, комы). Кривизна изображения исправляется коррекционно-силовыми элементами.

Введем обозначение «БЭ» – базовый элемент.

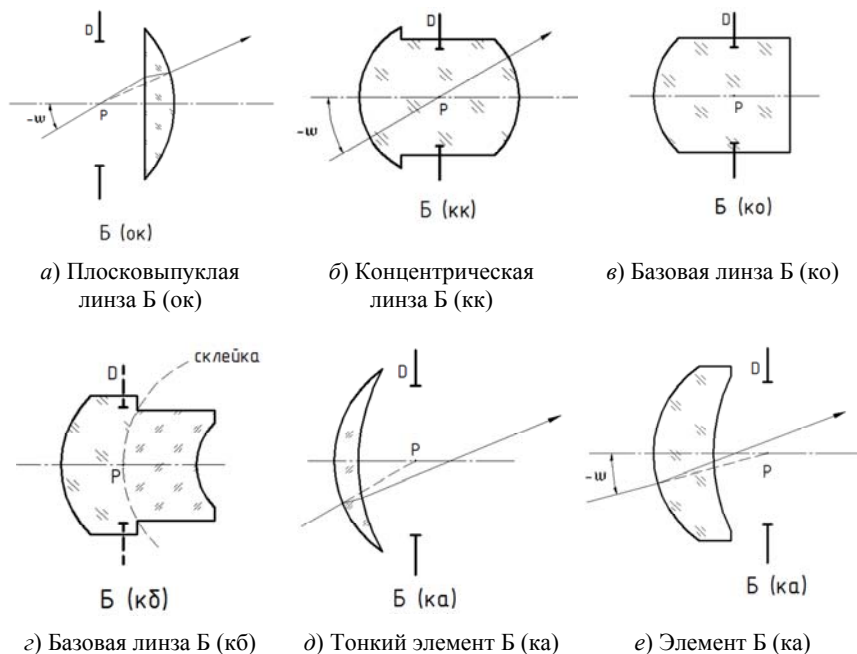


Рис. 8.1. Базовые элементы ОС

1. *Плоско-выпуклая линза Б (ок)*. Могут быть исправлены кома и астигматизм, когда вторая поверхность концентрична зрачку. В этом случае выходящий луч идет по нормали к поверхности. Сферическая aberrация отрицательна и сохраняет свое значение постоянным по всему полю зрения (рис. 8.1, а).

2. *Концентрическая линза Б (кк)*. Концентричность относительно входного зрачка. Астигматизм и кома исправлены, сферическая aberrация меньше, чем у Б (ок). Следовательно, этот базовый элемент выгодно использовать для развития светосилы. Кроме того, возможно исправление дисторсии (рис. 8.1, б).

3. *Концентрично-плоская линза Б (ко)*. Первая поверхность концентрична входному зрачку и полностью свободна от комы и астигматизма. Вторая поверхность может располагаться вблизи плоскости изображения, она вносит некоторый астигматизм, дисторсия отрицательна, но ее легко исправить, кома мала (рис. 8.1, в).

4. *Базовая линза Б (кб)*. Первая поверхность концентрична входному зрачку и полностью свободна от комы и астигматизма (рис. 8.1, з). Вторая поверхность выбирается таким образом, чтобы исправить кривизну изображения. Поэтому часто радиусы поверхностей равны $r_1 = r_2$. При исправленном астигматизме $S_{III} = 0$, условие исправления кривизны изображения (условие Петцваля):

$$S_{IV} = -\sum_1^2 \frac{\Delta v_S}{r_S} = 0, \quad (8.1)$$

где Δv_S – характеристика стекла (материала линзы).

Отрицательная сферическая aberrация легко исправляется скеленной поверхностью, концентричной первой поверхности. Возможно также исправление дисторсии.

5. *Базовый тонкий элемент Б (ка)* представлен на рис. 8.1, д.

Кривизну изображения исправляют за счет подбора радиусов кривизны. Сферическая aberrация значительна, астигматизм исправлен.

6. *Базовый элемент Б (ка)* – толстая линза. За счет равенства радиусов $r_1 = r_2$ устранена кривизна изображения. Из шести базовых элементов в Б (ка) – самая большая сферическая aberrация.

Если простые базовые элементы не обеспечивают достаточного силового эффекта, то их необходимо усложнять, вводя изопланатические элементы – апланатические или концентрические поверхности.

8.2. Коррекционно-силовые элементы оптических систем

Коррекционно-силовые элементы влияют на оптическую силу, то есть они могут исправлять кривизну изображения. Очевидно, что эти элементы не должны вносить ни астигматизма, ни комы. Поэтому они должны использовать такие же изопланатические поверхности, как и в базовых элементах.

Классификация элементов

1. *Линзы Смита*. Эти линзы близфокальные; расположены вблизи плоскости изображений. Обозначение – К (бо). На рис. 8.2 показано использование линзы Смита с плоско-выпуклой линзой.

К (бо) могут использоваться с базовыми элементами Б (ок), Б (кк), Б (ка).

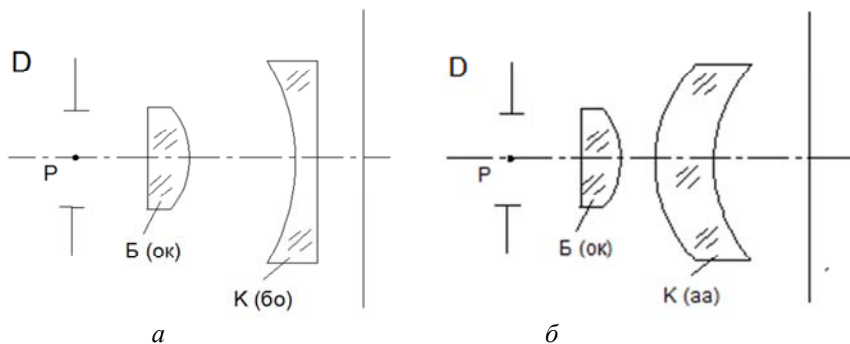


Рис. 8.2. Использование КС элементов:
a – линзы Смита; *б* – линзы К (aa)

2. *Биапланатическая линза К (aa)* – элемент требует расстояния между последней базовой поверхностью и плоскостью изображений. Система имеет вынесенный зрачок, поэтому можно исправлять дисторсию (рис. 8.2, б).

Биапланатическая линза К (aa) часто применяется с базовыми элементами Б (ок), Б (кк). Формула использования:

$$\begin{cases} \text{Б (ок)} + \text{К (aa)}; \\ \text{Б (кк)} + \text{К (aa)}. \end{cases}$$

3. *Концентрическая линза К (кк).*

Линза имеет две концентрические поверхности и используется с базовым элементом Б (ка). Имеем формулу использования:

$$\text{К (кк)} + \text{Б (ка)}.$$

Линзу нельзя использовать, когда поверхность изображения от предшествующей оптической системы концентрична центру выходного зрачка, то есть Б (ок) и Б (кк).

Для исправления кривизны поля этому коррекционно-силовому элементу необходимо придавать определенную оптическую силу. Ее параметры рассчитывают из выполнения условия Пецваля (условие исправления кривизны изображения при откорректированном астигматизме):

$$\begin{cases} S_{III} = 0; \\ S_{IV} = 0. \end{cases}$$

Такие условия выполняются варьированием одного из радиусов. При этом варьирование может влиять на сферическую aberrацию, не затрагивая исправление астигматизма и комы, в таком случае исправляются четыре основные монохроматические aberrации.

4. *Плоско-вогнутые линзы К (ок) – модификация 3-го класса.* Формулы использования: К (ок) + Б (ка); К (ко) + Б (ка). При отходе от concentричности одной поверхности мы лишаемся возможности свободно варьировать сферической aberrацией. Ее исправление возможно подбором показателей преломления.

Не выходя из рамок двухлинзовой системы, можно для всех базовых элементов решить задачу исправления сферической aberrации, вводом нормальной склейки. Практически во всех вариантах остаточные отрицательные сферические aberrации исправляют вводом нормальной склейки.

9. Коррекционные элементы

9.1. Компенсаторы зеркально-линзовых систем

Компенсатор – узел, служащий для исправления aberrации БЭ без изменения оптической силы и положения изображения. Его рассчитывают как тонкую линзу, которая отождествляется с деформированной волновой поверхностью. Линзовые компенсаторы можно разделить на афокальные и ахроматические компенсаторы.

Примеры компенсаторов: коррекционная пластинка Шмидта; двухлинзовые компенсаторы, установленные в параллельных или сходящихся пучках; компенсатор меридиональной комы В.Н. Чуриловского.

Неафокальные компенсаторы – мениск Д.Д. Максутова; линзовые компоненты с отражающей поверхностью (линза Манжена, склеенный и несклеенный компоненты-отражатели) и компенсатор кривизны поля – линза Смита.

Мениск Д.Д. Максутова свободен от хроматизма в широкой области спектра (апохроматическая коррекция). Мениск обладает небольшой отрицательной силой и положительной сферической аберрацией. Оптическая сила равна:

$$\Phi_M = \frac{n-1}{n+1} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (9.1)$$

Поэтому используется с вогнутым сферическим зеркалом.

Расстояние между центрами обеих поверхностей мениска велико и равно:

$$r_2 - r_1 + d = \frac{d}{n^2} = k. \quad (9.2)$$

Благодаря этому можно, располагая материальную (апертурную) диафрагму вблизи этих центров, избежать возникновения большого астигматизма и комы. Изменяя соотношение радиусов и толщину мениска, можно варьировать его сферической аберрацией: представляется возможным корригировать отрицательную сферическую аберрацию зеркала, практически не затрагивая других аберраций системы. Исправление сферической аберрации осуществляется для какой-то одной высоты апертурного луча осевого пучка. Этим ограничивается возможное развитие относительного отверстия в зеркально-линзовых системах подобного рода.

Компенсатор афокальный. Применять его в сходящемся пучке после главного зеркала имеет смысл только, если его аберрация уже исправлена путем применения асферической поверхности.

Двухлинзовый компенсатор может менять свою форму (рис. 9.1, а).

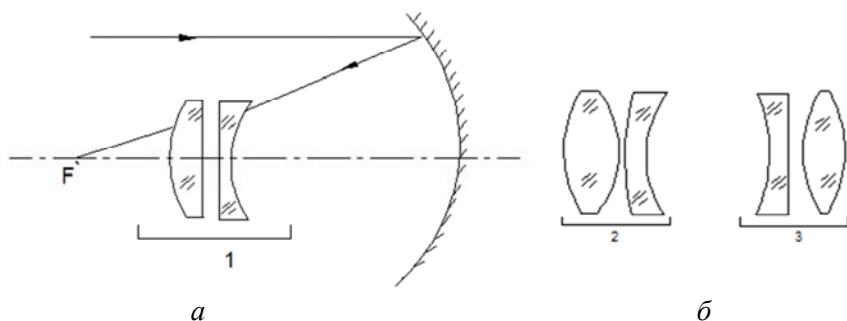


Рис. 9.1. Использование двухлинзового компенсатора в сходящемся пучке:
а – базовая схема; *б* – варианты компенсаторов

Компенсатор – толстая плоскопараллельная пластинка.

Сферическое зеркало обладает отрицательной сферической аберрацией, плоскопараллельная пластинка (ППП), наоборот, имеет положительную сферическую аберрацию. Поэтому, сочетая сферическое зеркало с ППП определенной толщины, можно осуществить взаимную компенсацию сферической аберрации. Отметим, что сферическая аберрация $\Delta S'$ зависит от показателя преломления. Используется стекло: СТК 19, ТФ 10, СТФ 1. При этом волновая аберрация $\Delta l < 0,1\lambda$.

На рис. 9.2 показано использование ППП в параллельном и сходящемся пучках одновременно.

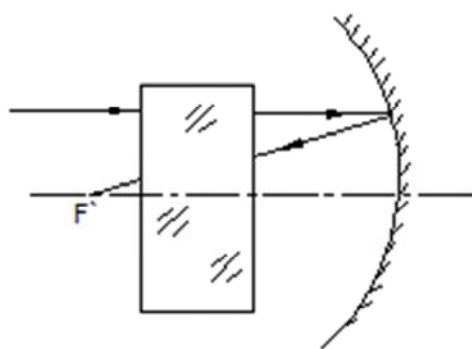


Рис. 9.2. Использование ППП в параллельном и сходящемся пучке

Обычно стремятся откорректировать (выполнить компенсацию) сферической аберрации в средней зоне входного зрачка. При этом возможно развить большое относительное отверстие и получить светосильную систему, где относительное отверстие порядка 1:1. Базовую схему с ППП можно усложнять, используя мениски или толстые линзы (размещают после ППП положительную линзу с конфокальной поверхностью; вырезают воздушные конфокальные линзы из ППП и др.).

9.2. Аномальные и нормальные склейки. Ориентация и использование склеек для коррекции астигматизма

Склеенные поверхности разделяют среды, показатели преломления которых близки друг к другу.

Так, для склеек разница показателей преломления для граничащих сред составляет $\Delta n = 0,1 \div 0,2$. На границе раздела стекло-воздух: $\Delta n = 0,5 \div 0,7$.

Астигматизм склейки

Для расчета астигматизма используется инвариант Гульстранда – Юнга (7.8).

При малых разностях показателей преломления Δn будет малая разность углов падения и преломления луча $\varepsilon' = \varepsilon + \Delta\varepsilon$, поэтому имеет смысл определять меридиональную и сагиттальную оптические силы склеенной поверхности:

$$\Phi_t = \frac{n'}{t'} - \frac{n}{t} \quad \text{и} \quad \Phi_s = \frac{n'}{s'} - \frac{n}{s}. \quad (9.3)$$

Из выражения закона преломления для склейки получим соотношение:

$$\Delta n \sin \varepsilon = -n \cos \varepsilon \Delta\varepsilon;$$

$$\Delta\varepsilon = -\frac{\Delta n}{n} \operatorname{tg} \varepsilon.$$

Используя инвариант (9.3), можно получить выражение:

$$\Phi_t \cos^2 \varepsilon = \frac{\Delta n}{r \cos \varepsilon} = \Phi_s. \quad (9.4)$$

При малых углах $\varepsilon = \varepsilon' = 0$ рассчитывается оптическая сила поверхности склейки на оси

$$\Phi_o = \Phi_s = \Phi_t = \frac{\Delta n}{r}. \quad (9.5)$$

Тогда имеем соотношение, определяющее связь оптических сил:

$$\Phi_t = \frac{\Phi_o}{\cos^3 \varepsilon}; \quad \Phi_s = \frac{\Phi_o}{\cos \varepsilon}. \quad (9.6)$$

С ростом углов преломления оптические силы (меридиональные и сагиттальные) будут быстро возрастать по отношению к силе на оси, что видно из графиков, представленных на рис. 9.3.

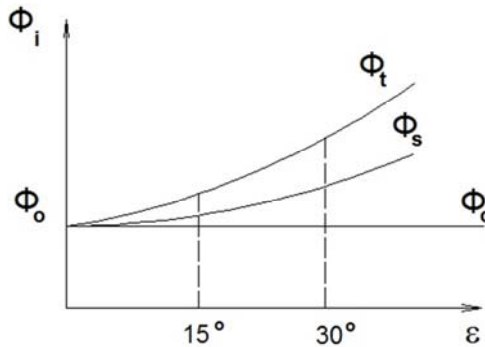


Рис. 9.3. Зависимость сил поверхности склейки от угла падения

Ориентировка склеенной поверхности устанавливает связь между углом падения ε и углом поля зрения.

Склейка обратной ориентировки (обращение преломляющей поверхности выпуклой стороной к зрачку):

$$\frac{s_p}{r} < 0; \quad |\sin \varepsilon| > |\sin \omega|.$$

Склейка прямой ориентировки (обращение преломляющей поверхности вогнутой стороной к зрачку): $0 < \frac{S_p}{r} < 2$; $|\sin \varepsilon| < |\sin \omega|$ – склейка значительно удалена от зрачка. Случай, когда $\frac{S_p}{r} > 2$; $|\sin \varepsilon| > |\sin \omega|$ дает склейку прямой ориентировки.

Нормальная склейка – склейка с отрицательной оптической силой по оси. Когда $\varepsilon' > \varepsilon$; $\Delta\varepsilon > 0$.

Аномальная склейка – склейка с положительной оптической силой по оси. $\Phi_0 > 0$; $\varepsilon' < \varepsilon$; $\Delta\varepsilon < 0$; $r > 0$.

Обратная ориентировка (рис. 9.4, а):

1. $n_1 > n_2$; $\Phi_0 < 0$ – нормальная склейка;
2. $n_1 < n_2$; $\Phi_0 > 0$ – аномальная склейка.

Прямая ориентировка (рис. 9.4, б):

1. $n_1 > n_2$; $\Phi_0 > 0$ – нормальная склейка прямой ориентировки;
2. $n_1 < n_2$; $\Phi_0 < 0$ – аномальная склейка прямой ориентировки.

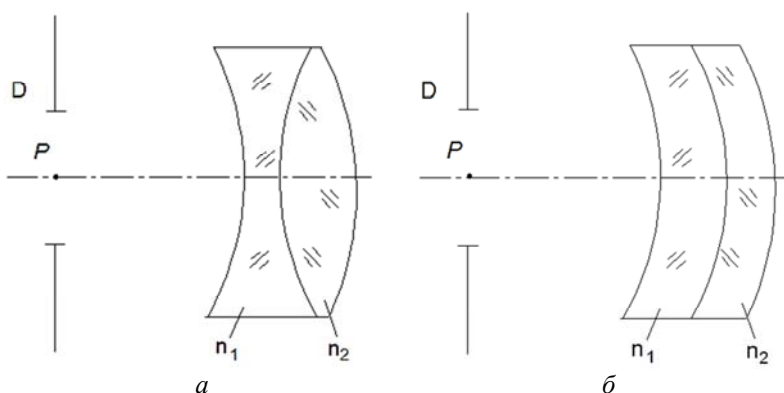


Рис. 9.4. Склейка:
а – обратной; б – прямой ориентировки

Пример введения склеенной поверхности.

Составим алгоритм моделирования склейки.

1. Введем склейку в анастигматическую линзу первого рода (базовая линза), представленную на рис. 9.5, а.

2. При больших полевых углах необходимо убрать астигматизм (рис. 9.5, б) и, особенно, положительную кривизну, не трогая исправления астигматизма при малых углах. При этом необходима аномальная склейка обратной ориентации (ас). Она способствует устранению положительного астигматизма высших порядков.

3. Такая склейка перемещает анастигматический зрачок до выхода его из мениска, следовательно, возможно составление симметричной системы из двух менисков.

4. Сферическая aberrация $\Delta S' < 0$ (рис. 9.5, в). Следовательно, для исправления необходима склейка с отрицательной оптической силой $\Phi_0 < 0$, то есть необходима нормальная склейка (нс).

5. При соблюдении прямой ориентации исключается влияние на астигматизм.

6. Таким образом, получаем систему уже исправленную на астигматизм и сферическую aberrацию (рис. 9.5, г).

7. Кому можно исправить составлением симметричной конструкции из двух склеенных линз.

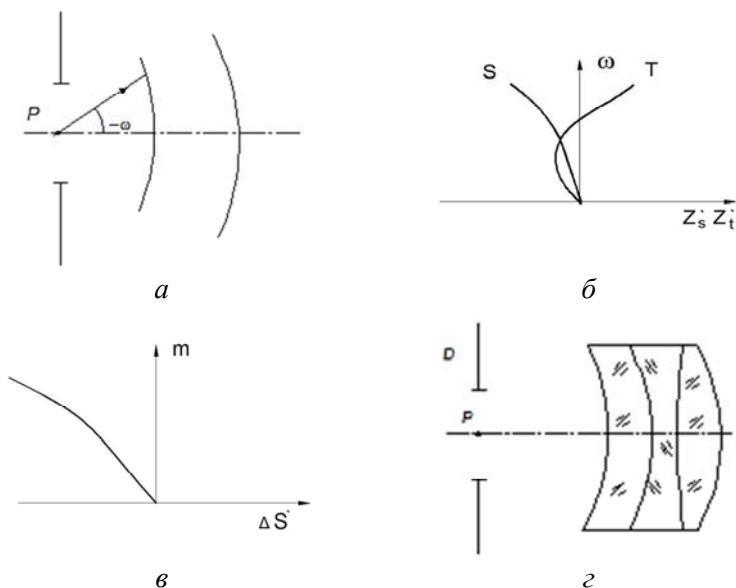


Рис. 9.5. Составление базового модуля для анастигмата:

а – базовая линза; б – график астигматизма; в – график сферической aberrации; г – анастигматическая склеенная линза

9.3. Апланатические поверхности

Апланатическая поверхность – оптическая поверхность, при преломлении или отражении от которой световой пучок не испытывает абберационных искажений. В апланатических точках нет ни комы, ни астигматизма. Любой луч идущий в точку A попадет в сопряженную точку A' (рис. 9.6).

Первая пара апланатических точек: <i>точки в вершине поверхности</i> (рис. 9.7, а)	1. Если $\sigma = \varepsilon$, $S' = S = 0$.
Вторая пара апланатических точек: <i>концентрические точки</i> (рис. 9.7, б)	2. Если $\varepsilon = \varepsilon' = 0$, то $\sigma' = \sigma$; $S = S' = r$; $\frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'} = 1 = \text{const.}$
Третья пара апланатических точек (рис. 9.7, в): $S = r \frac{n + n'}{n} = r + r \frac{n'}{n}$; $S' = r \frac{n + n'}{n'} = r + r \frac{n}{n'}$	3. Если $\sigma = -\varepsilon'$, то $\sigma' = -\varepsilon$, $\frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'} = \frac{n}{n'} = \text{const.}$

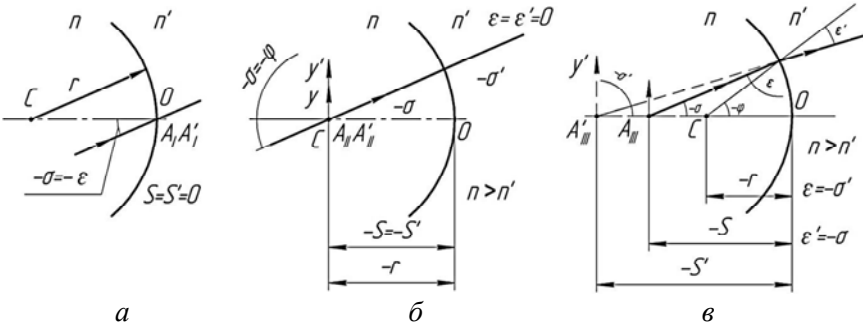


Рис. 9.6. Расположение трех пар апланатических точек

Биапланатическая линза – линза, состоящая из двух апланатических поверхностей с разными радиусами. Построение биапланатической линзы возможно осуществить *графо-аналитическим методом*. Построение для одной поверхности производится для внеосевых точек и показано на рис. 9.7.

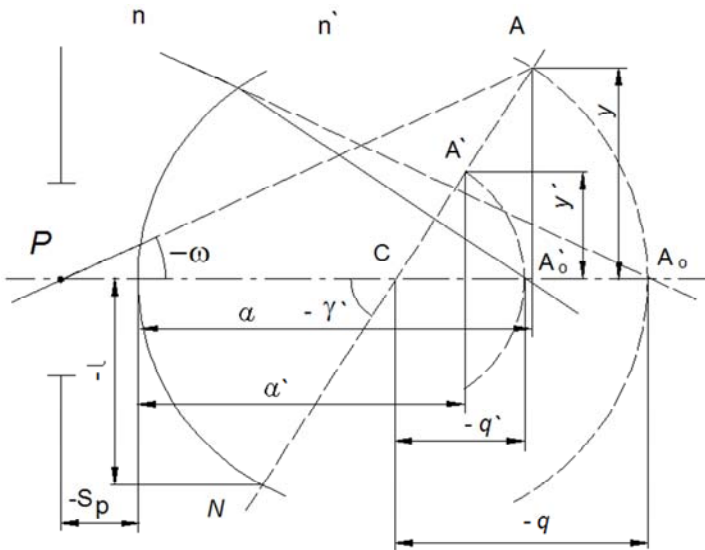


Рис. 9.7. Графоаналитический метод построения апланатической поверхности для внеосевой точки

Имеем алгоритм для построения:

1. $n_1 = n_3 = 1$;
2. $h_1 = -\frac{1}{n} y$; $h_2 = -ny' = -\frac{1}{n} y$;
3. $C_1 C_2 = k$;
4. $y' = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 y$; $y'' = \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 y' = y$.

В апланатической внеосевой точке линейное увеличение равно единице $\beta = 1$, поэтому $y'' = y$. Но в точке на оси $\beta_0 \neq 1$, следовательно, на оси биапланатическая линза обладает некоторой дисторсией. Линза исправлена на сферическую aberrацию.

При наличии разных радиусов, кривизна поля изображения не равна нулю, следовательно, такая биапланатическая линза будет являться средством для исправления кривизны изображения базовых систем).

Глава 3. КОМПОЗИЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

10. Светосильные объективы

Быстрое увеличение числа композиций, обеспечивающих устранение требуемых aberrаций, при увеличении числа линз в этих системах представляет известные затруднения.

Поэтому, чтобы избежать изучения малоперспективных оптических систем, остановимся на ряде основных конструктивных схем, достаточно хорошо зарекомендовавших себя на практике.

10.1. Двойные склеенные анастигматы

Двойные склеенные анастигматы – группа объективов симметричного типа.

В базовых линзах 2Б (анI) при соблюдении условия Петцваля ближнее положение анастигматического зрачка углубляется внутрь линзы, делая невозможным составление симметричной системы. Вводя в такие анастигматические линзы аномальные склеенные поверхности с обратной ориентировкой, способствующие устранению положительного астигматизма высшего порядка (или отрицательного астигматизма в средней части поля), наблюдаем тенденцию к некоторому удалению ближнего положения анастигматического зрачка, вплоть до его выхода из тела мениска. Это делает возможным составление симметричной системы из двух таких менисков с аномальными склейками, исправленной на астигматизм, кому и кривизну поля. Для устранения отрицательной сферической aberrации вводят в мениски (анI) нормальные склейки, обладающие положительной сферической aberrацией при соблюдении прямой ориентировки, что исключает влияние нормальной склейки на исправление астигматизма.

Подобного рода мениски с двумя склейками составляют группу симметричных двойных склеенных анастигматов. Такие объективы (рис. 10.1 и 10.2) могут быть зашифрованы в виде

$$2Б(ан_1 + \overline{нс} + \overline{ас}) \text{ или } 2Б(ан_1 + \overline{ас} + \overline{нс}),$$

Стрелка вверх указывает на ориентировку поверхности; стрелка, направленная влево, определяет *прямую ориентировку*, и стрелка, направленная вправо, – *обратную ориентировку* склеенной поверхности.

Для *нормальной склейки*, обладающей отрицательной оптической силой, при прямой ориентировке меньший показатель преломления должен быть у среды, расположенной с вогнутой стороны преломляющей поверхности, и при выбранной прямой ориентировке будет у среды, расположенной слева от преломляющей поверхности (если рассматривать заднюю половину объектива).

У *аномальной склейки* с положительной оптической силой меньший из показателей преломления должен быть у среды, расположенной с выпуклой стороны поверхности, и при обратной ориентировке он тоже будет расположен слева.

Таким образом, при любом положении склеек друг относительно друга всегда будет наблюдаться рост показателя преломления по мере удаления от материальной диафрагмы – так называемое *правило Рудольфа*.

Одним из примеров симметричной системы, составленной из менисков с двумя склейками, является объектив «Дагор» (рис. 10.1) $f' = 103,5$; $S'_f = 94,84$. Конструктивные данные его передней половинки приведены ниже:

$r_1 = 21,33$	$d_1 = 3,0$	$n_2 = 1,616$
$r_2 = -35,56$	$d_2 = 0,9$	$n_3 = 1,542$
$r_3 = 8,6$	$d_3 = 2,5$	$n_4 = 1,510$
$r_4 = 21,46$	$d_4/2 = 2,7$	

Другим примером подобной симметричной системы в соответствии с приведенным выше вторым шифром является объектив «Двойной Протар» Рудольфа (рис. 10.2) $f' = 99,87$; $S'_f = 94,02$.

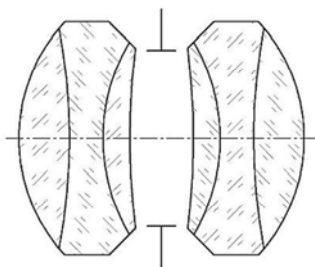


Рис. 10.1. Объектив «Дагор»

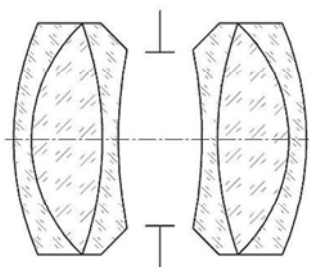


Рис. 10.2. Объектив «Двойной протар»

10.2. Двойные четырехлинзовые анастигматы

Конструкции двойных четырехлинзовых анастигматов являются оригинальными системами, в которых используются два различных приема компоновки.

Для систем подобного рода характерно устранение комы и других нечетных aberrаций за счет использования симметрии или пропорциональности двух половинок: при создании половинки симметричного объектива отпадает необходимость исправления в ней комы (наоборот, желательно иметь в такой половинке значительную кому, так как варьируя величину расстояния до материальной диафрагмы, можно осуществлять исправление астигматизма (получить анастигмат), не затрагивая коррекции других aberrаций).

Подбором сил линз, входящих в половинку анастигмата, исправляют кривизну изображения (выполнение условия Петцваля).

Остается решить последнюю задачу – исправление сферической aberrации. Известно, что в компенсационных системах, построенных из двух тонких линз, при фиксированном положении диафрагмы возможно устранение 3-х aberrаций – астигматизма, комы и кривизны поверхности изображения. Ее целесообразно использовать как базовую в качестве половинки симметричного объектива, aberrационная коррекция которой сводится к исправлению сферической aberrации в системе из двух тонких линз с *равными оптическими силами* (по абсолютной величине) за счет использования двух коррекционных параметров – прогибов обеих линз.

Условие устранения сферической aberrации – уравнение, связывающее две переменные и определяющее собой некоторую плоскую кривую.

Выявим общий характер изменений прогибов, необходимых для исправления сферической aberrации.

Вспользуемся следующим выражением для первой суммы Зейделя:

$$S_1^* = \sum \left(\frac{h_K}{h_1} \right)^4 \left(Q_{sk}^2 \Delta_K \frac{1}{ns} + k_{\text{л}} \right),$$

определяющей собой коэффициент сферической aberrации. Выражение неудобно для практического использования; введем переменные Ланге – высоты h_K в выражения Q_{sk} и Δ_K/ns .

$$h_K Q_{sk} = n_K \left(\frac{h_K}{r_K} - \frac{h_K}{s_K} \right) = n_K \left(\frac{n_{K+1} \alpha_{K+1} - n_K \alpha_K}{n_{K+1} - n_K} - \alpha_K \right)$$

или

$$h_K Q_{sk} = \frac{n \cdot n_{K+1}}{n_{K+1} - n_K} (\alpha_{K+1} - \alpha_K).$$

Полагая, что для обеих линз показатели преломления одинаковы, найдем оптические силы, определяемые для тонкой линзы нечетными углами α .

$$\Phi_1 = \frac{\alpha_3 - \alpha_1}{h_1}; \quad \Phi_{11} = \frac{\alpha_5 - \alpha_3}{h_{11}} = -\Phi_1.$$

Так как величина α_1 для половинки ОС должно быть равно нулю, а величина угла $\alpha_5 = 1$ и высоты h_1 и h_{11} связываются через величину воздушного промежутка d , то при выбранном Φ_1 или d однозначно определяется величина

$$\alpha_3 = \Phi_1.$$

Четные углы α определяют прогибы обеих линз.

Получим квадратное уравнение, связывающее между собой величины α_2 и α_4 , которое является уравнением гиперболы. При отрицательном α_3 , когда первая линза имеет отрицательную силу, действительная ось гиперболы будет параллельной оси α_2 . Когда угол α_3 положительный, ось гиперболы параллельна оси α_4 .

Полагая для половинки системы $f' = 1$; $h_1 = 1$; $\alpha_5 = 1$, будем иметь формулу

$$\frac{1 - \alpha_3}{1 - \alpha_3 d} = -\alpha_3,$$

откуда

$$1 - \alpha_3 = -\alpha_3 + \alpha_3^2 d.$$

В частном случае, полагая величину d равной 0,1 фокусного расстояния, находим величину угла α_3 :

$$\alpha_3 = \pm \sqrt{1/d}, \quad \alpha_3 = \pm \sqrt{10} = \pm 3,16.$$

Для этих значений α_3 получены кривые, связывающие величины углов α_2 и α_4 (рис. 10.3). Точки этих кривых определяют собой равенство нулю сферической аберрации третьего порядка.

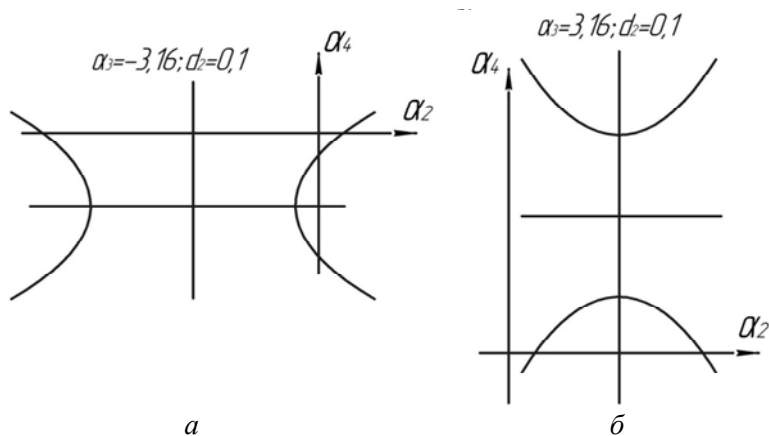


Рис. 10.3. График областей устранения сферической аберрации у двух тонких линз в воздухе:
 а – первая линза отрицательная; б – первая линза положительная

Реальная сферическая аберрация в точках гипербол будет несколько отличаться от нуля. Путем изменения углов α_2 или α_4 можно получить точки, в которых она исправлена. Совокупность этих точек даст кривые, несколько деформированные относительно гипербол, определявших равенство нулю сферической аберрации 3-го порядка.

Пользуясь этими кривыми, можно для различных пар значений α_2 и α_4 находить положения анастигматических зрачков и, ограничиваясь небольшими отрицательными значениями отрезков, определить три типа половинок, состоящих из двух тонких линз с исправленным астигматизмом, кривизной поля и сферической аберрацией. Двум типам двухлинзовых половинок соответствуют точки, расположенные на двух ветвях гиперболы, получающейся при отрицательных передних линзах. Их шифры:

$$К (т, м) + Б (т, м); \quad К (т, д) + Б (т, д),$$

где буквой «м» обозначены тонкие линзы менискообразной формы и буквой «д» – линзы двояковогнутой и двояковыпуклой форм.

Двойные анастигматы, построенные на основе этих половинок, будут иметь следующий шифр:

$$2[K(t, m) + B(t, m)]; 2[K(t, d) + B(t, d)].$$

Анастигматы, построенные с использованием тонких линз менискообразной формы, известны под наименованием объективов типа Гаусса (рис. 10.4); они смыкаются с объективами типа

$$2[B(\text{анII}) + K(\text{кк})].$$

Симметричные объективы, построенные на основе использования линз двояковыпуклой и двояковогнутой форм, известны под названием объективов «Догмар» или «Целор» (рис. 10.5).

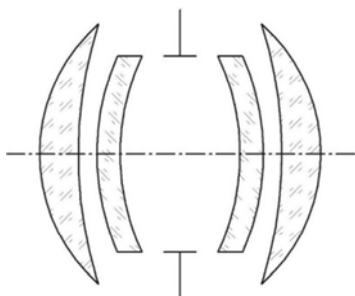


Рис. 10.4. Объектив типа Гаусса

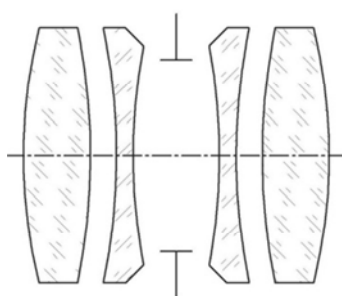


Рис. 10.5. Объектив «Догмар»

Половинки, составленные из первой положительной и второй отрицательной линз, можно зашифровать в виде $B(t, m) + K(t, m)$; на их основе получаются симметричные объективы, имеющие следующий шифр: $2[B(t, m) + K(t, m)]$. Они смыкаются с ОС типа $B[k, -2K(\text{та11}), k]$ и при дальнейшей разработке приводят к объективам «Руссар-29».

10.3. Объективы типа «Плазmat», «Гелиос», объектив Петцваля

Объектив типа «Плазmat» (рис. 10.6) имеет симметричную конструкцию с двумя коррекционными концентрическими линзами, которые расположены по обе стороны от базовых анастигматических менисков. Шифр этого объектива – $2[B(\text{анI}) + K(k, \text{ас}, k)]$.

Внутри концентрических менисков вводятся аномальные склейки (ас), которые обладают отрицательными высшими порядками анастигматизма, что увеличивает отрицательную меридиональную

сферическую aberrацию. Необходимо использовать геометрическое виньетирование либо ограниченное поле зрения.

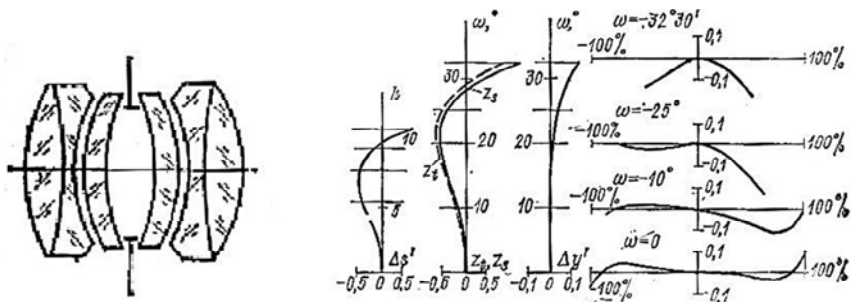


Рис. 10.6. Объектив «Ортометар» (типа «Плазмат»)

Объектив типа «Планар» (рис. 10.7). Схема была предложена П. Рудольфом; наиболее распространена в фотографии. «Планар» – универсальный объектив повышенных возможностей, состоящий из четырех компонентов (из них два внутренних склеенных), расположенных симметрично относительно плоской диафрагмы. Отечественным аналогом является объектив типа «Гелиос», применяемый, главным образом, в фотографических и киносъемочных аппаратах, а также в репродукционных объективах и телевизионных системах. Шифр объектива – Б (ка) + 2К (анII, хс) + Б (ак).

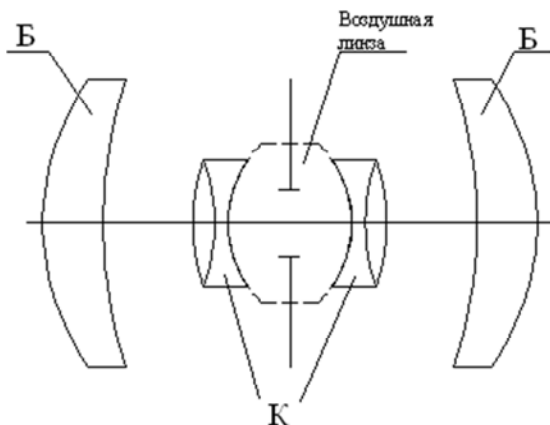


Рис. 10.7. Объектив типа «Планар»

Хроматическая склейка служит для исправления хроматизма положения.

В исходных базовых линзах присутствует отрицательная сферическая aberrация. Для компенсации aberrации вводится воздушная линза с отрицательной оптической силой, образованная вогнутыми поверхностями коррекционных элементов, расположенных вблизи диафрагмы и обладающая положительной сферической aberrацией.

Объектив Петцваля – двухкомпонентная система, разделенная большим воздушным промежутком (рис. 10.8).

В нем невозможно исправить кривизну поля (изображения). Поэтому ставят только одно условие – исправление астигматизма (из полевых aberrаций) для получения анастигмата.

Шифр – Б (т, нс) + Б (т, нс).

Расклеенный элемент обладает дополнительным коррекционным параметром: способствует устранению сферических aberrаций высших порядков. Такие схемы могут быть использованы в микроскопии в качестве микрообъектива небольшого увеличения или в конструкции микрообъективов с широкими апертурами в качестве коррекционных силовых элементов.

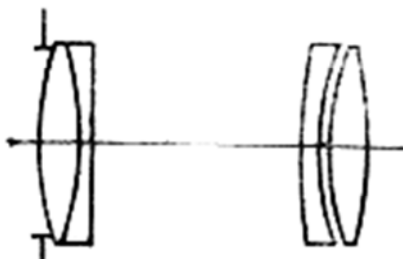


Рис. 10.8. Объектив Петцваля

Объектив типа «Гелиос» представляет собой анастигмат, обеспечивающий высокое качество изображения в пределах всего поля зрения. Состоит из 4 или 5-ти компонентов (6 линз) апертурная диафрагма расположена между 3-й и 4-й линзами (рис. 10.9). Склейки служат для исправления хроматизма положения. К недостатку схемы можно отнести отрицательную сферическую aberrацию положительных линз. Ее устраняют, располагая анастигматические поверхности менисков вблизи материальной диафрагмы, – образуется

воздушная отрицательная линза, которая создает положительную сферическую aberrацию.

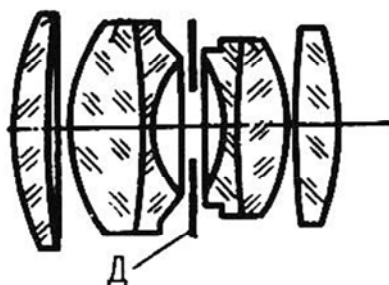


Рис. 10.9. Схема объектива «Гелиос»

11. Широкоугольные объективы

Создание широкоугольных систем наиболее сложная задача, так как при увеличении поля зрения идет увеличение полевых aberrаций и уменьшение освещенности, которая для внеосевой точки поля равна

$$E'_w = E'_0 K_w \cos^4 w.$$

Функция светораспределения

$$\Phi = \frac{E'_w}{E'_0} = K_w \cdot \cos^4 \omega.$$

Из-за резкого спада освещенности по полю (пропорциональность 4-й степени косинуса угла поля зрения) невозможно вводить геометрическое виньетирование, которое используется для уменьшения кружка рассеяния в широких внеосевых пучках.

Основная задача расчетчика – корригировать все aberrации широкого наклонного пучка:

устранение нечетных aberrаций (кома, дисторсия, хроматизм увеличения) решается за счет симметричных или пропорциональных конструкций;

четные aberrации (кривизна поля, астигматизм, меридиональная и сагиттальная сферическая aberrация широкого пучка) исправляют различными приемами.

К примеру, борьба с астигматизмом и кривизной поля решается при помощи аномальных склеек.

Наибольшую трудность представляет собой полевая асферическая aberrация (одна из трех составляющих поперечной aberrации широкого внеосевого пучка; две другие – астигматизм и кома).

Меридиональную сферическую aberrацию широкого внеосевого пучка исправляют введением базовых элементов, concentрических линз.

11.1. Широкоугольный объектив «Лиар»

Схема объектива представлена на рис. 11.1. Шифр объектива: К (о,к) + 2Б (к,к) + К (т,ан).

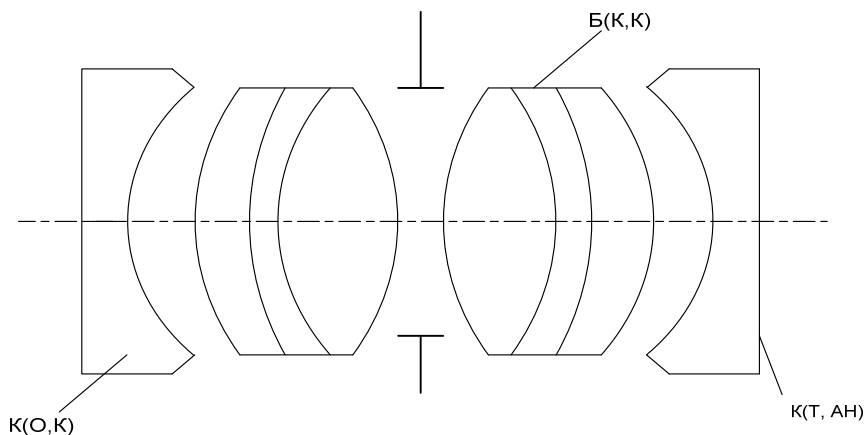


Рис. 11.1. Широкоугольный объектив «Лиар»

Отрицательная линза (первая) развивает поле зрения. Вторая линза (concentрическая) нужна для компенсации aberrаций. Плоские поверхности не вносят ни комы, ни астигматизма, ни кривизны поля, но возможно возникновение отрицательной дисторсии на таких плоскостях.

11.2. Широкоугольный зеркально-линзовый объектив

Одной из особенностей работы зеркальной асферической поверхности является возможность устранения астигматизма при расположении входного зрачка в одном из геометрических фокусов меридиональной кривой второго порядка. При отражении лучей сохраняется равенство углов падения и отражения, то есть точки отражения главного луча можно рассматривать как узловые точки. Теми же свойствами обладают концентрические поверхности. Отметим, что концентрические линзы и отражательные поверхности будут строго свободны от хроматизма увеличения.

Развертку зеркальных вогнутых поверхностей рассматривают как положительные зеркальные линзы, отличающиеся тем, что создаваемая ими кривизна поверхности изображения при положительной силе является положительной. Поэтому сочетая зеркальную линзу с концентрической системой, обладающей при положительной силе отрицательной кривизной, получим потенциальную возможность устранения кривизны поля для заданного полевого угла (угла поля зрения).

В широкоугольных зеркально-линзовых объективах применяются: отражающие поверхности 2-го порядка (они являются анастигматическими, когда зрачки совмещаются с геометрическими фокусами кривых);

концентрические поверхности (свободны от астигматизма, когда главный луч проходит через общий центр кривизны этих поверхностей).

Базовая схема сочетает эллиптическое зеркало и концентрическую линзу. Возможно введение плоского зеркала с отверстием, совпадающим с входным зрачком. Ее можно применять в качестве исходной и строить симметричную конструкцию с устранением нечетных aberrаций. Эллиптическая поверхность не скорректирована на кому и дисторсию.

11.3. Объектив Руссар

Построен по принципу объектива Гаусса. Шифр объектива: $2[\bar{b}(\text{анII} + \text{K}(\kappa, \kappa))]$. Угловое поле порядка 100 градусов. Дальнейшее развитие этой схемы привело к созданию новых объективов:

Б[к – 2К(таII) К]. Кроме того, внутрь базовых линз можно вводить аномальные склейки, которыми исправляют астигматизм.

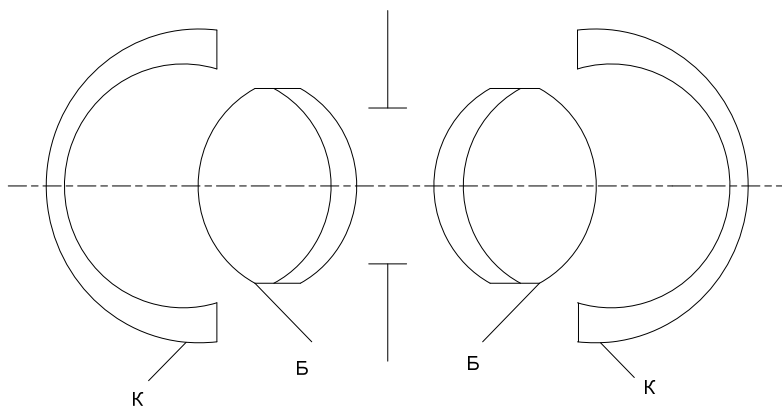


Рис. 11.2. Широкоугольный объектив Руссар

Такие принципиально новые схемы объективов обладают положительным виньетированием (абберационным), что улучшает функцию светораспределения (пропорциональность 3-й степени косинуса угла поля зрения): $\Phi \approx \cos^3 \omega$.

На основе этих идей создана большая серия объективов типа Руссар. Далее использовалось:

- 1) усложнение компоновки;
- 2) разделение коррекционных отрицательных менисков, которое аналогично введению в первоначально коррекционную линзу двух пар воздушных телеконцентрических линз;

Уменьшение aberrаций способствует повышению относительного отверстия и улучшению качества изображения. Вторые и третьи компоновки вносят дополнительное виньетирование для углового поля зрения $2\omega = 120^\circ$.

12. Микрообъективы

12.1. Особенности и методы расчета микрообъективов

Микрообъектив является наиболее ответственным узлом микроскопа, так как от его числовой апертуры и коррекции aberrаций за-

висят разрешающая способность и качество изображения. Основные трудности расчета микрообъективов:

- 1) необходимость исправления aberrации осевого пучка (сферическая и хроматизм положения);
- 2) обеспечение большого значения числовой апертуры A в пространстве предметов для получения хорошего разрешения;
- 3) коррекция полевых aberrаций (кривизна поля, астигматизм и кома).

Если микрообъектив не обеспечивает высокое качество изображения, то используются компенсационные окуляры.

Методы расчета объективов микроскопа

Метод проб:

выбирается базовый модуль (аналог) с возможно близкими оптическими характеристиками к рассчитываемому объективу, изучается влияние изменения конструктивных элементов на aberrации и оптические характеристики;

находят новые значения конструктивных элементов путем интерполяции или экстраполяции;

производят контрольные расчеты хода лучей и выясняется действительное состояние коррекции.

Операции повторяют несколько раз до получения удовлетворительного решения. Метод достаточно эффективен, когда исходный объектив близок к рассчитываемой ОС.

Алгебраический метод эффективен для расчета схемы из тонких компонентов в области aberrаций 3-го порядка; используется при расчете объективов небольшой числовой апертуры и линейного увеличения: оптическая схема обычно состоит из двух компонентов.

Комбинированный метод дает рациональное сочетание алгебраического и метода проб (алгебраический используют в начале для коррекции aberrаций 3-го порядка, а метод проб – для коррекции остаточных aberrаций высшего порядка)

Метод расчета в концепции двухступенчатой оптики (ДО): на первом этапе каждую ступень рассчитывают отдельно при соблюдении заданных оптических характеристик (линейное увеличение, фокусное расстояние, числовая апертура, величина поля зрения, длина тубуса, рабочее расстояние); для соединения ступеней нужно

обеспечивать необходимую для данного типа микрообъектива коррекцию aberrаций.

При расчете первой фронтальной части, работающей со значительной числовой апертурой, могут использоваться апланатические поверхности (фронтальные апланатические мениски).

Апертура уменьшается в n^2 раз (n – показатель преломления материала линзы), что облегчает работу последующей ступени. Апертурный угол для *второй части* существенно снижается, поэтому возможно использовать алгебраический метод (коррекция aberrаций 3-го порядка), который позволяет определить необходимое число компонентов в оптической схеме и выбрать их тип. Оптимизация всех схем производится с помощью компьютерных программ.

12.2. Анализ композиций микрообъективов

Фронтальная часть – плоско-апланатическая линза.

При всех своих положительных свойствах эта линза считается неахроматизированной.

Хроматизм положения и увеличения линзы:

$$\delta s' = -\frac{n^2 - 1}{v} \cdot r, \quad \frac{dy'}{y'} = \frac{n^2 - 1}{n^2 \cdot v}. \quad (12.1)$$

С ростом линейного увеличения микрообъектива значения хроматизма весьма ощутимы, поэтому после плоско-апланатической линзы (во второй части), кроме исправления собственных aberrаций, необходимо исправлять хроматизм положения и увеличения, а также кривизну поля фронтальной линзы.

Для второй части микрообъектива используют обычно систему из двух компонентов, разделенных значительным воздушным промежуток, при этом будет облегчена коррекция сферической aberrации и хроматизма положения. В результате получается такая композиция микрообъектива, как ахромат со средними значениями увеличения и апертуры.

Схема микрообъектива с увеличением $\beta = 40\times$ и апертурой 0,65 и графики aberrаций изображены на рис. 12.1.

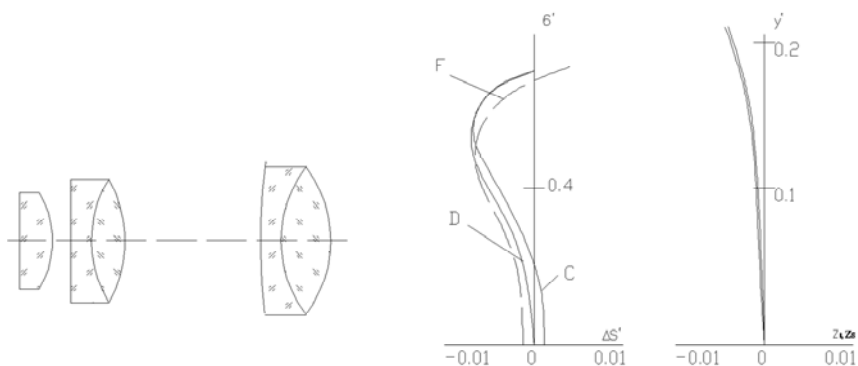


Рис. 12.1. Микрообъектив ахромат $40 \times 0,65$

При ахроматизации объектива для двух линий спектра остается довольно большая остаточная aberrация – вторичный спектр. Поэтому при создании светосильных микрообъективов с большими апертурами и линейными увеличениями необходимо вводить в их принципиальную схему дополнительные конструктивные элементы, позволяющие расширить коррекционные возможности базового модуля.

Фронтальная линза с плоской и конфокальной поверхностями

Подобная линза имеет увеличение $\beta = n$. В ней полностью устранены сферическая aberrация, кома и хроматизм положения. Вторая конфокальная поверхность линзы вносит положительный астигматизм. Все эти особенности способствуют уменьшению нагрузки для второй ступени по исправлению aberrаций.

Отсутствие хроматизма положения в плоскоконфокальных линзах позволяет использовать марки стекол с большими показателями преломления (стекла типа СТК), что обеспечивает достаточное линейное увеличение в сравнении с плоскоапланатическими. Полученная композиция с двухлинзовым склеенным компонентом представлена на рис. 12.2.

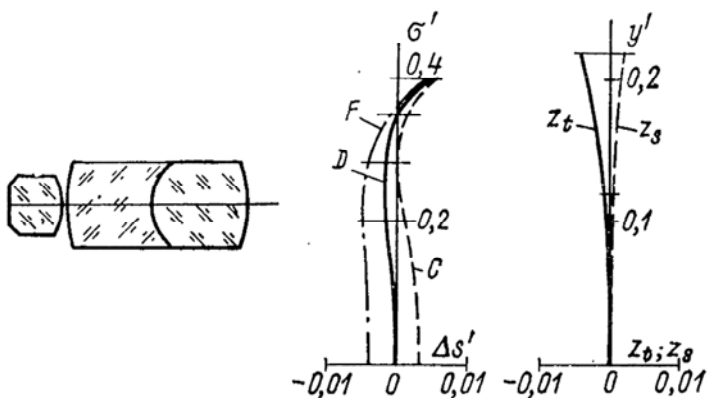


Рис. 12.2. Микрообъектив $40 \times 0,4$ с фронтальной конфокальной линзой

Телеконфокальная фронтальная линза. Применение конфокальной поверхности во фронтальной линзе с большим показателем преломления дает возможность отказаться от применения во 2-й части микрообъектива двухлинзовых склеенных компонентов, разделенных конечным воздушным промежутком. Телеконфокальная фронтальная линза: из двух конфокальных поверхностей образована телескопическая система, которая *практически безабберационна* (исключены сферическая абберация, кома, астигматизм, кривизна поля и хроматизм положения, а также при соответствующем подборе чисел Аббе – хроматизм увеличения). Она обладает линейным увеличением, равным показателю преломления ее положительной линзы.

На рис. 12.3 приведена схема микрообъектива планахромата ($f' = 3,96$ мм; апертура 0,1), построенного из плоско-выпуклой и телеконфокальной линз.

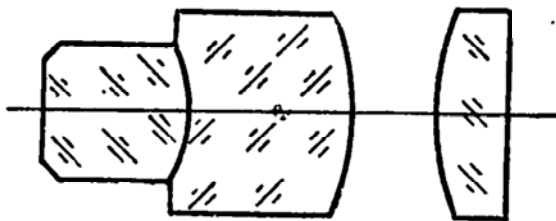


Рис. 12.3. Микрообъектив планахромат с телеконфокальной линзой

12.3. Зеркально-линзовые микробъективы

При использовании отражающих поверхностей в микробъективах можно кардинально устранять хроматизм и получать изображения в широком спектральном диапазоне. Наиболее известна двухзеркальная концентрическая система (схема Боуэна).

В целях обеспечения необходимой жесткости конструкцию, подобной двухзеркальной концентрической системы, можно выполнить в виде монолитного элемента из массы стекла; при этом входная и выходная поверхности должны быть конфокальными по отношению к точкам предмета и изображения. Подобная система (на основе зеркала Манжена) была предложена Д. Максуповым и представлена на рис. 12.4, *а*.

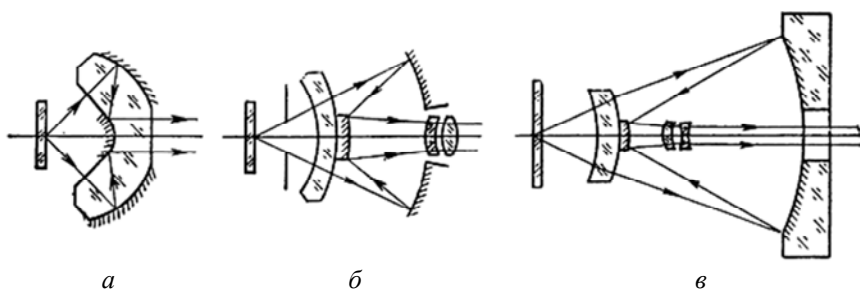


Рис. 12.4. Схемы зеркально-линзовых объективов:
а – объектив Максупова $60 \times 0,85$; *б* – объектив Волосова $40 \times 0,50$;
в – объектив Попова ($f' = 6,1$ мм; $A = 0,65$)

Данный тип объективов часто используется в УФ-микроскопии (характеристики $A = 0,85$, $\lambda = 0,276$ мкм). Коэффициент центрального экранирования $\eta = 0,39$.

Однако схема микробъектива Д. Максупова, несмотря на устойчивость, оказывается нетехнологичной; в ней существуют трудности центрировки: необходимо на одной и той же детали сцентрировать четыре сферические поверхности, сохраняя одновременно и весьма жесткий допуск на толщины.

Пара концентрических зеркал использовалась в качестве базовой системы также в схемах:

зеркально-линзового микробъектива Д. Волосова (рис. 12.4, *б*); объектива Попова (рис. 12.4, *в*).

В обеих схемах после пары зеркал размещается коррекционный элемент–компенсатор. К недостатку следует отнести разделение зеркал воздушным промежутком, что создает опасность разъюстировки микрообъективов.

Самая простая схема зеркально-линзового микрообъектива состоит из плосковыпуклой линзы, обращенной выпуклой стороной к предмету и плоской к изображению (рис. 12.5). В схеме нет никаких коррекционных элементов, а апертура и поле зрения определяются аберрациями сферической зеркальной поверхности.

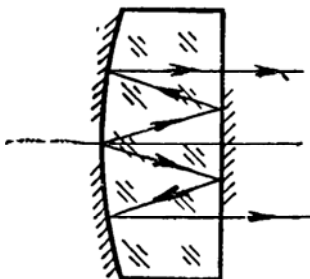


Рис. 12.5. Однолинзовый микрообъектив ($f' = 3,1$ мм; $A = 0,5$)

13. Зеркальные и зеркально-линзовые объективы

13.1. Назначение и схемы построения зеркально-линзовых объективов

Достоинства: работают в широком спектральном диапазоне; практическое исправление хроматизма.

Недостатки: центральное экранирование.

Зеркально-линзовые объективы относятся к длиннофокусным ОС. Схема построения – телеобъектив с вынесенной главной плоскостью; они имеют наименьшие габаритные размеры. Одна из основных областей применения – астрономия; предназначены для фотографирования удаленных предметов крупным планом.

Объектив состоит из трех основных частей:

зеркальной базовой системы;

афокальных менисков, сохраняющих параллельность выходящего луча входящему и удобных для устранения сферической аберрации;

компенсатора, корригирующего кому и кривизну поверхности изображения.

Для устранения засветки плоскости изображения паразитными лучами внутри объектива устанавливается специальная коническая диафрагма – бленда. Бленда имеет матово-черную рифленую поверхность.

Базовые системы – одно или два зеркала. Возможность двухзеркальных систем, даже с двумя несферическими поверхностями, ограничена: с их помощью можно исправить только две монохроматические аберрации: сферическую и кому.

Астигматизм и дисторсия не могут быть полностью исправлены. Если осевая длина $d = 0,1-0,2 f'$ (короткие ОС), кривизна изображения очень велика. Базовые ОС усовершенствуют с помощью компенсаторов.

Типы линзовых компенсаторов:

афокальные ахроматические компенсаторы (например, коррекционная пластинка Шмидта);

мениск Д. Максудова;

двухлинзовые компенсаторы, установленные в параллельных или сходящихся пучках;

компенсатор меридиональной комы В. Чуриловского;

линзовые компоненты с отражающей поверхностью (линза Манжена, склеенный и несклеенный компоненты-отражатели);

компенсатор кривизны поля – линза Смита.

Сверхсветосильный объектив с большим углом зрения (до 30°) (рис. 13.1, *а*) применяется для фотосъемки движущихся небесных тел, исправлены все аберрации кроме кривизны поля. В телескопе с параболическим базовым зеркалом (рис. 13.1, *б*) применен компенсатор комы. В системе (рис. 13.1, *в*) исправлены все аберрации, кроме дисторсии; уменьшена длина системы L (значительно меньше ее фокусного расстояния f'). В уникальных астрономических приборах применяют ахроматические мениски, что расширяет ширину спектральной области, для которой система первоклассна. При переходе от визуальной коррекции к фотографической приходится несколько изменить конструктивные элементы менисковой системы. Но если линзовый объектив может удовлетворительно работать лишь в тех условиях, для которых он корригирован, менисковый объектив в большинстве случаев может быть применен одновременно и для

визуальных, и для фотографических исследований, так как его вторичный спектр и сферохроматическая aberrация ничтожно малы.

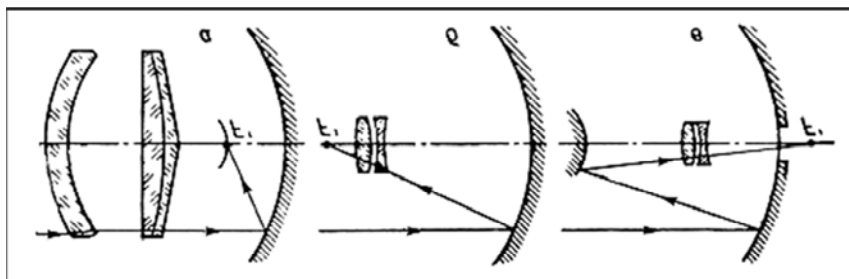


Рис. 13.1. Астрономические зеркальные системы с линзовыми компенсаторами aberrаций:
a – объектив со сложным афокальным компенсатором; *б* – телескоп с компенсатором У. Росса; *в* – система Г. Шлюсарева с параболическим большим зеркалом и сферическим малым

13.2. Менисковые системы

Менисковые системы – первые отечественные зеркально-линзовые объективы, созданные Д. Максотовым, в которых, в отличие от систем Шмидта, все оптические поверхности строго сферические, а длина не превышает фокусное расстояние системы.

Оптическая схема менискового телескопа (рис. 13.2) в принципе может содержать лишь два оптических элемента: мениск и сферическое зеркало (классическая менисковая система).

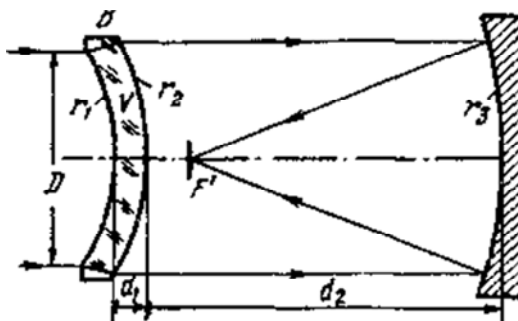


Рис. 13.2. Оптическая схема простейшего менискового телескопа

На основе мениска Д. Максута созданы другие менисковые системы с использованием схем Ньютона, Мерсенна, Гершеля и Кассегрена (рис. 13.3). Мениск *B* и сферическое зеркало *A* имеют остаточную сферическую aberrацию. Вторичное зеркало *C* переносит изображение в фокус F_1 и доисправляет aberrацию всей системы.

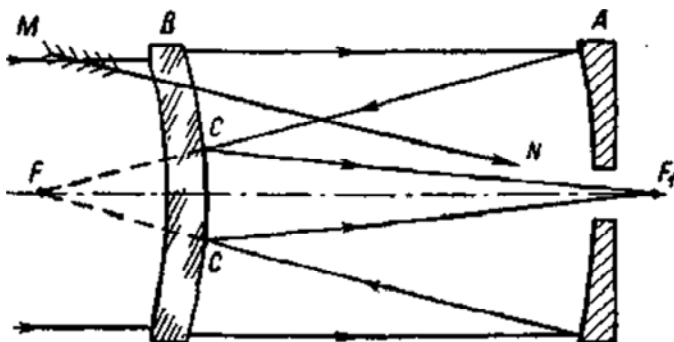


Рис. 13.3. Менисковая система на основе схемы Кассегрена

Система построена по схеме телеобъектива (малая длина при значительном фокусном расстоянии); является предфокальной системой. ОС наиболее предпочтительна из существующих аналогов.

Роль мениска Максута сводится к созданию положительной сферической aberrации без внесения хроматизма. При расположении центров обеих поверхностей мениска вблизи центра зеркала обеспечивается неизменность астigmatизма и комы. Более предпочтительно, когда мениск находится между центром и вершиной зеркала (тогда длина объектива будет значительно короче фокусного расстояния зеркала).

Исправление сферической aberrации в системе из зеркала с мениском Д. Максута будет осуществимо лишь для одной высоты апертурного луча, этим ограничивается возможное развитие относительного отверстия.

Рассмотрим условие ахроматизации для мениска: $d\Phi = 0$ (рис. 13.2).
Оптическая сила толстой линзы

$$\Phi = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d}{nr_1 r_2} (n-1)^2.$$

Продифференцируем это выражение и приравняем дифференциал нулю ($d\Phi = 0$).

Получаем уравнение, связывающее радиусы и толщину мениска

$$r_2 - r_1 + d(1 - 1/n^2) = 0. \quad (13.1)$$

Из формулы (13.1) может быть определена толщина мениска:

$$d = (r_1 - r_2) / (1 - 1/n^2). \quad (13.2)$$

Подставляя эту формулу в уравнение силы толстой линзы, получаем выражение

$$\Phi_M = \frac{n-1}{n+1} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (13.3)$$

Схема системы Максутава имеет шифр – К (М) + БЗ (К).

13.3. Система Шмидта

Рассмотрим ОС с простейшим афокальным компенсатором – систему Шмидта.

Ее базовым элементом является сферическое зеркало, с центром которого совмещен входной зрачок. При таком расположении зрачка зеркало уподобляется концентрической линзе, благодаря чему обеспечивается строгое устранение астигматизма и комы для произвольно большого поля зрения. Однако сферическая aberrация зеркала остается неисправленной.

Для компенсации сферической aberrации зеркала в плоскости входного зрачка размещена афокальная коррекционная пластинка, одна из поверхностей которой (обычно вторая) деформирована, с радиусом кривизны в вершине, равным бесконечности. Вследствие этого при устранении сферической aberrации не возникают астигматизм и кома.

Схема системы Шмидта (рис. 13.4) имеет шифр: К (асф) + БЗ (к).

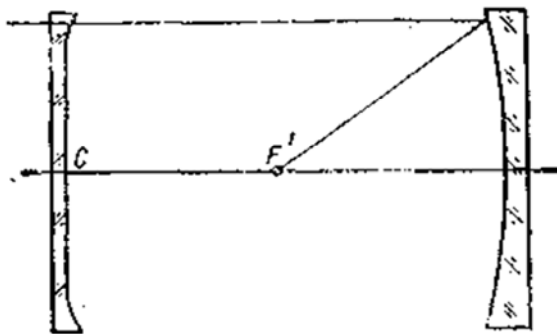


Рис. 13.4. Зеркально-линзовая система Шмидта

Для работы системы Шмидта характерна *следующая особенность*. Ширина наклонного пучка в меридиональном сечении, перпендикулярно главному лучу, уменьшается по отношению к ширине осевого пучка пропорционально $\cos\omega$. Поэтому невозможна точная компенсация сферической aberrации зеркала по полю при ее коррекции на оси: у зеркала с ростом полевого угла сферическая aberrация сохраняется постоянной. В наклонном пучке возникает некоторая кома из-за того, что крайние лучи наклонного пучка преломляются на деформированной поверхности с различными углами падения ε . Для параксиальных лучей коррекционная пластинка является афокальной системой, поэтому хроматизм не возникает.

Асферизация пластины – высших порядков (именно для больших полей зрения 2ω). Пластинка афокальная, поэтому параметры главного зеркала не нарушаются.

Сферическая aberrация сферического зеркала:

$$\Delta S' = \frac{h^2}{8 \cdot f'}$$

где h – половина входного зрачка.

Волновая aberrация сферического зеркала равна:

$$\Delta l = \frac{h^4}{32 \cdot (f')^3}$$

Из условия компенсации имеем:

$$\Delta l = \frac{(n-1) \cdot \Delta d}{n} = \frac{h^4}{32 \cdot (f')^3} = \frac{(n-1)}{n} \cdot z.$$

Находим уравнение профиля асферики:

$$z = \frac{n \cdot h^4}{32 \cdot (n-1) \cdot (f')^3}. \quad (13.4)$$

Меридиональная волновая aberrация будет равна разности величин волновой aberrации пластины и волновой aberrации зеркала. Она не скорректирована, и есть остаточная кома. Сферохроматическая aberrация может быть устранена, если в центральной зоне пластинки ввести некоторый радиус кривизны, так как вводится дополнительная оптическая сила. Существующая кривизна поля может быть откорректирована размещением близфокальной линзы (линзы Смита).

13.4. Зеркально-линзовый объектив типа МТО

Зеркально-линзовые объективы (рис. 13.5) имеют большой коэффициент виньетирования, поэтому их угловое поле небольшое (МТО-500: $2\omega = 4^\circ 30'$; МТО-1000: $2\omega = 2^\circ 30'$).

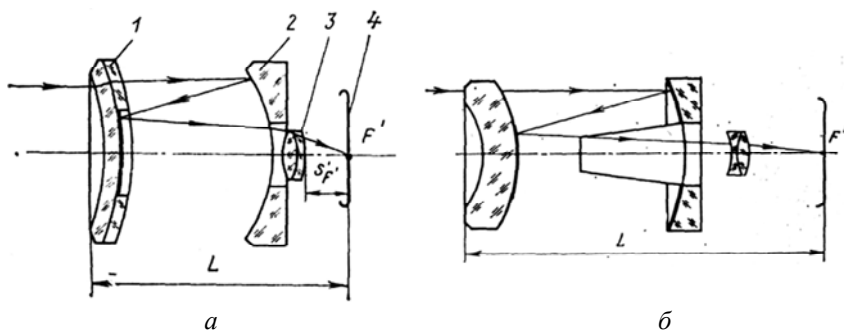


Рис. 13.5. Принципиальная схема зеркально-линзовых объективов МТО

Фокусировка зеркально-линзовых объективов осуществляется перемещением афокального мениска 1 (с выполненным на нем зеркалом) относительно неподвижного зеркала 2 (базовой ОС) и скленной линзы 3 (группы линз) – компенсатора. Такой способ фокусировки позволяет переходить при съемке от бесконечности к коротким дистанциям при весьма малых перемещениях мениска: это преимущество.

Так как объективы имеют большое фокусное расстояние, они чувствительны к тряске и вибрациям; для фотографирования нужен штатив. Недостатками объективов являются сложность конструкции, трудности в изготовлении и сборке (жесткие допуски на центрировку и пр.), большой коэффициент светорассеяния. Кроме того, по сравнению с линзовыми объективами при одном и том же относительном отверстии они имеют большие диаметры. При переходе от визуальной коррекции к фотографической приходится несколько изменить конструктивные элементы менисковой системы. Но если линзовый объектив может удовлетворительно работать лишь в тех условиях, для которых он скорректирован, менисковый объектив в большинстве случаев может быть применен одновременно для визуальных и фотографических исследований потому, что его вторичный спектр и сферохроматическая аберрация ничтожно малы.

13.5. Системы В. Чуриловского

Используется *афокальный апохроматический корректор* в двух схемах касегреновского типа (рис. 13.6) с одним и двумя корректорами из двух линз, выполненных из стекла одной марки, причем все поверхности системы, включая зеркала, имеют сферическую форму.

Известны исследования П. Аргунова по этой системе. Несмотря на высокое качество коррекции вторичного спектра, в системе (рис. 13.6, а) большой астигматизм, что связано с необходимостью значительно отодвигать корректор от вторичного зеркала, чтобы пропустить крайние лучи; по этой же причине исправление сферохроматической аберрации также неудовлетворительно. Система (рис. 13.6, б) чрезвычайно сложна в изготовлении и юстировке.

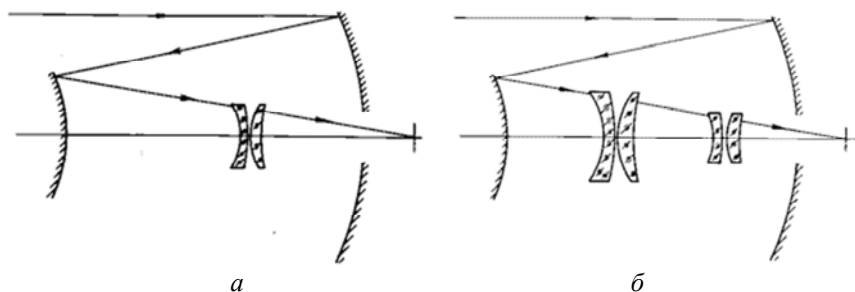


Рис. 13.6. Системы Чуриловского:
а – с одним корректором; *б* – с двумя корректорами

Методика расчета.

Если исходить из соображений формального характера, например, из числа свободных параметров, действующих на aberrации, то система с компенсатором внутри может показаться более выгодной, чем система с компенсатором в параллельном пучке, так как в первом случае появляется лишний параметр – положение афокального компонента. Однако это преимущество пропадает из-за того, что положение афокального компонента фактически определяется однозначно. Если расположить его близко ко 2-му зеркалу, то лучи, выходящие из большого зеркала, дважды проходят через компенсатор и тогда количество его aberrационных параметров уменьшается с двух до одного (W близко или равно 0). Если поместить его близко к фокальной плоскости, он практически влияет только на дисторсию. Поэтому рационально ставить его посередине между 2-м зеркалом и фокальной плоскостью, что приводит к максимально возможной величине h , – следовательно, к максимально возможному значению hP , воздействию на сферическую aberrацию и кому.

Применять афокальный компенсатор в сходящемся пучке имеет смысл только тогда, когда aberrация 1-го зеркала уже исправлена путем применения асферической поверхности.

13.6. Рефлексоурусары

В схеме рефлексоурусара компенсатор – толстая плоскопараллельная пластина. Сферическое зеркало (СЗ) обладает отрицательной сферической aberrацией, плоскопараллельная пластинка (ППП) –

положительную сферическую aberrацию. Сочетая СЗ с ППП определенной толщины, можно осуществить взаимную компенсацию сферической aberrации. Отметим, что сферическая aberrация $\Delta S'$ зависит от показателя преломления.

Используются стекла: СТК 19, ТФ 10, СТФ 1. При этом волновая aberrация $\Delta l < 0,1\lambda$.

Обычно стремятся выполнить компенсацию сферической aberrации в средней зоне входного зрачка. При этом возможно развитие большого относительного отверстия; получить светосильную систему с относительным отверстием порядка 1:1. Базовую схему с ППП можно усложнять, используя мениски или толстые линзы.

Особенности *синтеза*:

в базовой схеме отрицательная кривизна; ее устраняют тем, что из толстой ППП вырезают воздушные конфокальные линзы, которые создают дополнительную положительную кривизну в меридиональной плоскости;

возможно размещать после ППП положительную линзу с конфокальной поверхностью; она способствует увеличению относительного отверстия в разы, определяемые показателем преломления стекла, из которого она выполнена;

положительный хроматизм положения от ППП можно компенсировать следующим образом: одну из плоских поверхностей заменяют сферической поверхностью с положительной оптической силой, которая обладает положительным хроматизмом положения.

Известны модификации базовой схемы.

В объективе (рис. 13.7, а) сферическая aberrация зеркала и ППП близки друг другу по своему характеру, происходит взаимная компенсация и возможно развитие большого относительного отверстия ОС. В схеме (рис. 13.7, б) ППП расположена в параллельных пучках; первая ее поверхность имеет дополнительный коррекционный радиус (для компенсации положительного хроматизма ППП одну из ее плоских поверхностей заменяют сферической поверхностью с положительной оптической силой, обладающей отрицательным хроматизмом положения). Сила введенной сферической поверхности незначительна по абсолютной величине, поэтому ее монохроматические aberrации сравнительно легко устраняются за счет других конструктивных параметров объектива.

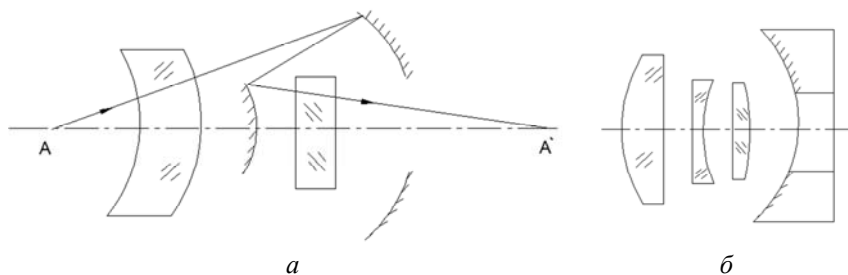


Рис. 13.7. Объектив с ППП:

a – объектив с ППП в сходящемся пучке; *б* – ППП в параллельном пучке

Для устранения отрицательного астигматизма можно также воспользоваться размещением после плоскопараллельной пластинки положительной линзы с конфокальной поверхностью. Такая линза (одновременно с устранением астигматизма) позволяет повышать относительное отверстие объектива пропорционально показателю преломления стекла, из которого она выполнена.

Изложенные приемы синтеза были реализованы при разработке высокосветосильного зеркально-линзового объектива «Рефлексо-руссар-7». Объектив имеет следующие характеристики: фокусное расстояние $f' = 250$ мм, угловое поле $2\omega = 12^\circ$, относительное отверстие 1 : 1.

14. Нетрадиционные оптические элементы и системы

14.1. Линза Френеля

Линзы Френеля представляют собой оптические детали с одной ступенчатой поверхностью. Используются в осветительных установках, имеют высокую апертуру, в них исправлена сферическая aberrация. Чем меньше расстояние между соседними ступеньками, тем точнее выполняется условие уменьшения остаточных aberrаций при малой толщине линзы. Наименьшее достигнутое расстояние между ступеньками равно 0,05 мм.

Достоинства: большой диаметр и малая толщина, невысокие требования к изготовлению.

Аберрация Френелевых поверхностей, как и сама поверхность, обладает точками разрыва, возникающих при попадании лучей на вершины или впадины.

Материалом для линз Френеля может быть полиметилметакрилат, имеющий следующие характеристики: $n_d = 1,4903$; $v_d = 57,8$. Этот материал обладает хорошим пропусканием в УФ области спектра.

Элемент эффективного профиля ступенчатой ассиметричной поверхности, разделяющей среды с показателями преломления $n = 1$ и $n_2 = n$, показан на рис. 14.1.

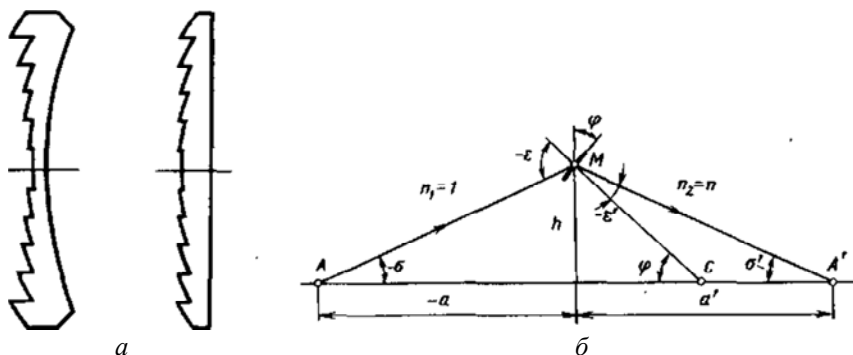


Рис. 14.1:

a – линза Френеля; b – элемент эффективного профиля линзы

Углы φ , определяющие, например, наклон профилей конических кольцевых участков ступенчатой преломляющей поверхности, вычисляются по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = (n \sin \sigma' - \sin \sigma) / (n \cos \sigma' - \cos \sigma), \quad (14.1)$$

где углы σ и σ' предварительно вычисляют по заданным отрезкам $-a$ и a' для различных высот h .

Формулу (14.1) можно использовать для расчета тонкой линзы Френеля с плоской второй поверхностью, аберрациями которой можно пренебречь.

Заднее фокусное расстояние линзы Френеля определяют по значению σ' при $\sigma = 0$.

$$f' = h / \sigma' = hn / [(n - 1) \operatorname{tg} \varphi_0], \quad (14.2)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_0$ находят по формуле (14.1) при малом значении h .

Световой диаметр $D_{\text{св}}$ линзы получается при угле падения луча $\varepsilon_m = -90^\circ$.

$$D_{\text{св}} = \left[\frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}} \right] \cdot \left[a - a' + \sqrt{(a - a')^2 - 4aa'(n^2 - 1)} \right]. \quad (14.3)$$

Расчет линзы производят из условия получения гомоцентрического пучка лучей, образующих изображение осевой точки А, принимая, что каждая ступенька является бесконечно узкой.

14.2. Растровые системы

Оптическим растром называется совокупность из линзовых или зеркальных элементов (ячеек), имеющих оптическую силу. Расстояние между осями двух смежных элементов, измеренное по нормали к их осям симметрии, называют *периодом* или *шагом раstra*.

Каждый элемент оптического раstra формирует изображение предмета. Если оптические силы всех элементов одинаковы, то изображения предмета получаются в одной плоскости (когда оптические элементы безаберрационны). При обратном ходе лучей из отдельных «предметов», полученных в виде закрепленных изображений, восстанавливается пространственное положение предмета.

Действие *растровой осветительной системы* показано на рис. 14.2.

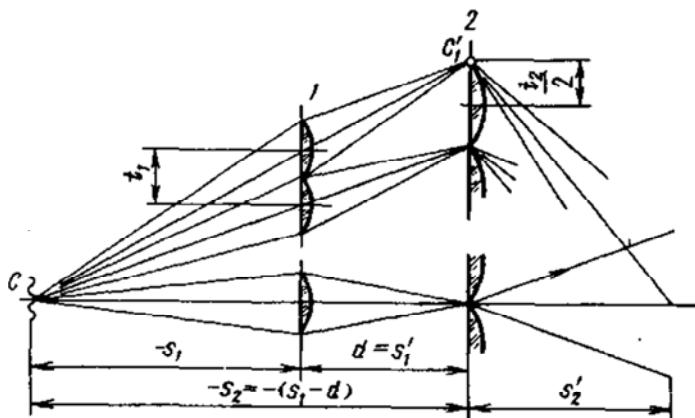


Рис. 14.2. Растровая осветительная система

Наклонный пучок лучей, идущий от источника света, заполняет входной зрачок последующей ОС. Элементом растра 1 обеспечивается получение изображения центра источника света C . Элемент растра 2 направляет пучок во входной зрачок.

Период t_1 растра 1 является заданным. Тогда согласно рис. 14.2 период растра 2 равен:

$$t_2 = t_1 \left(1 - \frac{d}{s_1}\right), \quad (14.5)$$

где d – расстояние между растрами;

s_1 – удаление источника света C от растра.

Число элементов растра 2 должно быть равно числу элементов растра 1. Фокусные расстояния осевых ячеек растров 1 и 2 определяются по формуле

$$f'_1 = \frac{s_1 d}{s_1 - d}; \quad f'_2 = (s_1 - d) s'_2 / (s_1 - d - s'_2), \quad (14.6)$$

где s'_2 – удаление изображения 3 от растра 2.

Другим примером применения оптического растра являются экраны направленного отражения. Зеркальные элементы растрового экрана могут быть сферическими и цилиндрическими.

14.3. Градиентная оптика

Перспективной элементной базой для ОС является *градиентная оптика*. В градиентных элементах (гринах) используются прозрачные изотропные среды, в которых показатель преломления есть функция координат точки среды. По виду функции $n = f(x, y, z)$ различают три типа гринов:

1) с осевым распределением показателя преломления:

$$n = f(z), \quad n(x) = n(y) = \text{const};$$

2) с радиальным (цилиндрическим) распределением:

$$n = f(x^2 + y^2), \quad n(z) = \text{const};$$

3) со сфероконцентрическим распределением:

$$n = f(x^2 + y^2 + z^2).$$

Примером гринов первого типа является сверхпроводящее волокно для систем связи, второго – силовые оптические элементы.

В градиентной оптике широко используется цилиндрический стержень с показателем преломления n , который меняется в зависимости от расстояния рассматриваемого элемента от оси ОС. Могут служить объективом телескопических систем.

Градиентные линзы с радиально уменьшающимся показателем преломления (в параксиальной области по параболическому закону, вне параксиальной – по полиномиальному).

Полиномиальное распределение показателя преломления позволяет получить грин с лучшим качеством изображения. Пластина, сделанная из такого материала, действует как обычная собирающая линза.

Грины увеличенной длины, переносящие изображение с входного торца на выходной, носят название *selfoc*. Грины обычно используются там, где необходимо установить очень много маленьких линз рядом, – в таких устройствах, как жесткий эндоскоп, копировальные устройства и сканеры.

Градиентное волокно может быть сделано из радиально-изменяющегося профиля распределения показателя преломления; при его проектировании очень ослабляется дисперсия света в многомодовом оптоволокне. Хрусталик глаза человека также использует радиально уменьшающийся показатель преломления для фокусировки света.

Одно из самых важных преимуществ градиентных линз при сравнении с классическими линзами заключается в том, что оптические поверхности гринов могут быть плоскими. Этот факт очень важен при создании связи высокого качества между линзами и, например, оптоволокном. При выпуклых поверхностях сферической формы наличие градиента показателя преломления в линзе (радиального и осевого) эквивалентно действию асферизации поверхности, что позволяет существенно повысить относительное отверстие линзы.

14.4. Киноформы

Дифракционная линза (киноформ) представляет собой периодическую кольцевую структуру, изготавливаемую, например, способом фотолитографии. Киноформ рассматривается как бесконечно тонкий транспарант с заданным амплитудным коэффициентом пропускания. Так как при прохождении пучков лучей через киноформы силовое действие сопровождается изменением в спектральном составе излучения, то эти элементы используют для коррекции не только сферической, но и хроматических аберраций.

Киноформная линза находит применение в системах фокусировки излучения лазера, в дисковых видеопроекторных объективах, в лазерных дальномерах и др. Она заменяет дорогие многолинзовые объективы. Киноформные элементы позволяют решать такие задачи по управлению световыми пучками, которые решить с помощью традиционных оптических элементов часто не представляется возможным.

Киноформ цилиндрической линзы. Бороздки имеют вид не концентрических колец, а прямолинейных параллельных полосок. Их ширина и профиль изменяются по тому же закону, как и у рассмотренного выше киноформа. После прохождения плоской волны образуется яркая линия.

Киноформный аксикон. Аксикон – оптический элемент с осевой симметрией, изображающий точечный источник в виде множества точек, располагающихся вдоль оптической оси. Профиль рельефа аксикона: кольцевые бороздки имеют треугольное сечение и повторяются с постоянным шагом вдоль радиуса. Фактически это дифракционная решетка, но не с прямолинейными, а с концентрическими штрихами. С помощью такого аксикона можно 80 % световой энергии собрать в световую линию диаметром 50 мкм и длиной 2 м. При этом максимальная глубина профиля киноформа составила чуть больше 1 мкм. Свойство аксикона формировать световую линию используют для проверки прямолинейности в лазерной технологии, оптических интерферометрах.

Киноформ прозрачного тора. В некоторых ОС, в том числе в лазерной технологии, необходимы оптические элементы, концентрирующие световой поток в тонкое кольцо. Для этих целей можно использовать прозрачный тор. При освещении его плоской монохроматической волной можно наблюдать образование яркого узкого

кольца. Его используют для вырезания круглых дисков, фокусируя излучение мощного лазера на мишень. Однако процесс изготовления тора, например из стекла, технологически труден и дорогостоящ. В данном случае целесообразно использовать киноформ тора. С помощью киноформных оптических элементов можно решать самые экзотические задачи формирования световых пучков. Например, для лазерных систем вывода изображений и лазерных измерительных датчиков касания созданы киноформы с повышенной глубиной фокусировки, то есть удлиняющие расстояние вдоль оси, на котором после фокусировки света линзой интенсивность максимальна.

В системах объемного видения роботов, контроля прямолинейности станин в станкостроении, центрировке и монтаже оборудования нашел применение фазовый элемент – *линзакон*. В этом элементе пространственно совмещены киноформы линзы и аксикона.

Линзакон – основной оптический элемент в приборе «Лазерная струна», который используется для контроля прямолинейности направляющих больших станков и выставления оборудования по прямой. С помощью этого прибора можно создать световую линию диаметром 50 мкм и длиной до 50 м.

Эффективность записи изображений в лазерных принтерах и сканерах зависит от распределения световой энергии по сечению в фокусе пучка. При поэлементном способе записи оптимальное использование энергии лазера достигается при равномерном распределении интенсивности в фокальном пятне, а при непрерывном способе – кольцеобразное распределение. Эта задача решается при помощи одного оптического элемента, выполняющего одновременно функции дифракционной линзы и фазовой решетки.

Применение киноформов в ОС позволяет сократить в них число компонентов за счет объединения функциональных свойств нескольких элементов в одном.

Киноформы в сочетании с обычными оптическими элементами позволяют сократить габариты, массу и стоимость традиционных оптических приборов и создать принципиально новые ОС, не имеющие аналогов (например, двухфокусный микроскоп с пластинкой Вуда – наблюдение микрообъектов, находящихся в различных предметных плоскостях выставки их вдоль одной линии).

14.5. Аксиконы

Аксиконы (рис. 14.3) вызывают значительное нарушение гомоцентричности осевого пучка лучей и образуют изображение в виде осевого отрезка большой длины.

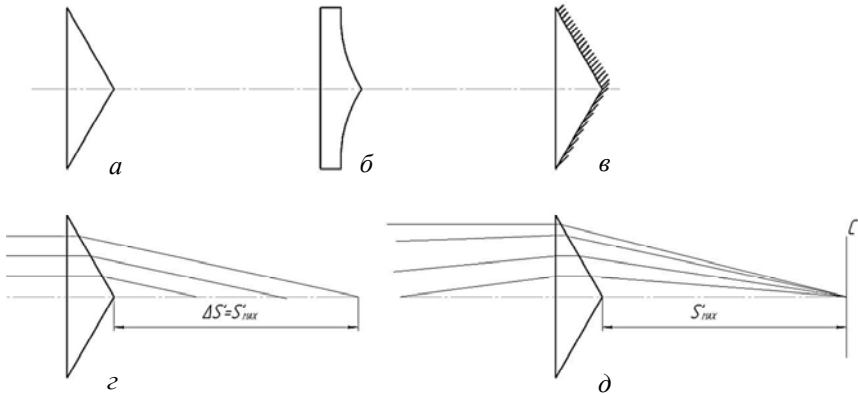


Рис. 14.3. Конические аксиконы:

a, б, в – виды аксиконов; *г* – образование изображения бесконечно удаленной точки разными зонами; *д* – образование изображений разноудаленных осевых точек в плоскости сетки

Этим свойством обладают аксиконы большой сферической аберрации – *конические* и *сферические* или *линзовые аксиконы* или вследствие большого продольного хроматизма – *хроматические аксиконы*.

Впервые этот элемент был предложен Мак-Леодом и далее изучен Стилом, который предложил линзу-мениск с отрицательными радиусами кривизны поверхностей, имеющую большую отрицательную сферическую аберрацию (*линзовый аксикон*).

Аксиконы с асферическими поверхностями различной формы и зеркальные аксиконы более трудны в изготовлении. Особенностью образования изображения аксиконом состоит в том, что точки изображения A_1' , A_2' , A_3' ... строятся узкими кольцевыми зонами детали, а не всем диаметром, как в случае исправленной сферической аберрации, что снижает освещенность изображения. Свойства аксикона определили области его применения: создание объективов, не требующих фокусировки при изменении положения предмета (визир-

ной цели) в виде светящейся точки; получение заданного распределения освещенности в плоскости изображения; формирование пучка лучей с нулевой интенсивностью в центре пучка; компенсация сферической aberrации, вносимой другими компонентами.

Аксикон используют в зрительных трубах геодезических приборов и оптико-электронных контрольно-измерительных приборах в качестве объектива. При его использовании не требуется выполнять перефокусировку трубы при изменении расстояния до марки (рис. 14.3, д). По точности визирования зрительная труба с коническим аксиконом предпочтительнее, чем с линзовым.

Сферические аксиконы – склеенные линзы (рис. 14.4), которые легче изготовить, чем конический аксикон.

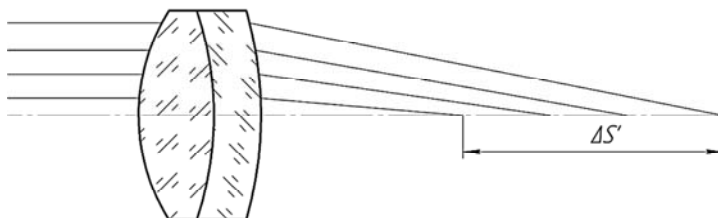


Рис. 14.4. Сферический аксикон с большой положительной сферической aberrацией

Аксиконные насадки представляют собой плоскопараллельную пластину, состоящую из двух линз – положительной и отрицательной, склеенных по сферической поверхности (рис. 14.5). При использовании насадки совместно с обычным объективом получаем систему со свойствами аксикона.

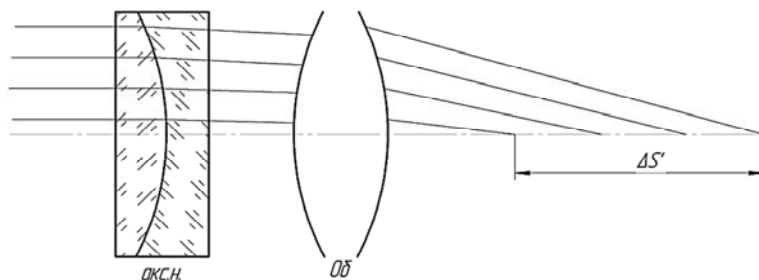


Рис. 14.5. Система «аксиконная насадка + обычный объектив», обладающая свойствами конического аксикона

Хроматические аксиконы обладают большим хроматизмом положения. На рис. 14.6, б показан хроматический аксикон в качестве объектива, дающий без перефокусировки изображения разноудаленных точек (марка в виде перекрестия); их изображения имеют разный цвет в зависимости от расстояния до предмета и окружены слабым цветным фоном. На рис. 14.6, а показано образование изображения бесконечно удаленной точки предмета на оси: лучи, параллельные оптической оси, на всех высотах после преломления образуют изображения в тех же точках F'_F, F'_e, F'_e .

В хроматических аксиконах выполнена апланатическая коррекция в пределах рабочего диапазона спектра, поэтому изображение марки получается четким. Существенным преимуществом является участие всего зрачка в построении изображения разноудаленных марок, что обеспечивает постоянство точности визирования независимо от положения предмета.

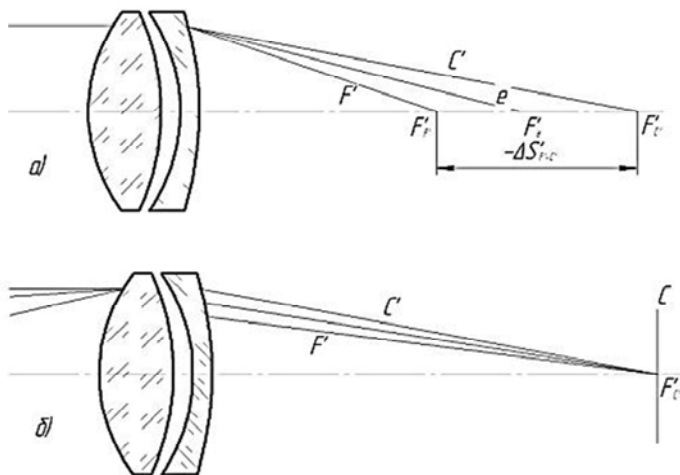


Рис 14.6. Хроматические аксиконы:

- a* – образование изображения бесконечно удаленной точки предмета на оси;
- б* – образования изображений разноудаленных осевых точек предмета в плоскости (C)

Список рекомендуемой литературы

1. Артюхина, Н.К. Компьютерное проектирование оптических систем : учеб-метод. пособие : в 2 ч. / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик. – Минск : БНТУ, 2007. – Ч. 1. – 167 с.
2. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем : монография / Н.К. Артюхина. – Минск : БНТУ, 2009. – 309 с.
3. Артюхина, Н.К. Техническая оптика : метод. пособие / Н.К. Артюхина. – Минск : БНТУ, 2009. – 43 с.
4. Запрягаева, Л.А. Расчет и проектирование оптических систем / Л.А. Запрягаева, И.С. Свешникова. – М. : Логос, 2000. – 581 с.
5. Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http:// www. zemax. Com](http://www.zemax.com).
6. Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http:// www. focus. software. com](http://www.focus.software.com).
7. Родионов, С.А. Автоматизация проектирования оптических систем / С.А. Родионов. – Л. : Машиностроение, 1982. – 289 с.
8. Русинов, М.М. Композиция оптических систем / М.М. Русинов. – Л. : Машиностроение, 1989. – 383 с.
9. Русинов, М.М. Несферические поверхности в оптике. Расчет, изготовление, контроль / М.М. Русинов. – М. : Недра, 1992. – 256 с.
10. Русинов, М.М. Техническая оптика / М.М. Русинов. – Л. : Машиностроение, 1979. – 488 с.
11. Слюсарев, Г.Г. Расчет оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л. : Машиностроение, 1975. – 639 с.
12. Шрёдер, Г. Техническая оптика / Г. Шрёдер, Х. Трайбер. – М. : Техносфера, 2006. – 423 с.
13. Smith, W.J. Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems / W.J. Smith. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2000. – 617 p.
14. The Photonics Handbook, Book 3, 52nd International Edition, A. Laurin Publication, 2006.– 370 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Глава 1. Анализ оптических систем.....	4
1. Монохроматические aberrации: фигуры рассеяния и графики aberrаций.....	4
1.1. Связь между волновыми и геометрическими aberrациями	4
1.2. Анализ aberrаций наклонного пучка.....	7
1.3. Сферическая aberrация III и V порядков	13
1.4. Определение aberrационных составляющих по графикам поперечных aberrаций.....	16
2. Хроматизм и оптические характеристики стекол.....	17
2.1. Условия нормировки	17
2.2. Хроматизм положения.....	18
2.3. Ахроматизация	21
2.4. Вторичный спектр.....	22
2.5. Хроматизм увеличения.....	24
2.6. Характеристики бесцветных оптических стекол	25
2.7. Оптические характеристики материалов для инфракрасной области спектра.....	26
3. Aberrационные полиномы.....	28
3.1. Основные формулы разложения Зейделя	28
3.2. Преобразованные коэффициенты.....	30
3.3. Монохроматические aberrации третьего порядка	31
4. Методы коррекции aberrаций	34
4.1. Метод проб	34
4.2. Алгебраический метод	34
4.3. Комбинированный метод	36
4.4. Метод автоматической оптимизации.....	36
4.5. Композиционный метод.....	37
5. Компьютерные программы анализа	38
5.1. Процедура «Анализ».....	38
5.2. Программное обеспечение	39
6. Оценка качества изображения оптических систем	40
6.1. Исходные принципы оценки качества изображения	40
6.2. Разрешающая способность оптических систем.....	42

6.3. Влияние аберраций на разрешающую способность	44
6.4. Качественные параметры оценки качества изображения ..	45
6.5. Волновые критерии оценки качества изображения	48
6.6. Частотно-контрастная характеристика	51
6.7. Точечная диаграмма лучей	54
6.8. Функция рассеяния линии и пятно рассеяния	55
Глава 2. Синтез оптических систем	57
7. Теория коллимированности и оптика Гаусса вдоль главного луча	57
7.1. Главные фокусные расстояния	57
7.2. Угловое увеличение. Узловые фокусные расстояния	57
7.3. Инвариант Лагранжа – Гельмгольца	59
7.4. Меридиональный и сагиттальный инварианты Гульстранда – Юнга	59
8. Базовые (силовые) элементы	60
8.1. Основные базовые элементы	60
8.2. Коррекционно-силовые элементы оптических систем	62
9. Коррекционные элементы	64
9.1. Компенсаторы зеркально-линзовых систем	64
9.2. Аномальные и нормальные склейки. Ориентация и использование склеек для коррекции астигматизма	67
9.3. Апланатические поверхности	71
Глава 3. Композиция оптических систем различного назначения	73
10. Светосильные объективы	73
10.1. Двойные склеенные анастигматы	73
10.2. Двойные четырехлинзовые анастигматы	75
10.3. Объективы типа «Плазмат», «Гелиос», объектив Петцвала	78
11. Широкоугольные объективы	81
11.1. Широкоугольный объектив «Лиар»	82
11.2. Широкоугольный зеркально-линзовый объектив	83
11.3. Объектив Руссар	83
12. Микрообъективы	84
12.1. Особенности и методы расчета микрообъективов	84
12.2. Анализ композиций микрообъективов	86
12.3. Зеркально-линзовые микрообъективы	89

13. Зеркальные и зеркально-линзовые объективы.....	90
13.1. Назначение и схемы построения зеркально-линзовых объективов	90
13.2. Менисковые системы	92
13.3. Система Шмидта.....	94
13.4. Зеркально-линзовый объектив типа МТО.....	96
13.5. Системы В. Чуриловского	97
13.6. Рефлексоруссары	98
14. Нетрадиционные оптические элементы и системы.....	101
14.1. Линза Френеля	101
14.2. Растровые системы.....	102
14.3. Градиентная оптика.....	104
14.4. Киноформы	105
14.5. Аксиконы	107
Список рекомендуемой литературы	110

Учебное издание

АРТЮХИНА Нина Константиновна

ТЕХНИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-38 01 02
«Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»

Редактор *Т. В. Мейкшане*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 23.11.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 6,63. Уч.-изд. л. 5,18. Тираж 100. Заказ 1038.

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.