

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, λ – длина волны) коэффициент передачи контраста (КПК) падает с 0,54 до 0,40. В таблице показаны изменения КПК в зависимости от коэффициента центрального экранирования ε .

Здесь ω – пространственная частота, при которой происходит наибольшее падение КПК, T_{ε} – 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 параболического и выпуклого гиперболического зеркал [2]. В объективе исправлена только сферическая аберрация, а величина отступления от условия изопланатизма η 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 гиперболические [3]. В этом объективе скорректированы сферическая аберрация и кома, но оста-

Зависимость КПК от коэффициента центрального экранирования ε

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

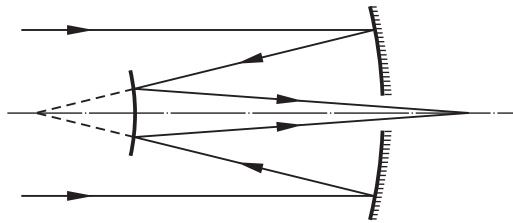


Рис. 1. Схема двухзеркального объектива.

ется неисправленным астигматизм, который и ограничивает поле изображения. Центральное экранирование в этих системах составляет примерно $\varepsilon = 0,3-0,4$.

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 полю. Первое и третье зеркала – внеосевые, второе зеркало – осевое. Поверхности всех трех зеркал асферические: первое – гиперболоид, второе – эллипсоид, третье – сплюснутый сфероид. 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. XX 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 телецентрическим 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 сфероиды. 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 телецентрический 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 зеркала

$$d_1 = -d_2,$$

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.

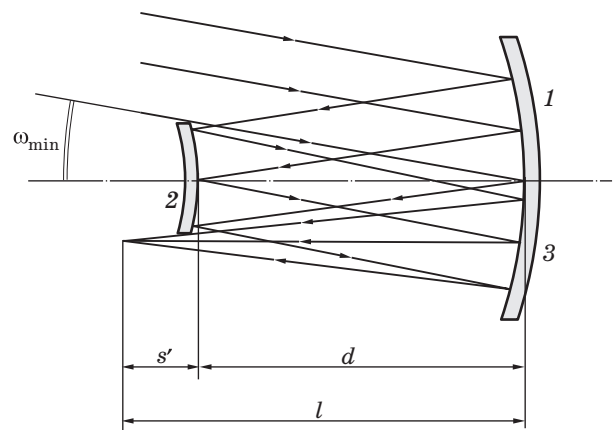


Рис. 2. Схема трехзеркального объектива. 1 – положительное вогнутое первое зеркало, 2 – отрицательное выпуклое второе зеркало, 3 – положительное вогнутое третье зеркало; s' – расстояние от вершины зеркала 2 до плоскости изображения, d – расстояние между зеркалами 2 и 1, 3, $l = s' + d$ – расстояние от последнего зеркала 3 до плоскости изображения, ω_{\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)

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

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

Минимальный угол наклона внеосевого пучка лучей

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

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 Марешаля) [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

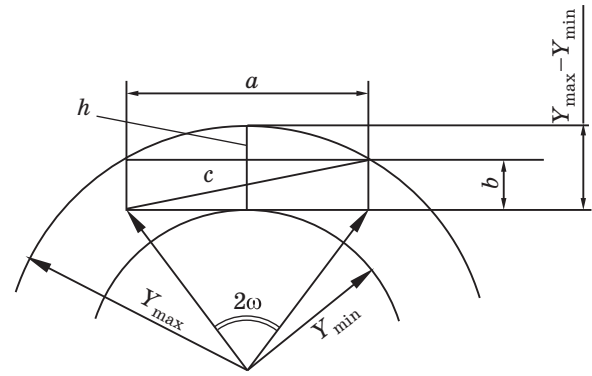


Рис. 3. Внеосевое поле.

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

На основании того, что $a/b = 4/3$, $Y_{\max} - Y_{\min} = b + h$; $\operatorname{tg}\omega = c/(2f')$ 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 Марешаля [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 $\operatorname{tg}\omega_{\max}$ и соответствующий ему размер рабочего поля системы Y'_{\max} получены подбором. Значения $\operatorname{tg}\omega_{\max}$ 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 160×120 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., Стариченкова 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.