

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.31; 681.7.067.23

## ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТИВ ТЕЛЕСКОПА БЕЗ ЭКРАНИРОВАНИЯ

© 2010 г. А. П. Грамматин, доктор техн. наук; А. А. Сычева

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,  
механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: aneta-84@mail.ru

Представлены результаты исследования характеристик трехзеркальной оптической системы без экранирования, запатентованной сотрудниками Государственного оптического института им. С.И. Вавилова, и приведена методика ее расчета, позволяющая вычислить конструктивные элементы при заданных фокусном расстоянии, заднем отрезке и диафрагменном числе.

**Ключевые слова:** трехзеркальная оптическая система без экранирования, фокусное расстояние, задний отрезок, диафрагменное число.

Коды OCIS: 080.4035

Поступила в редакцию 14.09.2009

Все классические осесимметричные зеркальные и зеркально-линзовые системы имеют существенный недостаток – экранирование входного зрачка, что приводит к снижению качества изображения. Влияние центрального экранирования заключается в перераспределении энергии внутри дифракционного изображения точки: уменьшается диаметр диска Эри и увеличивается концентрация энергии в первом дифракционном кольце. Так при центральном экранировании  $\varepsilon = 0,4$  по диаметру диск Эри уменьшается примерно на 13% [1] по сравнению с таковым в идеальной оптической системе без экранирования. Концентрация энергии в диске Эри при этом уменьшается с 84 до 77%, а концентрация энергии в первом дифракционном кольце возрастает с 7 до 12%. Качество изображения протяженных объектов, характеризуемое частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ), заметно снижается на средних пространственных частотах. Например, при указанном выше экранировании и пространственной частоте  $\omega = 0,35\omega_{\text{пр}}$  (где  $\omega_{\text{пр}}$  – предельная частота, равная  $\omega_{\text{пр}} = 2A'/\lambda$ , а  $A'$  – выходная числовая апертура,  $\lambda$  – длина волны) коэффициент передачи контраста (КПК) падает с 0,54 до 0,40. В таблице показаны изменения КПК в зависимости от коэффициента центрального экранирования  $\varepsilon$ .

Здесь  $\omega$  – пространственная частота, при которой происходит наибольшее падение КПК,  $T_\vartheta$  – КПК при наличии экранирования,  $T$  – КПК при отсутствии экранирования.

Рассмотрим двухзеркальные и трехзеркальные схемы объективов.

На рис. 1 представлена схема двухзеркального объектива (система Кассегрена или Ричи–Кретьена).

Объектив Кассегрена состоит из вогнутого параболоидального и выпуклого гиперболоидального зеркал [2]. В объективе исправлена только сферическая aberrация, а величина отступления от условия изопланатизма  $\eta$  определяется по формуле  $\eta = 6,25/K^2$ , где  $K$  – диафрагменное число. Улучшенный вариант системы Кассегрена представляет собой объектив Ричи–Кретьена, в котором оба зеркала гиперболоидальные [3]. В этом объективе скорректированы сферическая aberrация и кома, но оста-

Зависимость КПК от коэффициента центрального экранирования  $\varepsilon$

$\varepsilon$	$\omega/\omega_{\text{пр}}$	$T_\vartheta/T$
0,3	0,45	0,79
0,4	0,35	0,59
0,5	0,45	0,52

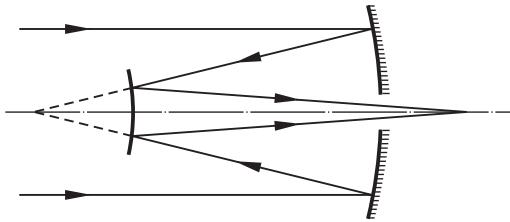


Рис. 1. Схема двухзеркального объектива.

ется неисправлением астигматизмом, который и ограничивает поле изображения. Центральное экранирование в этих системах составляет примерно  $\varepsilon = 0,3\text{--}0,4$ .

Особый интерес представляют трехзеркальные системы, в которых отсутствует экранирование входного зрачка [4]. Такой эффект может быть достигнут только путем децентрирования оптической системы. Так в 1988 году Куком и Лэси Ж. была запатентована система под названием “Отражательный оптический триплет с действительным входным зрачком” [5] (рис. 2).

Оптическая система является внеосевой и децентрированной как по апертуре, так и по полу. Первое и третье зеркала – внеосевые, второе зеркало – осевое. Поверхности всех трех зеркал асферические: первое – гиперболоид, второе – эллипсоид, третье – сплюснутый сфериод. В объективе действительный входной зрачок, расположенный перед оптической системой. Апертурная диафрагма совпадает с входным зрачком. Поэтому отсутствует отклонение пучка как функции поля, так как апертуры для всех угловых полей являются сопряженными с входным зрачком. Относительное отверстие системы находится в диапазоне от 1:4 до 1:3, а поле изображения, представляющее собой щель (рис. 2) – от 1 до 20°.

Разработки трехзеркального объектива без экранирования начались в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова еще в 90-е г.г. ХХ в., но по определенным причинам были приостановлены и продолжились лишь в 2005–2006 г.г. В результате был рассчитан и изготовлен объектив с относительным отверстием 1:3,5, угловым полем 2°, с телескопическим ходом лучей и задним расстоянием от вершины выпуклого зеркала до изображения, равным  $0,12f''$ .

Этот объектив [6] (рис. 2) состоит из вогнутого гиперболоидального зеркала 1, выпуклого сферического зеркала 2 и вогнутого зеркала 3, имеющего форму сплюснутого сфероида. Оптическая

система является центрированной, имеющей общую оптическую ось. Для устранения экранирования первое и третье зеркала имеют форму сегментов. С целью упрощения изготовления зеркал, а также облегчения сборки и юстировки эти зеркала заключены в общую цилиндрическую оправу, а их вершины совпадают. Апертурной диафрагмой служит оправа сферического зеркала. Она находится в фокусе третьего зеркала, благодаря чему достигается телескопический ход лучей в пространстве изображений.

Рассмотрим методику расчета этого объектива, позволяющую вычислить конструктивные параметры системы при заданном фокусном расстоянии  $f'$ , диафрагменном числе –  $K$ , удалении плоскости изображения от последней поверхности  $l$  или от вершины выпуклого зеркала –  $s'$ .

Исходными условиями для разработки методики расчета являются

условие совпадения вершин первого и третьего зеркал

$$d_1 = -d_2,$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – расстояния между зеркалами,

условие устранения кривизны изображения

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0,$$

где  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – оптические силы 1, 2 и 3 компонента соответственно.

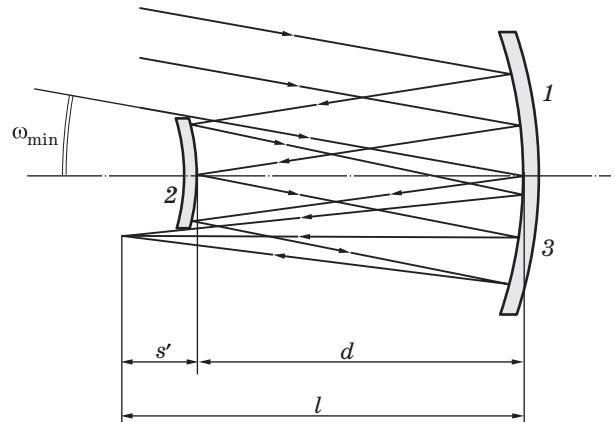


Рис. 2. Схема трехзеркального объектива.

1 – положительное вогнутое первое зеркало,  
2 – отрицательное выпуклое второе зеркало,  
3 – положительное вогнутое третье зеркало;  
 $s'$  – расстояние от вершины зеркала 2 до плоскости изображения,  $d$  – расстояние между зеркалами 2 и 1, 3,  $l = s' + d$  – расстояние от последнего зеркала 3 до плоскости изображения,  $\omega_{\min}$  – минимальный угол наклона внеосевого пучка лучей.

Расчет объектива может быть выполнен двумя способами.

1. Исходными данными являются  $f'$ ,  $K$  и  $x = l/f'$ .

Диаметры зеркал и расстояние между ними вычисляются по формулам (1) и (2)

$$D_1 = f'/K, D_2 = d/K, D_3 = 2\tan\omega_{\min}l, \quad (1)$$

$$d = [2 - (3 - x)^{1/2}]f'. \quad (2)$$

Минимальный угол наклона внеосевого пучка лучей

$$\tan\omega_{\min} = 1/(2K). \quad (3)$$

Радиусы зеркал

$$r_1 = [2z/(z-1)]f', r_2 = [2z/(z-2)]f', \\ r_3 = -2zf', \quad (4)$$

где  $z = d/f'$ .

2. Исходными данными являются  $f'$ ,  $K$  и  $y = s'/f'$ .

Удаление плоскости изображения от последней поверхности системы

$$1 = [y + 1,5 - (1,25 - y)^{1/2}]f'. \quad (5)$$

Диаметры зеркал, расстояние между зеркалами, радиусы и минимальный угол наклона внеосевого пучка лучей определяются по формулам (1)–(4).

Более удобным является второй способ определения габаритов системы, так как в исходных данных непосредственно указывается  $s'$ .

Чтобы избежать виньетирования третьим зеркалом в объективе, должно выполняться неравенство

$$f' - s' \geq d \text{ или } 1 - y \geq z. \quad (6)$$

В результате, было получено, что  $y \leq 0,5$ .

Основным критерием оценки качества изображения системы является среднеквадратичное отклонение волновой аберрации внеосевого пучка лучей, которое не должно превышать  $0,071\lambda$  (критерий Марешала) [7]. При исследовании свойств объектива системы, не удовлетворяющие этому условию, исключались и, в результате, диапазон значений  $y$  был сужен до  $0,25 \leq y \leq 0,4$ .

Объектив работает внеосевым полем (рис. 3). Это позволяет получить исправленное кольцевое поле в зоне, ограниченной двумя окружностями с радиусами  $Y_{\min}$  и  $Y_{\max}$ , являющимися минимальными и максимальными рабочими полями. В системе в пределах исправленного поля работа

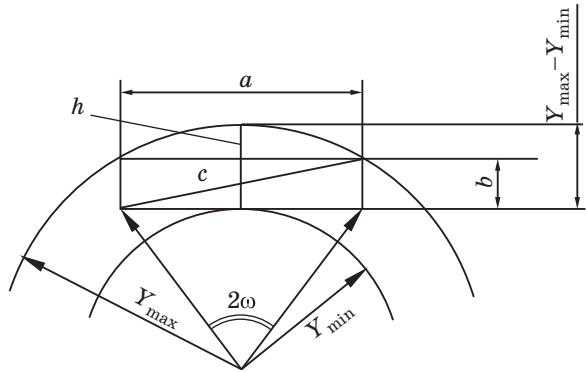


Рис. 3. Внеосевое поле.

ведется прямоугольным полем, вписанным в кольцо с соотношением сторон 4:3.

На основании того, что  $a/b = 4/3$ ,  $Y_{\max} - Y_{\min} = b + h$ ;  $\tan\omega = c/(2f')$  и  $h = Y_{\max} - (Y_{\max}^2 - a^2/4)^{1/2}$  (уравнение сегмента), было получено

$$a = \{-12Y_{\min} + 8[(13/4)Y_{\max}^2 - Y_{\min}^2]^{1/2}\}/13. \quad (7)$$

Зная  $a$ , легко определить  $b$  и  $c$ .

Коррекционный расчет объектива выполнялся с помощью программного комплекса САРО. Критерием качества изображения служило число Марешала [7] – среднеквадратичное отклонение волновой аберрации  $w_{cr} \leq 0,071$  для внеосевых пучков лучей. Осуществлялась оптимизация волновых аберраций, в качестве коррекционных параметров использовались коэффициенты деформации первого и третьего зеркал, а также смещение плоскости установки. Максимальный угол наклона внеосевого пучка лучей  $\tan\omega_{\max}$  и соответствующий ему размер рабочего поля системы  $Y'_{\max}$  получены подбором. Значения  $\tan\omega_{\max}$  и  $Y'_{\max}$  увеличивались до тех пор, пока среднеквадратичное отклонение волновой аберрации внеосевого пучка лучей не начнет превышать  $0,071\lambda$ .

В результате многочисленных расчетов было получено, что при работе в видимой области спектра при фокусном расстоянии 250–1000 мм и диафрагменных числах 3,5–5, при угловых полях  $2\omega \leq 5,5^\circ$  объектив рассматриваемого типа обладает дифракционно-ограниченным качеством изображения.

Кроме того, установлено, что при диафрагменных числах  $K \geq 10$  третье зеркало объектива может быть выполнено сферическим. Так например, при  $f' = 1300$  мм, диаметре входного зрачка  $D = 100$  мм трехзеркальный объектив с одним гиперболоидальным зеркалом обладает

полем изображения дифракционного качества  $160 \times 120$  мм, что соответствует угловому полю по диагонали кадра  $2\omega \approx 9^\circ$ .

Общим недостатком всех трехзеркальных объективов без центрального экранирования является превышение размеров первого и третьего зеркал по отношению к диаметру входного зрачка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение (Л. О.), 1989. С. 34–39.
  2. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение (Л. О.), 1975. С. 323.
  3. Kingslake R. Optical system design. Orlando, Florida: Academic Press, Inc., 1983. P. 479.
  4. Лебедева Г.И., Гарбуль А.А. Перспективные аэрокосмические зеркальные объективы // Оптический журнал. 1994. № 8. С. 57–62.
  5. Cook, Lacy G. Reflective optical triplet having a real entrance pupil // Патент США № 4.733.955. 1988.
  6. Грамматин А.П., Грязнов Г.М., Стариченко-ва В.Д. Трехзеркальная оптическая система без экранирования // Патент РФ № 2.327.194. 2006.
  7. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. Дифракционная теория и влияние когерентности света. М.: Изд-во “Мир”, 1964. С. 153–199.
-