

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Лазерная техника и технология»

Н.К. Артюхина

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ОПТИКА

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

*Рекомендовано учебно-методическим  
объединением высших учебных заведений  
Республики Беларусь в области приборостроения*

М и н с к 2 0 0 9

УДК 681. 7 (075.8)

ББК 22.37-7 я 7

А 86

Рецензенты:

Е.Г. Зайцева, В.А. Марчик

**Артюхина, Н.К.**

А86 Техническая оптика: учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы для студентов специальности 1 38 01 02 «Опτικο-электронные и лазерные приборы и системы» / Н.К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2009. – 44 с.

ISBN 978-985-525-287-1.

Учебно-методическое пособие составлено с учетом программы дисциплины «Техническая оптика» и предназначено для студентов специальности 1-38 01 02 «Опτικο-электронные и лазерные приборы и системы». В них излагаются основные теоретические положения по расчету зеркальных систем, приведен пример расчет зеркально-линзовой системы опτικο-электронного прибора по конкретному техническому заданию. Даны методики расчета защитных бленд и диаграмм виньетирования.

Издание также может быть использовано при подготовке студентов родственных специальностей, выполняющих курсовые работы и проекты по расчету оптических систем, а также магистров и аспирантов.

ISBN 978-985-525-287-1

©Артюхина Н.К., 2009

© БНТУ, 2009

## Введение

*Назначением дисциплины «Техническая оптика»* является изучение принципов проектирования оптических систем с повышенными оптическими характеристиками и вопросов выбора исходной системы для абберационного расчета. Курсовая работа, выполняемая студентами на V курсе, является важным этапом подготовки к выполнению дипломного проекта по развитию у них навыков самостоятельной работы с использованием компьютерных расчетов. Студенты при выполнении курсовой работы используют:

– техническую литературу, государственные стандарты, нормы, патенты, справочные материалы, каталоги и архивы компьютерных программ;

– программы анализа и синтеза пакетов прикладных программ по расчету оптики OSLO, OPAL, ZEMAX [1,2].

При этом они должны знать основы теории синтеза (композиции) и методов выбора исходной оптической системы для абберационной коррекции, правила оформления конструкторской документации, а также уметь проводить оценку качества изображения с использованием ПЭВМ.

*Целью курсовой работы* является расчет зеркальной системы или зеркально-линзового объектива для оптико-электронного прибора [3].

В зеркальных и зеркально-линзовых системах главная роль в образовании изображения отводится отражающим поверхностям, не вносящим хроматических аббераций. При сравнительно несложной и компактной конструкции таких систем можно получить достаточно совершенную коррекцию сферической абберации и меридиональной комы при отсутствии хроматизма.

В двух- и трехзеркальных объективах одно из зеркал обычно делают асферическим, так как сферические зеркала дают сравнительно большие остаточные абберации, что является их недостатком с технической точки зрения (контроль и юстировка).

Зеркально-линзовые системы применяют в том случае, когда для коррекции аббераций двухзеркальной системы экономичнее вводить в объектив коррекционные элементы, один из которых выполняет функцию защитного стекла.

Исходными данными для выбора и расчета зеркальных и зеркально-линзовых объективов являются следующие характеристики:

1) фокусное расстояние  $f'$  (или линейное увеличение  $\beta_0$ , если предмет находится на конечном расстоянии от оптической системы при  $S_1 \neq -\infty$ ), которое должно обеспечивать необходимую точность измерения и отвечать конструктивным требованиям;

2) относительное отверстие  $D/f'$  при  $S_1 = -\infty$  (или числовая апертура  $A$ , если  $S_1 \neq -\infty$ ), которое выбирается из условия требуемого качества изображения;

3) угловое поле  $2\omega$  при  $S_1 = -\infty$  (или линейное поле  $2y$ , если  $S_1 \neq -\infty$ ), которое должно обеспечивать необходимое поле обзора, быстродействие системы, помехозащищенность и требуемое качество изображения (к примеру, в аппаратах дистанционного зондирования Земли ДЗЗ параметры поля зрения – проекция пиксела на Землю при заданной высоте орбиты и ширина полосы захвата на земле перпендикулярно линии полета);

4) расстояние, определяющее вынос плоскости изображения относительно последней поверхности объектива  $\delta$ , определяемое общими конструктивными требованиями;

5) длина оптической системы вдоль оптической оси от первой поверхности до фокальной плоскости;

6) количество асферических поверхностей, требующих более совершенной, сложной технологии изготовления, высокой точности поверхности до  $(\lambda/60)$  и тщательной юстировки;

7) линейный коэффициент центрального экранирования  $\eta$ , который определяется из энергетического расчета;

8) спектральный диапазон  $\lambda_1 - \lambda_3$ , определяемый спектральными характеристиками излучения объектива, фона, среды, фильтров, приемника лучистой энергии;

9) требуемое качество изображения, которое характеризуется распределением энергии в кружках рассеяния по всему полю (точечными диаграммами), точностью измерения и выбранным типом приемника излучения.

# 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНЫХ СИСТЕМ

## 1.1. Схемные решения и методика расчета

Одиночные зеркала входят во многие схемы; часто поверхности такого зеркала придают параболоидальную форму, которая обеспечивает стигматичное изображение бесконечно удаленной осевой точки (для точек, расположенных вне оптической оси, начинают сказываться кома и астигматизм). У одиночного сферического зеркала сферическая абберация принципиально неустранима. Внеосевые параболоиды находят применение в ИК-монохроматорах. Эллипсоидные зеркала используются для переноса энергии от источника, расположенного на конечном расстоянии, в заданную плоскость с определенным увеличением.

Наиболее распространенными в оптическом приборостроении являются двухзеркальные системы. Используют известную схему Кассегрена со сферическими и асферическими поверхностями зеркал, иногда с плоским зеркалом. Многие телескопы, радиометры, тепловизоры имеют объективы Кассегрена в классическом исполнении (большое параболическое и малое гиперболическое зеркало) и объективы Ричи–Кретьена (оба зеркала гиперболические) [4]. Эти объективы обладают меньшими габаритами, чем односторонние, могут иметь относительные отверстия 1:1 и небольшие поля зрения, порядка нескольких минут. Подобные схемы используются во многих лабораторных приборах, в приборах для исследования космических объектов и т. д. В объективах, собирающих ИК-радиацию, например, для радиометров, используются системы Даль-Кирхама [5], состоящие из двух зеркал: большого эллипсоида и малого сферического (схему целесообразно рассчитывать для фокусного расстояния  $f' = 400\text{--}500$  мм; относительного отверстия 1:2). В таких объективах малые мгновенные поля зрения, приемники ИК-радиации имеют малые чувствительные площадки, для увеличения поля обзора часто применяют различные способы сканирования. К примеру, в тепловизорах, радиометрах, телескопах, спектрометрах используют сканирующее плоское зеркало, расположенное перед объективом под углом  $45^\circ$  к оптической оси.

Двухзеркальные системы, составленные из сферических зеркал, являются концентрическими или имеют равные радиусы кривизны зеркал [6]. Рассчитаны системы с planoидными зеркалами [7]; в основном они работают в наклонных пучках и для них характерна значительная кривизна поля. Намечающиеся в последние годы успехи в изготовлении и контроле асферических зеркал [8] дают возможность создавать другие схемы с различными сочетаниями асферических поверхностей второго и высшего порядка [9] и адаптировать их к промышленному применению. Трехзеркальные системы обеспечивают анастигматическую коррекцию, что дает увеличение светосилы и поля [10]. Им присущ ряд недостатков: неудобное расположение плоскости изображения, большое виньетирование.

Наиболее перспективными трехзеркальными схемами вновь разрабатываемых космических аппаратов (КА) высокого разрешения для дистанционного зондирования Земли (ДЗ) являются схемы, которые позволяют выполнить все требования технического задания к разрешению и полосе захвата:

- трехзеркальные с центральным экранированием и промежуточной плоскостью изображения;
- трехзеркальные внеосевые без экранирования.

На рис. 1.1, *a* представлена известная система Д. Корша [11].

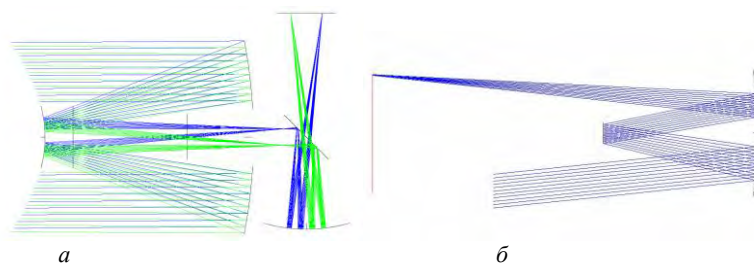


Рис. 1.1. Трехзеркальные схемы: *a* – трехзеркальная система с экранированием и промежуточной плоскостью изображения; *б* – внеосевая система без центрального экранирования

Смещенное с оптической оси промежуточное изображение, даваемое первым и вторым зеркалами, переносится третьим асферическим зеркалом с увеличением. Эксцентриситет третьего зеркала

ла является дополнительным параметром, позволяющим исправить кривизну изображения. В объективе хорошее качество изображения по всему полю, кроме дисторсии, которая достаточно велика. Конструктивно и технологически схема сложна в реализации из-за малых допусков на сборку объектива и наличием трех асферических зеркал высокой точности изготовления. Из-за большой дисторсии требуется дополнительно создание аппаратуры для ее аттестации.

Трехзеркальный внеосевой объектив без центрального экранирования состоит из трех асферических зеркал, которые имеют одну общую оптическую ось, совпадающую с осью второго выпуклого зеркала [12], где расположена апертурная диафрагма объектива (рис. 1.1, б). Объектив позволяет получить высокие значения МТФ при увеличенном поле зрения благодаря отсутствию центрального экранирования и хроматизма и имеет малую дисторсию.

В композициях из четырех зеркал всегда обеспечена апланатическая и астигматическая коррекция аберраций и удобное положение приемника изображения. Практическое применение иногда ограничено из-за больших габаритов, значительного экранирования и виньетирования по полю, технологических трудностей в связи со сложной асферической формой зеркал, поэтому их изготавливают для уникальных приборов.

**Методика расчета зеркальных астигматов** основана на теории аберраций третьего порядка; ее можно условно разделить на несколько этапов.

Первым этапом является выбор базовой системы, который проводится на основе опыта с учетом основных оптических характеристик зеркальной системы, конструктивных условий, назначения и коррекционных возможностей. Под конструктивными условиями можно понимать габаритные ограничения и дополнительные требования: необходимость расположения действительной плоскости выходного зрачка перед поверхностью изображения; наличия двух ступеней оптики (ДО), т.е. получение промежуточного изображения; определенная форма несферической поверхности конкретных зеркал и т.п. Процесс выбора схемного решения зеркальной системы может быть выполнен с помощью пробных габаритных расчетов. Коррекционные возможности зеркальной системы для заданных оптических характеристик определяют при постановке задачи их исследования с учетом возможной оптимизации.

Аберрационный расчет относится ко второму этапу, на котором проводят выбор коррекционных параметров зеркальных систем. В основном рассчитывают деформации поверхностей. Первый и второй этапы являются аналитическими.

На трех последующих этапах оценивают адаптацию зеркальной схемы к производственному использованию. Переход от базовой системы к реальной конструкции обычно выполняется с учетом определения пределов изменения ее конструктивных и технологических параметров, а также возможности защиты поверхности приемника изображения от постороннего света и различных бликов. Проводят оптимизацию системы по программам автоматизированной коррекции аберраций и анализ качества изображения зеркальной схемы (расчет частотно-контрастных характеристик, точечных диаграмм, функций рассеяния и т.д.).

## 1.2. Габаритный расчет зеркальной системы

В результате габаритного расчета определяются основные конструктивные параметры: радиусы зеркал и расстояние между ними. Деформации, определяющие квадрат эксцентриситета меридиональных кривых второго порядка поверхностей зеркал, являются коррекционными параметрами и находятся при аберрационном расчете. Габаритные (параметрические) расчеты двухзеркальных систем широко освещены в литературе [6, 13].

Рассмотрим расчет одного из вариантов четырехзеркального объектива с промежуточным изображением. Схема компактна и относится к перспективному направлению построения конфигураций многозеркальных систем в концепции ДО [14]. Введение промежуточной плоскости изображения дает много преимуществ: позволяет обеспечивать радиусы выпуклых поверхностей меньшей кривизны и более технологичную форму асферических зеркал, упрощает систему бленд; дает эффективную и удобную точку в схеме, куда можно помещать такие оптические элементы, как световые фильтры, фокальные корректоры, сканирующие элементы, поляризаторы, преобразователи изображения и т.д.



На рис. 1.2 поверхности зеркал обозначены главными плоскостями и показан ход | параксиального луча с параметрами  $\alpha_5$  и  $h_5$ , идущего из осевой точки предмета на край входного зрачка.

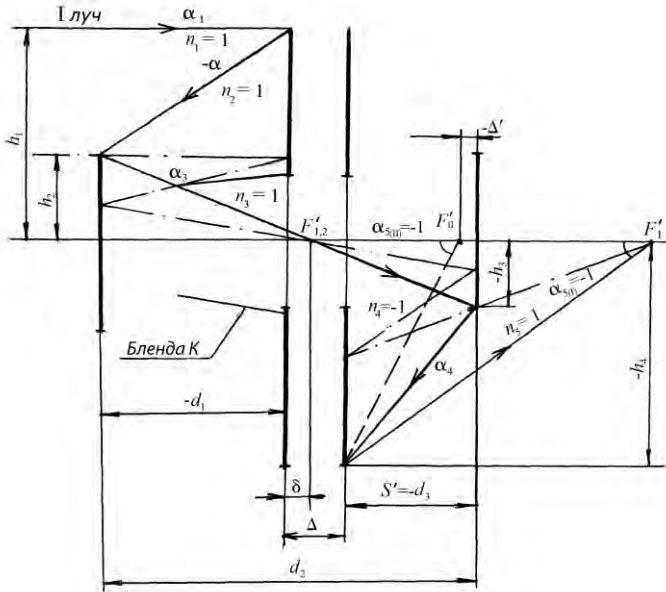


Рис. 1.2. Принципиальная схема объектива с промежуточным изображением

Первое и четвертое зеркала в этих системах всегда вогнутые. Они могут быть изготовлены в виде монолита и имеют центральные отверстия для прохождения светового пучка. Второе зеркало – выпуклое, а третье имеет принципиально разную форму.

Возможны две модификации таких объективов:

- 1) с внешним фокусом  $\alpha_4 < \alpha_5$ ;
- 2) с внутренним фокусом  $\alpha_4 > \alpha_5$ .

Пусть отрезок, определяющий положение входного зрачка относительно первого зеркала,  $S_D = 0$ . Условиями нормировки (масштаба) для | луча являются  $h_1 = 1, 0$ ;  $\alpha_1 = 0$ .

**Первая модификация.** Положение точки фокуса обозначено  $F_1'$ . Примем соотношение  $h_1 = -h_4$ , при этом имеем выпуклую форму третьего зеркала и дополнительные начальные условия для габа-ритного расчета:  $\alpha_5 = -1,0$ ;  $f' = -1,0$ .

Иногда перед началом расчета задают из технологических со-  
ображений величину оптической силы первого зеркала  $\alpha_2 = 1/f'_1$ .

В зеркальных система используют равенство

$$\chi_s = \frac{1}{n_s} = (-1)^{s+1}, \quad (1.1)$$

где  $n_s$  – показатель преломления перед  $s$ -й поверхностью.

Формула (1.1) учитывает правило знаков: распространение света слева направо – положительно (четные показатели равны минус единице, а нечетные единице). При отражении  $n_s$  меняет свой знак ( $n_s = -n_{s+1}$ ), поэтому

$$n_{s+1} = (-1)^{s+2}, \quad \Delta\chi_s = -2\chi_s, \quad \chi_s^2 = 1, \quad (1.2)$$

а разности углов  $\alpha_{s+1}$  и  $\alpha_s$  для луча, имеющего высоту  $h_s$  на  $s$ -й поверхности,  $\Delta\alpha_s = \alpha_{s+1} - \alpha_s$ ,  $\Delta(\alpha_s)^2 = \alpha_{s+1}^2 - \alpha_s^2$ . Сумма этих углов  $\sum \alpha_s = \alpha_{s+1} + \alpha_s$  связана с радиусом кривизны  $r_s$  в вершине зеркальной поверхности соотношением

$$\alpha_{s+1} + \alpha_s = \frac{2h_s}{r_s}, \quad (1.3)$$

где  $h_s = h_{s+1} + \alpha_{s+1} d_s$ .

Схемные решения объективов предполагают выполнение определенных соотношений осевых расстояний  $d_s$ :

$$\begin{aligned} d_2 &= -(d_1 + d_3) + \Delta, \\ d_3 &= -(1 + \Delta'), \end{aligned} \quad (1.4)$$

где  $\Delta = \left(\frac{1}{8} : \frac{1}{10}\right) \frac{h_1}{N}$  – толщина моноблока, выбираемая в зависимости

от относительного отверстия объектива  $\frac{D}{f'} = 1 : N$ ;  $\Delta'$  – вели-

чина, определяющая вынос фокальной плоскости относительно поверхности третьего зеркала (при  $\Delta' < 0$  она вынесена за пределы системы). Введем дополнительный параметр  $\delta$  – расстояние, определяющее плоскость промежуточного изображения относительно поверхности первого зеркала. По ходу луча имеем равенства

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_2}{\alpha_3} &= -d_1 + \delta, \\ \frac{h_3}{\alpha_3} &= d_3 - \Delta + \delta. \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Коэффициент центрального экранирования  $\eta$  определяется по лучу, идущему на высоте  $h_2$ :

$$\eta = h_2 = -\frac{h_3}{1 + \alpha_3}. \quad (1.6)$$

Формулы (1.5) и (1.6) можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \alpha_3 &= \frac{h_2}{\delta - d_1}; \\ h_3 &= -h_2 \alpha_3 \frac{\Delta - \delta + 1}{\alpha_3 + h_2}; \\ \alpha_4 &= \alpha_3 \frac{1 + h_3}{h_3 + (\Delta - \delta) \alpha_3}. \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

Выражения (1.6) и (1.7) являются основными для габаритного расчета четырехзеркального объектива данного типа. Параметр  $\delta$ , входящий в формулы, может менять свое значение. В случае, когда плоскость промежуточного изображения задана, величину  $\delta$  считают исходной величиной. Тогда, к примеру, для промежуточной плоскости, совпадающей с вершиной четвертой поверхности, сводка формул (1.7) преобразовывается к виду:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_3 &= \frac{h_2 \alpha_2}{\Delta \alpha_2 - (1 - h_2)}; \\ h_3 &= -\frac{h_2 \alpha_2}{(\Delta + 1) \alpha_2 - (1 - h_2)}; \\ \alpha_4 &= -\frac{\Delta \alpha_2 - (1 - h_2)}{\Delta \alpha_2 - (1 - h_2)(1 - \alpha_2)}. \end{aligned} \right\} (1.8)$$

*План-объективы* рассчитывают при выполнении условия исправления кривизны изображения (четвертой суммой  $D_0$  можно управлять, изменяя параметры зеркальной системы радиусы поверхностей зеркальной системы и расстояния между ними [15]).

Для системы из четырех зеркал:  $D_0 = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} \frac{\chi_s \alpha_{s+1} - \chi_{s+1} \alpha_s}{h_s} + C_0$ .

В зеркальных анастигматах коэффициент астигматизма  $C_0 = 0$ .

Для определения высоты  $h_2$  значения параметров из формул (1.8), подставляют в условие  $D_0 = 0$ .

$$2D_0 = \alpha_2 - \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{h_2} + \frac{\alpha_3 + \alpha_4}{h_3} + \alpha_4 - 1 = 0. \quad (1.9)$$

Исследование коэффициента кривизны  $D_0$  для различных значений  $\delta$  представлено в виде графиков на рис. 1.3.

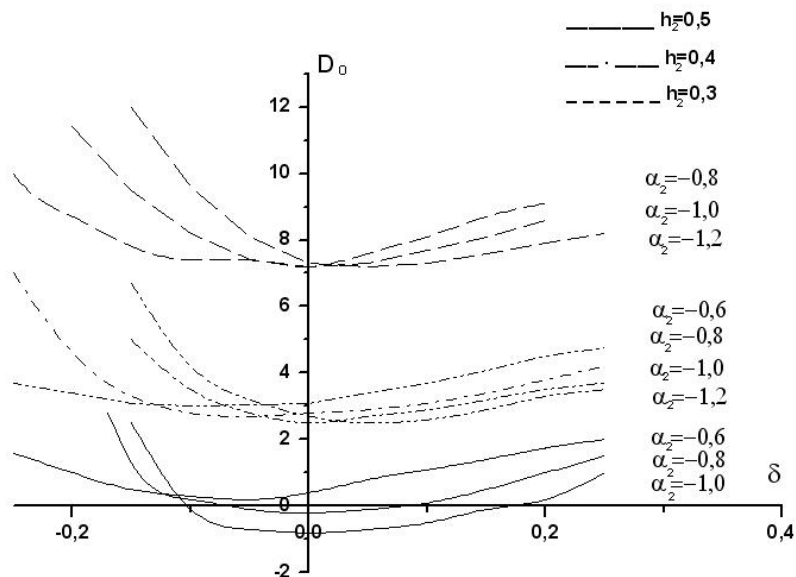


Рис. 1.3. Зависимость кривизны изображения от конструктивных параметров

По графикам осуществляют выбор параметров  $\alpha_2$  и  $h_2$ , используя формулу (1.9). Практический интерес представляют системы, в которых значения  $\alpha_2$ ,  $\delta$ ,  $d_1$  и  $d_2$  приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

#### Варианты зеркальных план-объективов

№	$\alpha_2$	$\delta$	$d_1$	$d_2$
1	-0,8	0,0544	-0,625	1,1020
2	-1,0	0,1611	-0,5	1,0348
3	-1,2	0,2182	-0,417	0,9775

Системы могут быть достаточно светосильными (значения углов  $\alpha_5$  невелики), например, для варианта №2  $\alpha_2 = -1,0$ ;  $\alpha_3 = 0,756315$ ;  $\alpha_4 = -1,650028$ ;  $\alpha_5 = -1,0$ . Коэффициент  $\eta = 0,5$ .

**Вторая модификация.** Положение плоскости изображения, которая совпадает с вершиной третьего зеркала или вынесена отно-

сительно ее на величину  $\Delta'$ , на рис. 1.2 обозначено  $F_{II}'$ . В отличие от первой модификации третье зеркало может менять свою форму от вогнутой до выпуклой, включая плоскую (планоидную).

При **эффективном проектировании** проводят исследования по выбору отрезка  $\delta$ . Более простые формулы параметрического расчета получены при  $\delta = 0$ . Используем формулы (1.8), когда параметры  $\alpha_2$ ,  $\alpha_4$  и  $h_3$  выражены через значения  $\alpha_3$  и  $h_2$ . Получим следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= -\frac{1-h_2}{h_2} \alpha_3; \\ \alpha_4 &= \frac{(1+\Delta+\Delta')\alpha_3-1}{1+\Delta'}; \\ h_3 &= -(1+\Delta+\Delta')\alpha_3. \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

Для схемы с третьим плоским зеркалом ( $\alpha_4 = -\alpha_3$ ) из формул (1.10) имеем

$$\left. \begin{aligned} \alpha_3 &= \frac{1}{2(1+\Delta')+\Delta}; \\ h_3 &= -\frac{1+\Delta+\Delta'}{2(1+\Delta')+\Delta}. \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

При выполненном условии Петцваля и заданном значении экранирования  $\eta = h_2$  величина  $\alpha_3$  является корнем квадратного уравнения  $A\alpha_3^2 + B\alpha_3 + h_2^2 = 0$ , где

$$A = (1+\Delta+\Delta')[\Delta h_2^2 + (1+\Delta')(1-3h_2+2h_2^2)];$$

$$B = [(1+\Delta')(4+\Delta+\Delta') - 2\Delta].$$

Решение уравнения дает два варианта схем, различающихся по высоте  $h_3$  – либо с большим вогнутым, либо с малым выпуклым

третьим зеркалом. Для объектива с третьим плоским зеркалом из формул (1.11) имеем

$$\alpha_3 = \frac{1}{2(1+\Delta')+\Delta}; \quad h_3 = -\frac{1+\Delta+\Delta'}{2(1+\Delta')+\Delta},$$

и вид квадратного уравнения  $h_2^2+3\alpha_3h_2-\alpha_3=0$ , решением которого является выражение

$$h_2 = \frac{1}{4(1+\Delta')+2\Delta}(-3 \pm \sqrt{17+8\Delta'+4\Delta}). \quad (1.12)$$

Знак «минус» перед корнем дает решение объектива с промежуточным изображением после первого зеркала ( $h_2 < 0$ ).

### 1.3. Абберационный расчет зеркальной системы

Коэффициенты основных монохроматических aberrаций III порядка в переменных Ланге представлены формулами:

$$\begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s; \\ K_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s S_s; \\ C_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} \frac{\chi_{s+1} \alpha_{s+1} - \chi_s \alpha_s}{h_s} - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} W_s S_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s S_s^2. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Вспомогательные величины  $S_s$ ,  $T_s$ ,  $P_s$ ,  $W_s$ , входящие в сводку (1.13), с учетом формул (1.1) и (1.3) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{(-1)^{s+2}}{4} (\Delta \alpha_s)^2 \sum \alpha_s; \\ T_s &= \frac{(-1)^{s+2}}{4} (\sum \alpha_s)^3; \\ W_s &= \frac{1}{2} \Delta \alpha_s \sum \alpha_s = \frac{1}{2} \Delta (\alpha_s)^2, \end{aligned} \quad (1.14)$$

для четырех зеркал формулы расчета даны в табл. 1.2, где дополнительно приведены формулы габаритного расчета конструктивных параметров (см. литературу [15]).

Таблица 1.2  
Относительные конструктивные параметры четырех зеркальных поверхностей и вспомогательные расчетные величины

	$h_s$	$r_s$	$d_s$	$S_s$	$T_s$	$P_s$	$W_s$
1	1,0	$\frac{2}{\alpha_2}$	$\frac{1-h_2}{\alpha_2}$	0	$-\frac{\alpha_2^3}{4}$	$-\frac{\alpha_2^3}{4}$	$-\frac{\alpha_2^2}{4}$
2	$1 - \alpha_2 d_1$	$\frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}$	$\frac{h_2 - h_3}{\alpha_3}$	$-\frac{d_1}{h_2}$	$\frac{(\alpha_3 + \alpha_2)^3}{4}$	$\frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{4} \cdot (\alpha_3 + \alpha_2)$	$\frac{\alpha_3^2 - \alpha_2^2}{2}$
3	$h_2 - \alpha_3 d_2$	$\frac{2h_3}{\alpha_3 + \alpha_4}$	$\frac{h_3 - h_4}{\alpha_4}$	$S_2 + \frac{d_2}{h_2 h_3}$	$-\frac{(\alpha_4 + \alpha_3)^3}{4}$	$-\frac{(\alpha_4 - \alpha_3)^2}{4} \cdot (\alpha_4 + \alpha_3)$	$\frac{\alpha_4^2 - \alpha_3^2}{2}$
4	$h_3 - \alpha_4 d_3$	$\frac{2h_4}{\alpha_5 + \alpha_4}$	-	$S_3 - \frac{d_2}{h_4 h_3}$	$\frac{(\alpha_5 + \alpha_4)^3}{4}$	$\frac{(\alpha_5 - \alpha_4)^2}{4} \cdot (\alpha_5 + \alpha_4)$	$\frac{1 - \alpha_4^2}{2}$

Коррекционными параметрами считают деформации поверхностей зеркальных систем; остальные параметры являются неполноценными: их использование может привести к конструктивно неосуществимой системе, дающей или мнимое изображение, или вообще не пропускающей свет на плоскость изображения. Условиями анастигматической коррекции являются  $B_0 = K_0 = C_0 = 0$ .

При заданных начальных условиях система уравнений (1.13) для зеркального анастигмата с двумя асферическими поверхностями ( $\sigma_2 \neq 0, \sigma_3 \neq 0$ ) описывается формулами:



$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 + \sum_{S=2}^4 h_S P_S + h_2 T_2 \sigma_2 + h_3 T_3 \sigma_3 = 0, \\ -\frac{1}{2} + \sum_{S=2}^4 h_S P_S S_S + \sum_{S=2}^3 h_S S_S T_S \sigma_S = 0, \\ -\alpha_2 + \frac{\alpha_3 + \alpha_2}{h_2} - \frac{\alpha_4 + \alpha_3}{h_3} - \alpha_4 + 1 = 0, \\ 2 \sum_{S=2}^4 S_S W_S = \sum_{S=2}^4 h_S S_S Q_S. \end{array} \right. \quad (1.15)$$

Умножая левую и правую части второго уравнения (1.15) на  $h_2 h_3$  и преобразуя третье уравнение, получим выражения для деформации третьего зеркала и высоты  $h_2$ , связанной с  $\eta$  по формуле (1.6):

$$\sigma_3 = \frac{-\frac{h_2 h_3}{2} + P_1 d_1 h_3 + P_3 d_2 h_3 - P_4 d_3 h_2 - P_4 d_2}{h_3 T_3 d_2};$$

$$h_2 = \frac{(\alpha_3 + \alpha_2) h_3}{(\alpha_2 + \alpha_4 - 1) h_3 + \alpha_3 + \alpha_4}. \quad (1.16)$$

Преобразуем последнее условие из системы (1.14) по частям.

$$2 \sum_{S=2}^4 S_S W_S = S_2 (1 - \alpha_2^2) + \frac{d_2}{h_2 h_3} (1 - \alpha_3^2) + \frac{d_3}{h_3} (1 - \alpha_4^2),$$

и  $\sum_{S=2}^4 h_S S_S Q_S = h_2 S_2^2 \sigma_2 T_2 + h_2 S_2^2 P_2 + h_3 S_3^2 \cdot T_3 \sigma_3 + h_3 S_3^2 P_3 - S_4^2 P_4.$

Приравняв эти части и выражая  $d_S$  ( $S = 1, 2, 3$ ) через  $h_2$  и  $h_3$ , имеем:

$$P_1 \frac{1}{h_2^2} \left( \frac{1-h_2}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{d_1}{h_2} - \frac{(1-h_2)(h_2-h_3)P_1}{\alpha_2 \alpha_3 h_2^2 h_3} + \frac{h_2-h_3}{2\alpha_3 h_2 h_3} - \frac{(h_3+1)^2}{\alpha_4^2 h_3^2} P_4 -$$

$$- \frac{(h_2-h_3)(h_3+1)P_4}{\alpha_3 \alpha_4 h_2 h_3^2} = -\frac{d_1}{h_2} + \frac{1-h_2}{\alpha_2 h_2} \alpha_2^2 + \frac{h_2-h_3}{\alpha_3 h_2 h_3} \alpha_3^2 + \frac{h_3+1}{\alpha_4 h_3} (1-\alpha_4^2)$$

Умножая последнее выражение на  $(h_2 h_3)^2$  и, подставив формулу для  $h_2$  из (1.16), получим параметрическое уравнение анастигматической коррекции четырехзеркального объектива:

$$h_3^2 \left[ a(\alpha_3 + \alpha_2)^2 - d(\alpha_3 + \alpha_2)(\alpha_2 + \alpha_4 - 1) + \frac{P_1}{\alpha_2} \left( \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_3} \right) (\alpha_2 + \alpha_4 - 1)^2 \right] +$$

$$+ h_3 \left[ b(\alpha_3 + \alpha_2)^2 + 2 \frac{P_1}{\alpha_2} \left( \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_3} \right) (\alpha_2 + \alpha_4 - 1)(\alpha_4 + \alpha_3) - \right.$$

$$\left. - d(\alpha_3 + \alpha_2)(\alpha_4 + \alpha_3) - e(\alpha_3 + \alpha_2)(\alpha_2 + \alpha_4 - 1) \right] + \quad (1.17)$$

$$+ \frac{P_1}{\alpha_2} \left( \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_3} \right) (\alpha_4 + \alpha_3)^2 - d(\alpha_3 + \alpha_2)^2 - e(\alpha_3 + \alpha_2)(\alpha_4 + \alpha_3) = 0.$$

Независимые переменные определяются формулами:

$$a = \frac{P_1}{\alpha_2^2} - \frac{P_4}{\alpha_4^2} + \alpha_2 - \frac{1}{\alpha_4} + \alpha_4, \quad e = \frac{P_1}{\alpha_2 \alpha_3} - \frac{P_4}{\alpha_3 \alpha_4},$$

$$b = \frac{P_1}{\alpha_2 \alpha_3} - \frac{P_4}{\alpha_3 \alpha_4} - \frac{2P_4}{\alpha_4^2} - \frac{1}{2\alpha_3} + \alpha_3 - \frac{1}{\alpha_4} + \alpha_4, \quad c = \frac{P_4}{\alpha_3 \alpha_4} + \frac{P_4}{\alpha_4^2},$$

$$d = \frac{2P_1}{\alpha_2^2} + \frac{P_1}{\alpha_2 \alpha_3} - \frac{P_4}{\alpha_3 \alpha_4} + \alpha_2 - \frac{1}{2\alpha_3} + \alpha_3, \quad h_3 \neq -\frac{(\alpha_4 + \alpha_3)}{\alpha_2 + \alpha_4 - 1}.$$

Переменные являются функциями взаимосвязи параметров:

$$\begin{cases} h_3 = f(\alpha_s, s = 2, 3, 4), \\ h_2 = f(h_3, \alpha_s, s = 2, 3, 4), \\ \sigma_2, \sigma_3 = f(h_2, h_3, \alpha_s, s = 2, 3, 4). \end{cases}$$

Решение кубических уравнений довольно трудоемкий процесс, осуществляемый в среде MathCAD.

Конструктивные параметры (мм) варианта с  $f' = -200$  мм даны в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Конструктивные параметры первой модификации  $\alpha_4 < \alpha_5$

Конструктивные параметры					
№ поверхности	$r$	$d$	I	II	III
			$\sigma_I$	$\sigma_{II}$	$\sigma_{III}$
1	-400,0	-100,0	0	-0,50472	-0,60042
2	-820,72	206,95	49,76	0	-9,49560
3	126,48	-86,95	-11,9943	-1,44354	-1,24099
4	150,94		-0,02280	-0,00367	0

Три основные монохроматические аберрации в этом варианте откорректированы деформациями на трех зеркальных поверхностях. Интересна система со вторым сферическим зеркалом, когда деформации на первое и третье зеркала перераспределены, а четвертое зеркало выполнено сферическим. Для коррекции аберраций 5-го и 7-го порядков вводят соответствующие коэффициенты.

При расчете объектива рассматриваются вопросы защиты плоскости изображения от лучей «паразитной» засветки. Для устранения постороннего света, отраженного только от первого и второго зеркал, в свободное пространство, образованное осевым и экранированным лучом (см. рис. 1.2) вводится блenda  $K$ . Для устранения постороннего света, попадающего на второе зеркало, минуя первое, а также лучей, многократно отраженных от других зеркал, не требуется введения специальных бленд.

## 1.4. Защита плоскости изображения от постороннего света и диаграммы виньетирования

Введение бленды показано на рис. 1.4, где дан ход нулевых лучей (крайнего луча  $l$  и луча  $l_1$ , ограничивающего экранированную часть) и даны необходимые обозначения.

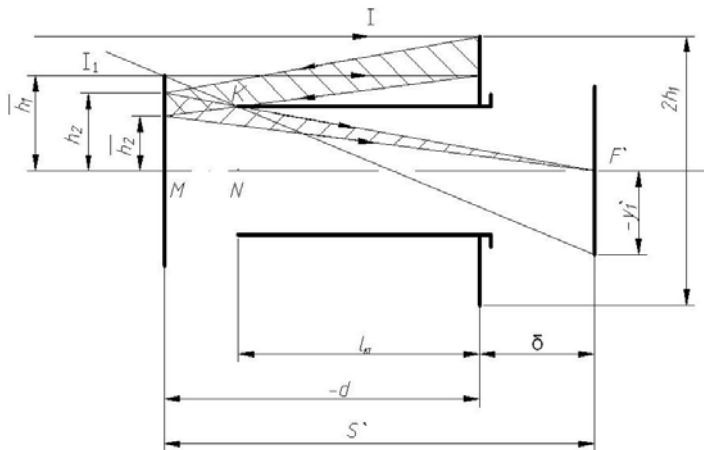


Рис. 1.4. Схема защиты плоскости промежуточного изображения

Опыт расчета бленд показывает, что трудность борьбы с вредными пучками света растет при увеличении поля зрения и уменьшается при малых  $D/f'$ . Причем уменьшение осевой длины приводит к увеличению углов, образуемых вредными потоками с оптической осью, что облегчает устранение вредных пучков.

**Формулы расчета бленд.** Воспользуемся алгоритмом габаритного и параметрического расчета бленд к классической системе, представленным в работе [16]. Расчет проведен при обычной нормировке для луча 1:  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_3 = 1$ .

Опасным лучом прямого света, попадающим на край изображения, будет являться луч, идущий по краю второго зеркала. Специальная бленда  $K$ , установленная в центральном отверстии главного зеркала, срежет его и другие возможные лучи постороннего света. Положение бленды определяют ее

координаты: высота  $h_K$  и длина  $l_K$  (относительно первого зеркала). Для случая  $h_2 = \eta$  имеем следующие пропорции:

$$\frac{h_K}{l_K + \delta} = \frac{h_2}{S'} = 1; \frac{\bar{h}_1 - h_K}{l_K} = \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_2}{-d}, \text{ откуда следует, что}$$

$$l_K = \frac{(\eta - \delta)^2}{\eta(1 - \eta) + \eta - \delta}, h_K = \frac{\eta^2(1 - \delta)}{\eta(1 - \eta) + \eta - \delta}. \quad (1.18)$$

Если луч прямой засветки засекает на фокальной плоскости отрезок  $y'_1$ , меньший половины линейного поля зрения объектива ( $-f' \operatorname{tg} \omega$ ), принимают дополнительные меры по защите изображения: вводят вторую бленду или увеличивают размер второго зеркала, что дает увеличение коэффициента  $\eta$ . Координаты точки  $K$  в новой бленде определяют из формул (1.18), где  $\eta = \bar{h}_1$ ,  $\bar{h}_2 = \eta h_2$ , тогда

$$l_K = \frac{(h_2 - \delta)(\eta - \delta)}{\eta(1 - h_2) + h_2 - \delta}, h_K = \frac{\eta h_2(1 - \delta)}{\eta(1 - h_2) + h_2 - \delta}.$$

Контроль правильности расчета размеров бленды проводят по формуле  $\frac{h_K - y'_1}{l_K + \delta} = \frac{\bar{h}_1 - y'_1}{S'}$ .

**Диаграммы виньетирования.** Диаграммы виньетирования строят для оценки виньетирования наклонных пучков лучей при заданном значении поля зрения. Они определяют действующее отверстие входного зрачка (площадь  $Q_\omega$ , заполняемая реальными лучами). Используем следующий алгоритм расчета диаграмм:

1) расчет положения и размеров изображений всех элементов, расположенных внутри или за системой (оправ зеркал, центральных отверстий в зеркалах, оправ бленд, экранов и т.д.), которых отражается посторонний свет в одно пространство (обычно в пространство предметов):

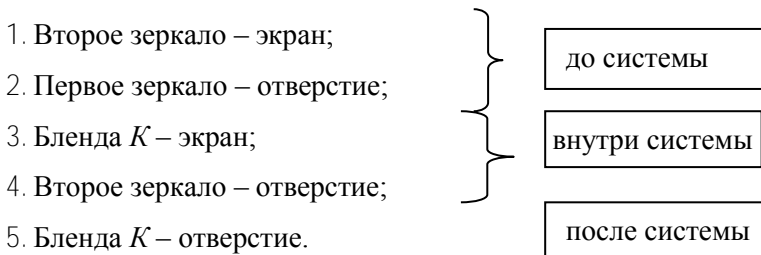
– передний отрезок  $S = \frac{rS'}{2S' - r}$  рассчитывается по формуле отрезков для зеркальных поверхностей [15];

– размер диафрагмы рассчитывается по формуле  $D = \frac{S \cdot D'}{S'}$ ;

2) построение и проецирование полученных изображений в плоскость входного зрачка с центром проекции в заданной внеосевой точке поля;

3) вычисление общей площади для всех проекций, которая определяет действующую площадь входного зрачка для заданного внеосевого пучка лучей.

В системе (рис. 1.2) по ходу светового (апертурного) луча встречаются:



Имеем последовательность формул для расчета:

– отрезка, определяющего положение изображения бленды  $K$  относительно второго зеркала  $S_2(K) = \frac{S_2'(K)r_2}{2S_2'(K) - r_2}$ ;

– положения этого изображения относительно первого зеркала  $S_1'(K) = S_2 - a$ ;

– отрезка, определяющего положение изображения бленды  $K$  в пространстве предметов  $S_1(K) = S_2 - a$ ;

– размера изображения светового отверстия бленды  $K$

$$h(K) = \frac{h_K}{\beta_{(K)}}, \text{ где } \beta_K = \beta_1\beta_2 = \frac{S_2'(K)}{S_2(K)} \cdot \frac{S_1'(K)}{S_1(K)}.$$

В результате проведенных численных расчетов для всех диафрагм и экранов получают схематический чертеж (рис. 1.5) расположения их изображений относительно входного зрачка.

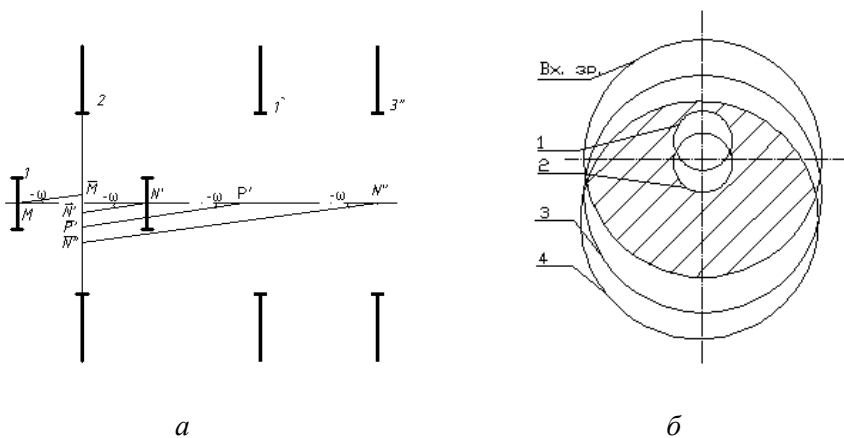


Рис. 1.5. Определение эффективного светового отверстия: *а* – схематический чертеж изображений бленд и экранов; *б* – диаграмма виньетирования для заданного угла  $\omega$

На рис. 1.5, *а* показаны следующие изображения: 3' – бленда К (экран); 3'' – бленда К (отверстие); 1' – второе зеркало (отверстие), а также 1 – второе зеркало (экран) и 2 – главное зеркало, совпадающее с входным зрачком системы. Контроль правильности построения графических изображений: световые диаметры отверстий и экранов не могут быть меньше  $D$ . В противном случае габаритный расчет выполнен неверно, т.е. неправильно оценена величина экранирования и неправильно сделан выбор входного зрачка. В результате проецирования изображений диаграмм и экранов в плоскость входного зрачка определяют действующую площадь зрачка по построенной диаграмме виньетирования (рис.1.5, *б*), на которой указаны: 1 – второе зеркало (экран); 2 – бленда К (экран); 3 – второе зеркало (отверстие); 4 – бленда К (отверстие).

## **2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА РАЗРАБОТКУ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА**

В качестве примера рассматривается техническое задание, составленное на расчет оптической системы приемного канала лазерного дальномера.

### **2.1. Цель разработки и наименование системы**

Целью разработки является габаритный и абберационный расчеты оптической системы, выпуск конструкторской документации.

Оптическая система должна обеспечивать:

- прием лазерного излучения с длиной волны 1570 нм, отраженного от цели, и его фокусировку на фоточувствительной площадке фотоприемника;
- спектральную фильтрацию фонового излучения.

### **2.2. Технические требования**

#### ***2.2.1. Технические требования к показателям назначения***

1. Длина волны принимаемого излучения 1570 нм.
2. Диаметр фоточувствительной площадки фотоприемника – 150 мкм.
3. Эффективный световой диаметр оптической системы должен быть в пределах 80–120 мм. Габаритный диаметр системы – не более 200 мм.
4. Угол поля зрения  $2\omega$  должен быть равен 3 мрад ( $0^{\circ}10'19''$ ).
5. Пропускание оптической системы на длине волны 1570 нм без учета пропускания интерференционного светофильтра должно быть не менее 0,8.
6. Оптическая система должна содержать интерференционный светофильтр с коэффициентом пропускания не менее 0,6 на длине волны 1570 нм.



7. Полуширина полосы пропускания  $\Delta\lambda_{0,5}$  интерференционного светофильтра должна быть не более 10 нм.

8. Область подавления интерференционного светофильтра должна составлять 400–500 нм и 1580–1600 нм. Пропускание в области подавления не должно превышать 0,5 %

9. Аберрационный кружок рассеяния на площадке фотоприемника должен быть не более 0,15 мм (86% энергии).

### ***2.2.2. Требования к конструкции***

1. Размер оптической системы от первой поверхности до плоскости фотоприемника должен быть минимальный.

2. Оптическая система должна иметь полевую диафрагму, обеспечивающую заданный угол поля зрения фотоприемника и исключаящую попадание наклонных пучков света на фоточувствительную площадку фотоприемника.

3. Задний рабочий отрезок должен быть не менее 40 мм.

### ***2.2.3. Требования к материалам***

1. Материалы, применяемые для отражающих и просветляющих покрытий, должны быть не дефицитными.

2. Материалы и покрытия должны быть устойчивы к условиям эксплуатации, хранения и транспортировки.

### ***2.2.4. Требования по живучести и стойкости к внешним условиям***

1. Оптическая система должна эксплуатироваться в воздушной среде нормального состава при температуре  $(-40)$ – $(+50)^\circ\text{C}$ , атмосферном давлении  $100 \pm 20$  кПа и относительной влажности 30–95%.

2. Лабораторные проверки оптической системы должны производиться при атмосферном давлении 80–120кПа.

### 3. РАСЧЕТ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ СИСТЕМ

#### 3.1. Типы линзовых компенсаторов

Для увеличения поля зрения двухзеркальных систем ставят компенсаторы аберраций. Они устанавливаются в параллельном или сходящемся пучке лучей при небольшом диаметре входного зрачка, а при больших диаметрах зрачка вводится корректор только в сходящемся пучке лучей. Линзовые компенсаторы используются в основном с системами из двух зеркал, расчет которых не представляет особых затруднений.

Большой группой зеркально-линзовых систем с компенсатором в параллельных пучках являются менисковые зеркально-линзовые системы Д.Д. Максудова. Основной менисковой системой, дающей высокое относительное отверстие, считается схема менискового Кассегрена. В ней исправляется сферическая аберрация, кома и хроматизм положения, кривизну поля и дисторсию корректируют введением линзы Пиацци–Смита, расположенной вблизи фокальной плоскости. Аналогом мениска является двухлинзовый афокальный компенсатор, расположенный перед большим зеркалом в параллельном ходе лучей (рис. 3.1, *а*) или асферические пластины (рис. 3.1, *б*).

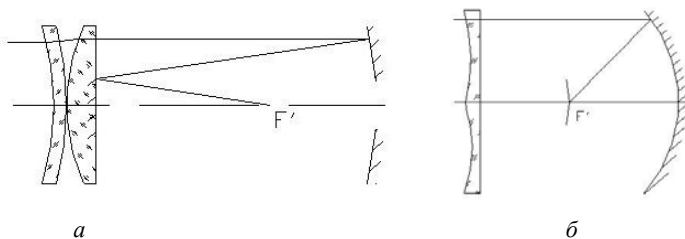


Рис. 3.1. Зеркально-линзовые схемы: *а* – система Слефогга-Рихтера с удобным положением фокуса; *б* – система Шмидта

Преимущество зеркально-линзовой перед чисто зеркальной аналогичной системой кроме возможности осуществления большего поля зрения состоит в герметичности конструкции. Такие системы

могут обеспечить хорошую светосилу и поле зрения в несколько градусов. Дальнейшее повышение поля до  $10\text{--}12^\circ$  приводит к необходимости размещения в заднем отрезке коррекционных линз.

Известны модификации схемы Кассегрена, когда малое зеркало выполняют в виде линзы Манжена; другой способ усложнения схемы – это помещение линзовых коррекционных элементов в заднем отрезке объектива (схема Флюгге). Иногда вместо сферической употребляют параболическую форму зеркал, что позволяет увеличить светосилу оптики.

Широко применяется в системах ДЗЗ схема Ричи-Кретьена, состоящая из двух асферических зеркал и линзового корректора полевых aberrаций (рис. 3.2).

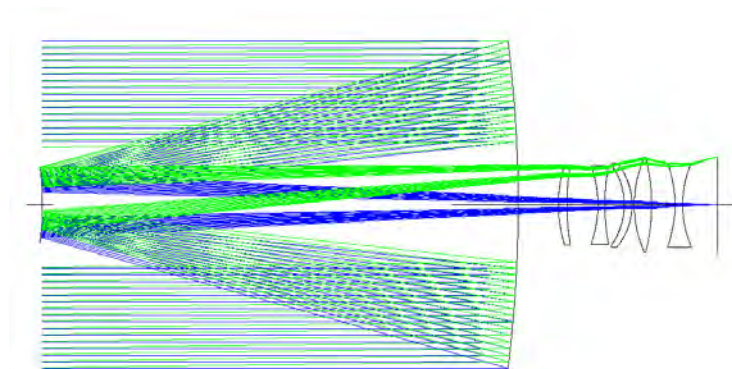


Рис. 3.2. Оптическая схема зеркально-линзовой системы без промежуточной плоскости изображения

Объектив позволяет обеспечить большой диаметр входного зрачка, большое фокусное расстояние и соответственно разрешение на местности при небольших габаритах и массе. Угловое поле зрения не превышает  $1\text{--}1,5^\circ$  (ограничение из-за центрального экранирования, при увеличении которого резко падает МТФ). Зеркально-линзовые системы могут быть построены в концепции ДО с проекционным корректором полевых aberrаций (ПК), которые обладают существенными достоинствами:

- позволяют исключить наружную бленду,

- увеличить угловое поле зрения объектива благодаря дополнительному увеличению полевого корректора,
- значительно упрощаются задачи по борьбе с паразитной засветкой и вредным рассеянным светом и
- облегчает разведение полей зрения при многоспектральной съемке.

### 3.2. Пример расчета зеркально-линзового объектива

Рассмотрим теоретические положения по расчету реальной системы согласно ТЗ, приведенного в разделе 2. Целесообразно использовать для этой цели зеркально-линзовую систему с афокальным двухлинзовым компенсатором, расположенным в параллельном пучке лучей, и использовать дополнительную линзовую систему для переноса изображения.

Кроме условий ТЗ часто используют дополнительные исходные данные для расчета данной зеркально-линзовой системы, к примеру, такие величины:

- 1) фокусное расстояние  $f' = 300$  мм, которое отвечает габаритным и конструктивным требованиям;
- 2) относительное отверстие  $D/f' = 1/3$ ;
- 3) вынос плоскости изображения зеркальной части объектива относительно главного зеркала  $\delta = -50$  мм (определяется габаритными и конструктивными требованиями);
- 4) коэффициент центрального экранирования  $\eta = 0,3$ .

С конструктивной точки зрения рационально использовать в качестве малого зеркала последнюю поверхность компенсатора.

#### 3.2.1. Расчет базовой зеркальной системы

В схеме используется объектив по схеме Кассегрена, состоящий из двух сферических зеркал. Расчет проводится, когда афокальный компенсатор принимается бесконечно тонким, а положение входного зеркала,  $S_p = 0$  (рис. 3.3).

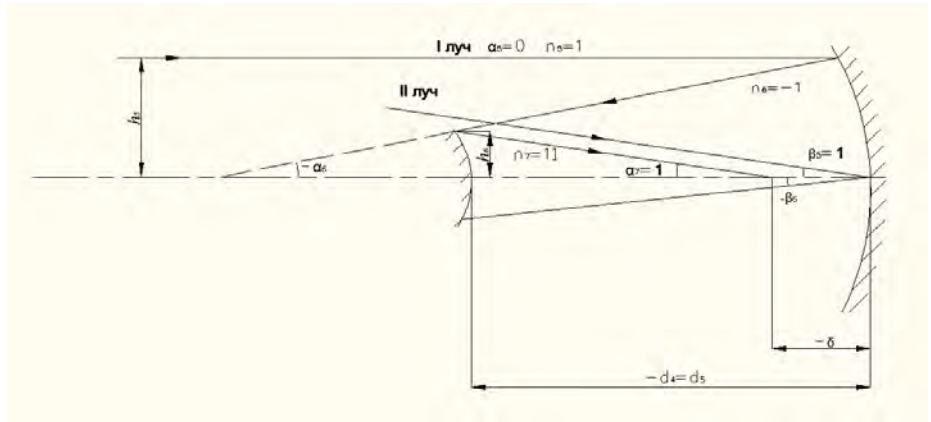


Рис. 3.3. Схема расчета зеркальной системы

Тогда, учитывая условия нормировки, имеем ограничения:

$$h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = h_5 = f' = 1; \alpha_1 = \alpha_5 = 0; \alpha_7 = 1;$$

$$n_1 = n_3 = n_5 = n_7 = 1; n_6 = -1; n_2 = n_4 = n.$$

$$\text{Далее } \alpha_6 = \frac{h_5}{S_5'} = \frac{h}{f_5'} = \frac{2}{r_5}, \text{ а } h_6 = (\delta - d_5)\alpha_7 = \delta - d_5.$$

Целесообразно задавать перед началом расчета коэффициент центрального экранирования (обычно  $\eta = 0,3$ ). При

$$h_5 = 1, \quad \eta = h_6.$$

$$\text{Из рис. 3.3 } \alpha_6 = \frac{h_6}{S_6}, \text{ где } S_6 = S_5' - d_5, \text{ поэтому } \alpha_6 = \frac{2h_6}{r_5 - 2d_5}.$$

Из вышеприведенных выражений получим формулу для радиуса вогнутого зеркала:

$$r_5 = \frac{2d_5}{1 - h_6}. \quad (3.1)$$

Уравнение 1-го параксиального луча для выпуклого зеркала

$$n_7 \alpha_7 - n_6 \alpha_6 = h_6 \frac{n_7 - n_6}{r_6}, \text{ откуда } 1 - \alpha_6 = \frac{2h_6}{r_6}.$$

Заменяя  $\alpha_6$  его значением, получим

$$r_6 = \frac{2h_6 r_5}{r_5 + 2}. \quad (3.2)$$

Поскольку заданными величинами являются  $\eta$  и  $\delta$ , имеем сводку формул:

$$\alpha_6 = \frac{1 - \eta}{\delta - \eta}; \quad r_5 = \frac{2(\delta - \eta)}{1 - \eta}; \quad r_6 = \frac{2\eta}{1 + \alpha_6}. \quad (3.3)$$

Высоты 2-го параксиального луча  $y_5$  и  $y_6$  определим при нормировке  $\beta_1 = \beta_5 = 1; y_1 = y_2 = y_3 = y_4 = 0; l = -1$ :

$$y_5 = y_4 - d_4 \beta_5 = -d_4; \quad y_6 = y_5 - d_5 \beta_6 = d_5 - \eta d_4. \quad (3.4)$$

Для контроля вычислений рассчитывают ход 1-го параксиального луча через зеркальный объектив для определения эквивалентного фокусного расстояния, используя формулы

$$S_5' = f_5' = \frac{r_5}{2}; \quad S_6 = S_5' - d_5; \quad f_6' = \frac{r_6}{2}; \quad S_6' = \frac{S_6 \cdot f_6'}{S_6 - f_6'}.$$

Правильность расчета дает выражение  $f' = \frac{S_5' \cdot S_6'}{S_6} = 1,000$ .

### 3.2.2. Расчет параметров $P_K$ и $W_K$ линзового компенсатора

Параметры  $P_K$  и  $W_K$  определяют из условий исправления сферической аберрации и комы третьего порядка (1.13). Имеем выражения

$$P_{\text{КОМ.}} + \sum_{S=5}^{S=6} h_S P_S = P_{\text{КОМ.}} + P_5 + h_6 P_6 = 0. \quad (3.5)$$

$$W_{\text{КОМ.}} + \sum_{S=5}^{S=6} W_S + \sum_{S=5}^{S=6} y_S P_S = W_{\text{КОМ.}} + W_5 + W_6 + y_5 P_5 + y_6 P_6 = 0.$$

Вспомогательные параметры и величины, входящие в формулы (3.5), находятся из известных равенств [13]

$$P_S = \left( \frac{\alpha_{S+1} - \alpha_S}{v_{S+1} - v_S} \right)^2 (\chi_{S+1} \alpha_{S+1} - \chi_S \alpha_S); \quad (3.6)$$

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

Для зеркального объектива эти величины определяют, используя сводку равенств (1.14) и формулы из таблицы 1.2 для двух зеркал:

$$P_5 = -\frac{\alpha_6^3}{4}; P_6 = \frac{(1 - \alpha_6)^2 (1 + \alpha_6)}{4}; \quad (3.7)$$

$$W_5 = \frac{\alpha_6^2}{2}; W_6 = \frac{1 - \alpha_6^2}{2}.$$

С учетом (3.4) и (3.6) по формулам (3.5) находим

$$P_{\text{КОМ.}} = -P_5 - h_6 P_6 = \frac{\alpha_6^3}{4} - \frac{h_6(1-\alpha_6)^2(1+\alpha_6)}{4};$$

$$W_{\text{КОМ.}} = -W_5 - W_6 - y_5 P_5 - y_6 P_6 =$$

$$= -\frac{\alpha_6^2}{2} - \frac{1-\alpha_6^2}{2} - \frac{d_4 \alpha_6^3}{4} - \frac{(d_5 - \eta \cdot d_4)(1-\alpha_6)^2(1+\alpha_6)}{4}. \quad (3.8)$$

Из условия  $r_4 = r_6$  определим  $\alpha_4 = \frac{n-1}{nr_6}$ .

Считаем компенсатор (рис. 3.4) бесконечно тонким ( $d_1 = d_2 = d_3 = 0$ ), состоящим из двух линз из одного материала.

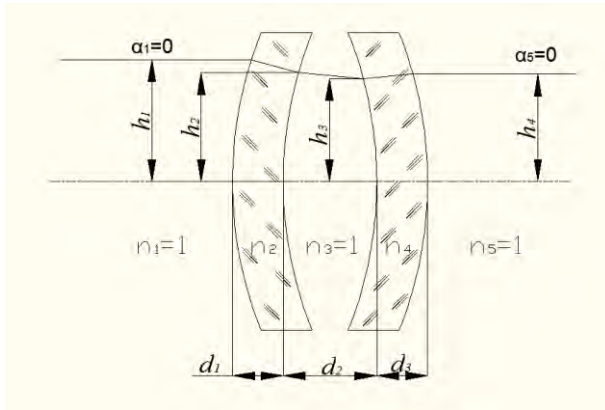


Рис. 3.4. Схема расчета компенсатора

Условием афокальности является выражение  $\alpha_5 = \alpha_1$ , причем  $\alpha_1 = 0$ , тогда

$$W_{\text{КОМ.}} = \frac{1+\chi}{1-\chi}(\alpha_4 - \alpha_2)\alpha_3;$$

$$P_{\text{КОМ.}} = \frac{\alpha_3}{(1-\chi)^2}(\alpha_4 - \alpha_2)[(2+\chi)\alpha_3 - (2\chi+1)(\alpha_4 + \alpha_2)] \quad (3.9)$$



Используя сводку формул (3.8), найдем

$$\alpha_2 = \alpha_4 - \frac{(n-1)W_{\text{КОМ.}}}{(n+1)\alpha_3};$$

$$P_{\text{КОМ.}} = \frac{n^2\alpha_3}{(n-1)^2} \left[ \frac{(n-1)W_{\text{КОМ.}}}{(n+1)\alpha_3} \right] \left[ \frac{2n+1}{n}\alpha_3 - \left( \frac{2+n}{n} \right) \left( 2\alpha_4 - \frac{(n-1)W_{\text{КОМ.}}}{(n+1)\alpha_3} \right) \right].$$

Тогда

$$P_{\text{КОМ.}}\alpha_3 = \frac{nW_{\text{КОМ.}}(2n+1)\alpha_3^2}{(n-1)(n+1)} - \frac{2nW_{\text{КОМ.}}(2+n)\alpha_4 - \alpha_3}{(n-1)(n+1)} + \frac{nW_{\text{КОМ.}}^2(2+n)}{(n+1)^2\alpha_3}.$$

Разделив уравнение на  $\frac{nW_{\text{КОМ.}}}{(n-1)(n+1)}$ , получим квадратное уравнение, из которого находим угол  $\alpha_3$ :

$$(2n+1)\alpha_3^2 - \alpha_3 \left[ \frac{P_{\text{КОМ.}}(n^2-1)}{nW_{\text{КОМ.}}} + 2\alpha_4(2+n) \right] + \frac{W_{\text{КОМ.}}(2+n)(n-1)}{n+1} = 0.$$

Обычно выбирают меньшие значения угла, которые дают большие значения радиусов кривизны. Угол  $\alpha_2$  определяют из решения линейного уравнения  $\alpha_2 = \alpha_4 - \frac{(n-1)W_{\text{КОМ.}}}{(n+1)\alpha_3}$ .

Для контроля правильности решения уравнений и определения углов  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  определяют параметры компенсатора  $P_{\text{КОМ.}}$  и  $W_{\text{КОМ.}}$ , где  $P_{\text{КОМ.}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$ ,  $W_{\text{КОМ.}} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$ , используя формулы (3.6).

### 3.2.3. Определение радиусов кривизны линз компенсатора

На первом этапе расчета считаем компенсатор тонким, т.е.  $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 1$ , тогда

$$r_{S\text{min}} = \frac{n_{S+1} - n_S}{n_{S+1}\alpha_{S+1} - n_S\alpha_S}. \quad (3.10)$$

Для перехода к линзам компенсатора конечной толщины необходимо учитывать ТЗ на конкретный расчет (размер входного зрачка  $D$  и т.д.). Входной зрачок совпадает с бесконечно тонким компенсатором, поэтому  $D_{\text{CB}} = D$ . Полный диаметр  $D_{\text{П}} = D_{\text{CB}} + k$  (мм), где  $k$  – припуск для крепления детали [17, с.167].

Для определения действительных радиусов кривизны бесконечно тонких линз необходимо величину, выраженную в относительных единицах, умножить на значение  $f'$  (в мм):  $r_{\text{Smin}} \cdot f'$ . Далее вы-

числяют стрелки прогиба:  $k_S = r_S \pm \sqrt{r_S^2 - \frac{D_{\text{П}}^2}{4}}$ . Толщину первой

положительной линзы принимаем  $d_1 = 0,1 D_{\text{П}}$  (мм). Так как линзы «касаются» по краю, то величина воздушного промежутка:  $d_2 = k_3 - d_{\text{min}2} - k_2$  и можно принять  $d_{\text{min}2} = 0,2$  мм.

Для линз конечной толщины рассчитывают высоты  $h_s$  при  $f' = 1$  по формулам, приведенным в таблице 1.2 и определяют радиусы кривизны по формуле  $r_S = h_S r_{\text{Smin}}$ . Обычно  $r_4 = r_6$ , поэтому меняем величину  $d_5$  для сохранения фокусного расстояния си-

стемы:  $d_5 = \frac{2h_4(r_5 - r_6) - r_5 r_6}{4h_4}$ , причем  $d_5 = -d_4$ .

Объектный модуль запишется в виде

$$\begin{array}{lll} r_1 = & d_1 = & K8 \\ r_2 = & d_2 = & \\ r_3 = & d_3 = & K8 \\ r_4 = & d_4 = & \\ r_5 = & d_5 = & \\ r_6 = & & \end{array}$$

Для контроля вычислений рассчитывают параметры 1-го параксиального луча при  $\alpha_1 = 0$  и вычисляют значение фокусного

расстояния по формуле  $f' = \frac{h_5}{\alpha_7}$ . Погрешность расчета (порядка 1%) может появиться в результате округления величин.

### 3.3. Расчет системы переноса изображения

Система переноса изображения, состоящая из двух двухлинзовых компонентов, нужна для формирования параллельного пучка лучей и последующей фокусировкой его в плоскость фотоприемника. Эквивалентная система из зеркально-линзового объектива и первого компонента является телескопической.

#### 3.3.1. Расчет первого компонента

Расчет первого двухлинзового несклеенного компонента проводят в обратном ходе с учетом исправления сферической аберрации и комы. Такие компоненты обладают дополнительным параметром  $r_4$  и при определенных стеклах имеют три коррекционных параметра (три радиуса кривизны), следовательно, можно получить три заданных значения  $F$ ,  $W$ ,  $C$  или  $\pi$ . В качестве переменных, определяющих конструктивные элементы двухлинзовой системы, примем оптическую силу первой линзы  $\varphi_1$  и кривизны  $\rho_1$  и  $\rho_3$  первой и третьей поверхностей. Остальные конструктивные элементы определяются из формул

$$\begin{aligned}\rho_2 &= \rho_1 - \frac{\varphi_1}{n_2 - 1}; \\ \rho_4 &= \rho_3 - \frac{\varphi_2}{n_4 - 1}.\end{aligned}\tag{3.11}$$

Для вычисления параметров  $\rho_1$  и  $\rho_3$  при данном выборе переменных воспользуемся формулами [18]:

$$\begin{aligned}
P = & \left(\frac{n_2}{n_2-1}\right)^2 \varphi_1^3 - \frac{2n_2+1}{n_2-1} \varphi_1^2 \rho_1 + \frac{2+n_2}{n_2} \varphi_1 \rho_1^2 + \left(\frac{n_4}{n_4-1}\right)^2 \varphi_2^3 + \\
& + \frac{3n_4+1}{n_4-1} \varphi_1 \varphi_2^2 + \frac{3n_4+2}{n_4} \varphi_1^2 \varphi_2 - \left(\frac{2n_4+1}{n_4-1} \varphi_2^2 + \frac{4(n_4+1)}{n_4} \varphi_1 \varphi_2\right) \rho_3 + \\
& + \frac{2+n_4}{n_4} \varphi_2 \rho_3^2;
\end{aligned}$$

$$W = \frac{n_2 \varphi_1^2}{n_2-1} + \frac{n_4}{n_4-1} \varphi_2^2 + \frac{2n_4+1}{n_4} \varphi_1 \varphi_2 - \frac{n_2+1}{n_2} \varphi_1 \rho_1 - \frac{n_4+1}{n_4} \varphi_2 \rho_3.$$

Задача об определении системы, удовлетворяющей наперед величинам  $F$  и  $W$ , сводится к совместному решению двух уравнений: квадратного и линейного относительно неизвестных  $\rho_1$  и  $\rho_3$ .

Подставим выражение для  $\rho_3$

$$\rho_3 = \frac{\left(\frac{n_2 \varphi_1^2}{n_2-1} + \frac{n_4}{n_4-1} \varphi_2^2 + \frac{2n_4+1}{n_4} \varphi_1 \varphi_2 - \frac{n_2+1}{n_2} \varphi_1 \rho_1 - W\right) n_4}{\varphi_2 (n_4+1)}$$

в первое уравнение и решим его относительно  $\rho_1$ . Имеем

$$\begin{aligned}
P = & \left(\frac{n_2}{n_2-1}\right)^2 \varphi_1^3 - \frac{2n_2+1}{n_2-1} \varphi_1^2 \rho_1 + \frac{2+n_2}{n_2} \varphi_1 \rho_1^2 + \left(\frac{n_4}{n_4-1}\right)^2 \varphi_2^3 + \\
& + \frac{3n_4+1}{n_4-1} \varphi_1 \varphi_2^2 + \frac{3n_4+2}{n_4} \varphi_1^2 \varphi_2 - \left(\frac{2n_4+1}{n_4-1} \varphi_2^2 + \frac{4(n_4+1)}{n_4} \varphi_1 \cdot \varphi_2\right) \times
\end{aligned}$$

$$\times \left( \frac{\left( \frac{n_2 \varphi_1^2}{n_2 - 1} + \frac{n_4}{n_4 - 1} \varphi_2^2 + \frac{2n_4 + 1}{n_4} \varphi_1 \varphi_2 - \frac{n_2 + 1}{n_2} \varphi_1 \rho_1 - W \right) n_4}{\varphi_2 (n_4 + 1)} \right) +$$

$$+ \frac{2 + n_4}{n_4} \varphi_2 \left( \frac{\left( \frac{n_2 \varphi_1^2}{n_2 - 1} + \frac{n_4}{n_4 - 1} \varphi_2^2 + \frac{2n_4 + 1}{n_4} \varphi_1 \varphi_2 - \frac{n_2 + 1}{n_2} \varphi_1 \rho_1 - W \right) n_4}{\varphi_2 (n_4 + 1)} \right)^2.$$

Нужно учесть, что при апланатической коррекции  $P=0$ . По условиям ТЗ в системе одна рабочая длина волны, поэтому хроматизм положения исправлять не нужно, а значит оптические силы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  являются свободными параметрами. Выбрав марки стекол, к примеру, Ф1 и К8 (показатели преломления для длины волны  $\lambda = 1570$  нм – 1,587974 и 1,499928 соответственно), проводят анализ значений кривизны поверхностей, которые должны быть минимизированы. Приемлимой величиной можно считать  $\varphi_1 = 1,3$ , тогда  $\varphi_2 = 1 - \varphi_1 = -0,3$ .

Для выбранных параметров имеем

$$\rho_1^2 - 4,2550304\rho_1 + 4,1225716 = 0;$$

$$\rho_{11} = 1,4921025; \rho_{12} = 2,7629278.$$

Из двух значений  $\rho_1$  выбирают меньшее по абсолютной величине, для которого  $\rho_3 = 1,266061$ , далее из формул (3.11) получим  $\rho_2 = 2,7629281; \rho_4 = -0,6659746$  и определим углы  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  для 1-го параксиального луча (рис. 3.5) по формуле

$$\alpha_{S+1} = \frac{[\rho_S(n_{S+1} - n_S) + n_S \alpha_S]}{n_{S+1}}. \quad (3.12)$$

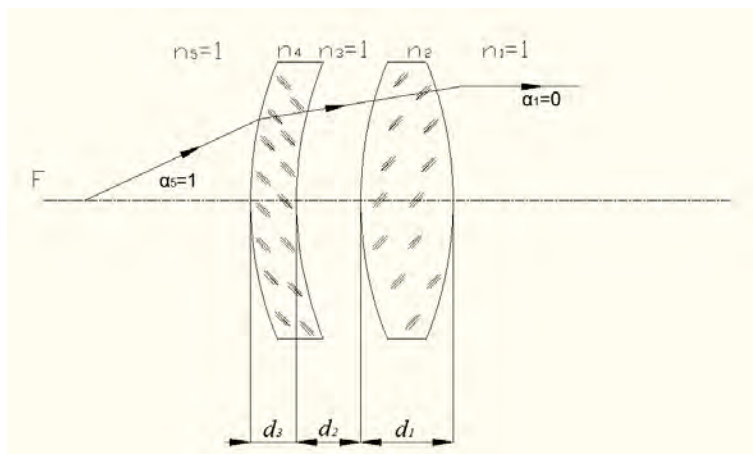


Рис. 3.5. Схема расчета первого компонента системы переноса изображения

При нормировке  $\alpha_1 = 0, h_1 = f'_1 = 1, \alpha_5 = 1$  имеем

$$\alpha_2 = \frac{[\rho_1(n_2 - n_1) + n_1 \alpha_1]}{n_2} = 0,5524759; \alpha_3 = 1,3; \alpha_4 = 0,4447285.$$

Для контроля правильности решения уравнений и определения кривизны  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$  и углов  $\alpha_1 - \alpha_4$  рассчитывают параметры  $F$  и  $W$ , воспользовавшись формулами (3.9), проверяя их суммарное значение:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 0.$$

Далее проводим расчет радиусов кривизны бесконечно тонкого компонента по формуле (3.10) в относительных величинах и действительных значений для заданного фокусного расстояния в миллиметрах.

Выбирают толщины линз с учетом графического построения. В заданном варианте при  $f'_1 = 40$  мм оптимальными являются толщины линз  $d_1 = 3,5$  мм и  $d_3 = 1,8$  мм, а значение воздушного промежутка  $d_2 = 2$  мм. Уточненные толщины и радиусы поверхностей линз определяются по методике, приведенной в разделе 3.2.3, когда определяют высоты 1-го параксиального луча и радиусы кривизны линз компонента конечной толщины по формуле  $r_S = h_S r_{S\min}$ .

Для контроля вычислений рассчитывают параксиальный луч из бесконечности через реальную систему для  $\alpha_1 = 0$  и  $h_1 = f' = 40$ . Результатом контроля являются величины  $f_1 = -\frac{h_1}{\alpha_5} = -40$  мм,  $S_F = -\frac{h_4}{\alpha_5} = -34,6658$  мм (необходимо помнить, что система рассчитывалась в обратном ходе). Приведем значения объектного модуля в миллиметрах:

$$\begin{array}{ll} r_1 = 52,053 & K8 \\ r_2 = 28,013 & d_1 = 1,8 \\ r_3 = 52,952 & d_2 = 2 \\ r_4 = -26,808 & d_3 = 3,5 \quad \Phi 1 \end{array}$$

$$f'_1 = 40 \text{ мм}, S_F = -34,67 \text{ мм}, S^*_F = 39,907 \text{ мм}.$$

Дополнительно проводят габаритный расчет компонента для реально заданных значений оптических характеристик: углового поля зрения объектива  $2\omega$ , фокусного расстояния объектива  $f'_{\text{об}}$  мм, коэффициента виньетирования (можно принять  $k_{\omega} = 1$ ), относительного отверстия объектива  $D/f'_{\text{об}}$ , положения входного зрачка (к примеру,  $t = 0$ ). Алгоритм формул следующий:

$$\text{– диаметр полевой диафрагмы: } D_{\text{ПД}} = -2 f'_{\text{об}} t g \omega \text{ мм};$$

– угловое поле компонента  $tg\omega' = D_{\text{пд}} / 2 f'_1$ ;

– диаметр выходного зрчка  $D = \frac{f'_1 D}{f'_{\text{об}}}$  мм;

– диаметр  $D_1$  компонента  $D_1 = 2l' tg\omega' + 2m'$ , где  $2m' = k_{\omega} D$  – поперечный меридиональный размер наклонного пучка лучей в пространстве изображений,  $l'$  – положение выходного зрчка;

– положение выходного зрчка  $l' = \frac{t + f'_{\text{об}}}{\Gamma^2_T} + S'_{F'}$ , где ви-

димое увеличение  $\Gamma_T = -\frac{f'_{\text{об}}}{f'_1}$ .

Отметим, что второй компонент располагается на расстоянии  $l'$  от первого и его диаметр равен диаметру выходного зрчка телескопической системы  $D_2 = D$ .

### 3.3.2. Расчет второго компонента

Расчет второго двухлинзового компонента проводится аналогично, но в прямом ходе. Его фокусное расстояние может быть другим, к примеру,  $f'_2 = 50$  мм. Марки используемых стекол – Ф1 и К8. Оптические силы компонентов можно принять равными  $\varphi_1 = 1,2$ ,  $\varphi_2 = -0,2$

**Методика расчета:** на первом этапе по формуле (3.10) находим кривизны поверхностей этого компонента с учетом исправления сферической аберрации и комы; далее находим углы 1-го паракиального луча по формуле (3.12) при нормировке:  $\alpha_1 = 0$ ,  $h_1 = f'_2 = 1$ ,  $\alpha_5 = 1$  и проводят контроль вычислений кривизны и углов по формулам (3.9) с целью определения сумм  $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$  и  $W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$ .

Следующим этапом является определение радиусов кривизны бесконечно тонкого компонента и линз конечных толщин с учетом заданного фокусного расстояния и графического построения



компонента (здесь оптимальными являются толщины линз  $d_1 = 3$  мм,  $d_3 = 1,8$  мм при воздушном промежутке  $d_2 = 1,5$  мм).

Обязательно выполняют контроль вычислений путем расчета 1-го паракиального луча из бесконечности через реальную систему. Получают расчетный модуль объектива с системой переноса изображения, приведенной на рис. 3.6.

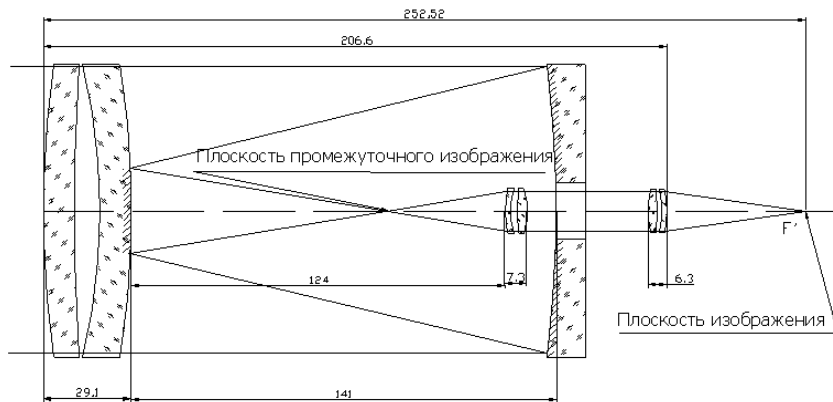


Рис. 3.6. Оптическая схема зеркально-линзовой системы приемного канала лазерного дальномера с промежуточной плоскостью изображения

Таким образом, в результате габаритного и проектного абберационного расчетов определяют все конструктивные параметры оптической системы (радиусы линз, осевые расстояния между ними, марки стекол), которые обеспечивают необходимое качество изображения. Проверочный абберационный расчет и оценка качества изображения выполняют на ПЭВМ с помощью компьютерных программ [19, 20].

## ЛИТЕРАТУРА

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: Анализ центрированных оптических систем. – 105 с.
2. <http://www.zemax.com>.
3. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю.Г. Якушенков. – М.: Машиностроение, 1989. – 384 с.
4. Попов, Г.М. Современная астрономическая оптика / Г.М. Попов. – Л.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 192 с.
5. Ган, М.А. Асферические поверхности в оптических приборах / М.А. Ган, Н.И. Куликовская // Оптико-механическая промышленность. – 1990. – №11. – С. 3–12.
6. Михельсон, Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета / Н.Н. Михельсон. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1995. – 384 с.
7. Чупраков, С.А. Зеркальные объективы, основанные на применении центрально-симметричных planoидных зеркал / С.А. Чупраков // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 9. – С. 45–49.
8. [www.gts.iac.es](http://www.gts.iac.es).
9. Гоголев, Ю.А. Работы государственного оптического института им. С.И. Вавилова в области создания космических объективов / Ю.А. Гоголев, М.А. Ган // Оптический журнал – 2007. – Т. 74, № 10. – С. 16–33.
10. Mikhel'son, N.N. Three-mirror anastigmats / N.N. Mikhel'son // Optica Acta. – 1982. – Vol. 29, No. 7. – P. 979–983.
11. Korsch, D. Anastigmatic three-mirror telescope / D. Korsch // Appl. Opt. – 1977. – Vol.16, No 8. – P. 2074–2077.
12. Русинов, М.М. Композиция нецентрированных оптических систем / М.М. Русинов. – СПб.: СПб.ГУ ИТМО - Ива, 2004. – 252 с.
13. Запрягаева, Л.А. Расчет и проектирование оптических систем / Л.А. Запрягаева, И.С. Свешникова. – М.: Логос, 2000. – 581 с.
14. Meinel, A. Two-stage optics / A.Meinel, M. Meinel //Optical Engineering. – 1992. – Vol. 31, No 11. – P. 2271–2279.
15. Артюхина, Н.К. Теория и расчет оптических систем: учеб. пособие: в 2 ч. / Н.К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2004. – Ч. 1. – 134 с.

16. Артюхина, Н.К. Теория оптических систем и техническая оптика: метод. пособие / Н.К. Артюхина; М-во В и ССО БССР. – Минск: БПИ, 1985. – 21 с.
17. Справочник конструктора опτικο-механических приборов / под ред. М.Я. Кругера, В.А. Панова. – Л.: Машиностроение, 1968. – 760 с.
18. Слюсарев, Г.Г. Расчет оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 639 с.
19. Артюхина, Н.К. Компьютерное проектирование оптических систем: учеб-метод. пособие: в 2 ч. / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик. – Минск: БНТУ, 2007. – Ч. 1: Анализ центрированных оптических систем.– 105 с.
20. Артюхина, Н.К. Компьютерное проектирование оптических систем: учеб-метод. пособие: в 2 ч. / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик. – Минск: БНТУ, 2007. – Ч. 2: Оптимизация центрированных оптических систем. – 62 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНЫХ СИСТЕМ</b> .....	5
1.1. Схемные решения и методика расчета .....	5
1.2. Габаритный расчет зеркальной системы .....	8
1.3. Аберрационный расчет зеркальной системы .....	15
1.4. Защита плоскости изображения от постороннего света и диаграммы виньетирования .....	20
<b>2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА РАЗРАБОТКУ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА</b> .....	24
2.1. Цель разработки и наименование системы .....	24
2.2. Технические требования .....	24
2.2.1. Технические требования к показателям назначения .....	24
2.2.2. Требования к конструкции .....	25
2.2.3. Требования к материалам .....	25
2.2.4. Требования по живучести и стойкости к внешним условиям .....	25
<b>3. РАСЧЕТ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ СИСТЕМ</b> .....	26
3.1. Типы линзовых компенсаторов .....	26
3.2. Пример расчета зеркально-линзового объектива .....	28
3.2.1. Расчет базовой зеркальной системы .....	28
3.2.2. Расчет параметров $P_K$ и $W_K$ линзового компенсатора ..	31
3.2.3. Определение радиусов кривизны линз компенсатора .....	33
3.3. Расчет системы переноса изображения .....	35
3.3.1. Расчет первого компонента .....	35
3.3.2. Расчет второго компонента .....	40
<b>Список литературы</b> .....	42

Учебное издание

АРТЮХИНА Нина Константиновна

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Учебно-методическое пособие  
по выполнению курсовой работы  
для студентов специальности 1-38 01 02  
«Опτικο-электронные и лазерные приборы и системы»

---

Подписано в печать 10.12.2009.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 2,61. Уч.-изд. л. 2,04. Тираж 150. Заказ 1193.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65, 220013, Минск.