

## СИСТЕМА ИЗ ДВУХ СФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ С ДВОЙНЫМ ОТРАЖЕНИЕМ

© 2005 г. Н. К. Артюхина, канд. техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: art49@mail.ru

Представлен концентрический объектив, состоящий из двух сферических зеркал. Оптическая схема объектива обеспечивает процесс повторного отражения пучка световых лучей от обоих зеркал. Рассмотрено несколько вариантов расчета, в которых отсутствуют четыре аберрации.

Коды OCIS: 080.2740.

Поступила в редакцию 03.02.2005.

## Введение

Одно из направлений в вычислительной оптике – поиск новых схемных решений различных оптических систем с улучшенными характеристиками – определяется интенсивным развитием оптической отрасли, развитием новых технологий и исследований. Для решения широкого круга задач оптического приборостроения требуются зеркальные объективы, обладающие рядом существенных преимуществ по сравнению с линзовыми и зеркально-линзовыми (возможность работы в широкой области спектра, увеличение входной апертуры, сокращение габаритов и уменьшение массы прибора).

## Схемное решение объектива

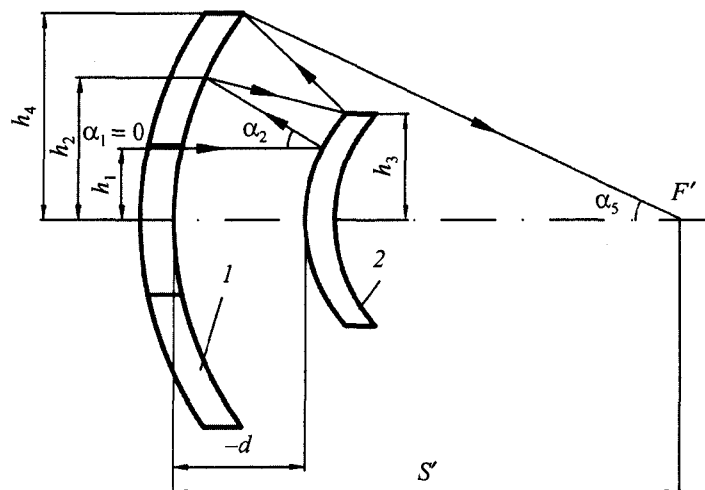
В данной работе рассматривается новое схемное решение зеркального концентрического объектива [1], полученное в результате дальнейшего исследования, проводимого нами в области зеркальных объективов с четырьмя отражениями [2]. Интерес к оптическим системам, составленным из концентрических компонентов, объясняется возможностью

расчета и изготовления систем с ценными свойствами – большой светосилой в сочетании со значительным полем зрения [3].

Предлагаемый объектив можно рассматривать как усовершенствованную схему Боуэна [4, 5]. Как известно, этот анастигмат, состоящий из двух концентрических зеркал, имеет своим недостатком большие габариты: длина его в два раза превышает фокусное расстояние, а диаметр вогнутого зеркала более чем в четыре раза превосходит диаметр первого зеркала. В объективе Боуэна конструктивные параметры определены из условия отсутствия сферической аберрации, а задняя главная плоскость проходит через центр кривизны обоих зеркал.

На рисунке представлена схема рассматриваемого объектива, состоящего из двух сферических зеркал с четырьмя отражениями от них. Вогнутое зеркало 2 установлено от выпуклого 1 на расстоянии, равном разности радиусов зеркал, и имеет центральное отверстие для прохождения света со стороны пространства предметов. Конструктивные параметры системы связаны следующими соотношениями:

$$r_1 = r_3, r_2 = r_4, -d = -d_1 = d_2 = -d_3, r_1 - r_2 = d. \quad (1)$$



Концентрический объектив из двух сферических зеркал с двойным отражением.

Оптическая схема объектива обеспечивает процесс повторного отражения пучка световых лучей от обоих зеркал. Использование двойного отражения позволяет значительно уменьшить габариты вторичного зеркала, а также вынести плоскость изображения за пределы оптической системы. Последнее преимущество дает возможность размещения перед плоскостью изображения сканирующих элементов, фильтров, различных приемников излучения и т. д.

### Габаритный расчет

Рассмотрим расчет объектива, вводя условия масштаба (все обозначения даны в работе [6]):

$$\alpha_1 = 0, \alpha_5 = 1, h_1 = 1,0, f' = 1,0. \quad (2)$$

В результате расчета углов  $\alpha_5$  и высот  $h_5$  нулевого луча на четырех зеркальных поверхностях имеем сводку формул для расчета радиусов:

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2}, r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}, r_3 = \frac{2h_3}{\alpha_3 + \alpha_4}, r_4 = \frac{2h_4}{\alpha_4 + 1}, \quad (3)$$

а также осевых расстояний  $d$  объектива:

$$d_1 = \frac{1 - h_2}{\alpha_2}, d_2 = \frac{h_2 - h_3}{\alpha_3}, d_3 = \frac{h_3 - h_4}{\alpha_4}. \quad (4)$$

Используя условие концентричности системы и формулы (3), получим уравнение

$$\frac{2}{\alpha_2} = \frac{\alpha_2 + \alpha_3 + h_2(\alpha_2 - \alpha_3)}{\alpha_2(\alpha_2 + \alpha_3)},$$

откуда определим параметр  $h_2$ :

$$h_2 = \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{\alpha_2 - \alpha_3}. \quad (5)$$

Далее находим формулы для остальных высот  $h_5$ :

$$h_3 = \frac{\alpha_3 + \alpha_4}{\alpha_2}, \quad (6)$$

$$h_4 = \frac{\alpha_4 + 1}{\alpha_2 - \alpha_3}. \quad (7)$$

Из условия (1) и формулы (6) можно составить новое равенство для параметра  $h_3$ :

$$h_3 = \frac{2\alpha_3 + \alpha_2}{\alpha_2}. \quad (8)$$

Учитывая (6) и (8) при  $\alpha_2 \neq 0$ , имеем

$$\alpha_4 = \alpha_3 + \alpha_2. \quad (9)$$

Из решения уравнения

$$\frac{2\alpha_3}{\alpha_2(\alpha_2 - \alpha_3)} = \frac{2\alpha_3^2 + \alpha_2}{\alpha_2(\alpha_2 - \alpha_3)(\alpha_2 + \alpha_3)}$$

определяем, что угол  $\alpha_3 = 0,5$ . Поэтому выражение (9) преобразуется к виду

$$\alpha_4 = \alpha_2 + 0,5. \quad (10)$$

Тогда параметр  $\alpha_2$  определяет радиусы зеркал, а также габариты рассматриваемой системы. Имеем следующую сводку формул:

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2}, r_2 = \frac{4}{2\alpha_2 - 1}, \quad (11)$$

$$h_2 = \frac{2\alpha_2 + 1}{2\alpha_2 - 1}, h_3 = \frac{1 + \alpha_2}{\alpha_2}, h_4 = \frac{3 + 2\alpha_2}{2\alpha_2 - 1}.$$

### Коррекция аберраций

Из свойств зеркальных концентрических систем известно, что радиус кривизны поверхности изображения равен фокусному расстоянию ( $D_0 - C_0 = 1$ ), а кома, астигматизм и дисторсия в них отсутствуют [7]. Необходимо устранить только сферическую аберрацию, для исправления которой в оптической системе имеется коррекционный параметр – угол  $\alpha_2$ . В области Зейделя коэффициент сферической аберрации третьего порядка при этом равен нулю; при сферической форме зеркал коэффициент деформации  $\sigma_5 = 0$ , поэтому

$$B = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^5 h_s P_s = 0. \quad (12)$$

Параметры  $P_s$  определяются следующими формулами:

$$P_1 = -\frac{\alpha_2^3}{4}, P_2 = \frac{(1 - 2\alpha_2)^2}{32}(1 + 2\alpha_2), \quad (13)$$

$$P_3 = -\frac{\alpha_2^2}{4}(\alpha_2 + 1), P_4 = \frac{(1 - 2\alpha_2)^2}{32}(3 + 2\alpha_2).$$

С учетом сводки формул (13) выражение (12) преобразуется в квадратное уравнение  $4\alpha_2^2 - 2\alpha_2 - 5 = 0$ . Решение уравнения дает два варианта схемного решения объектива, различающихся по углу  $\alpha_2$ . Один из корней приводит к схеме с отрицательным значением угла  $\alpha_2$ , которая не представляет практического интереса. Положительная величина угла  $\alpha_2$  приведена в табл. 1, где указаны углы  $\alpha_5$  и высоты  $h_5$  нулевого луча рассматриваемой зеркальной системы.

**Таблица 1.** Расчетные значения параметров нулевого луча по поверхностям

№ поверхности	Значения параметров	
1	$\alpha_2 = 1,395644$	$h_1 = 1,0$
2	$\alpha_3 = 0,5$	$h_2 = 2,116502$
3	$\alpha_4 = 1,895644$	$h_3 = 1,711615$
4	$\alpha_5 = 1$	$h_4 = 3,233030$

**Таблица 2.** Значения конструктивных и абберационных характеристик концентрической зеркальной системы

Номер варианта	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм	$f'$ , мм	$D$ , мм	$2\omega$ , град	$\delta g'$ , мм	$\eta$ , %	$z'_s = z'_m$ , мм	$\Delta y'$ , мм
1	71,65	111,65	50	50	10	0,0633	0,0002	-0,27	-0,041
2	143,3	223,3	100	50	10	0,0032	0,0000	-0,54	-0,082
3	214,95	334,95	150	50	10	0,0006	0,0000	-0,81	-0,093
4	286,6	446,6	200	50	10	0,0002	0,0000	-1,08	-0,095

### Анализ конструктивных параметров и экранирования

Учитывая (1) и (11), получим численные приведенные значения радиусов зеркал  $r_1 = r_3 = 1,433$ ;  $r_2 = r_4 = 2,233$ ; расстояния между зеркалами  $d = -0,8$  и заднего фокального отрезка системы  $S' = h_4 = 3,233$ . Условие концентричности  $r_1 - r_2 = d = -0,8$  при этом выполняется.

Результаты расчета конструктивных данных и абберационных характеристик (в миллиметрах) нескольких вариантов зеркальной концентрической системы даны в табл. 2. Для различных фокусных расстояний  $f'$  указаны: радиусы зеркал  $r_1$  и  $r_2$ , диаметр входного зрачка  $D$  и угловое поле  $2\omega$ , значения поперечной сферической абберации  $\delta g'$ , неизопланатизма  $\eta$ , кривизны изображения  $z'_s$  и  $z'_m$  и поперечной абберации внеосевого пучка  $\Delta y'$ .

В исследуемой системе осевой пучок экранируется краем выпуклого зеркала (см. рис. 1). Значения параметров, необходимые для оценки центрального экранирования, приведены в табл. 1, а коэффициент экранирования

$$\eta = \frac{h_3}{S' + d}. \quad (14)$$

Потери света в объективе из-за экранирования значительны – порядка 50% по площади осевого пучка, но это допустимо для светосильных систем.

### Заключение

Система обладает весьма совершенным исправлением сферической абберации: все варианты рассчитанных систем имеют малую поперечную сферическую абберацию. В рассчитанном объективе отсутствуют кома, астигматизм и дисторсия.

Габариты системы значительно меньше, чем у системы Боуэна: поперечные размеры уменьшены в полтора раза, а продольные – в 2,5 раза при одинаковом значении фокусного расстояния. Объектив достаточно светосильный и обеспечивает увеличенное угловое поле зрения. Поле зрения системы ограничивается кривизной поверхности изображения и может достигать  $15^\circ$  и более в зависимости от допустимого виньетирования. Конструкция объектива позволяет защитить плоскость изображения от постороннего света, а выполнение объектива только из зеркальных элементов исключает хроматические абберации, что позволяет использовать его в широком спектральном диапазоне. Такая система может найти применение как в астрофизике, так и в различных других областях науки и техники – в спектроскопии, в рентгеновской технике.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Артюхина Н.К., Константинов Д.В. Зеркальный объектив с четырьмя отражениями // Патент РФ № 4111, 2001.
2. Чуриловский В.Н., Кудрина Н.К. О некоторых типах четырехзеркальных объективов // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1977. Т. 20. № 7. С. 93–97.
3. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 382 с.
4. Попов Г.М. Современная астрономическая оптика. М.: Наука, 1988. С. 81–84.
5. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. С. 111–112.
6. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и аббераций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 312 с.
7. Попов Г.М. Концентрические оптические системы и их применение в оптическом приборостроении. М.: Наука, 1969. 135 с.