

Н. К. АРТЮХИНА, А. В. БОГАТКО

## ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТИВ С ЧЕТЫРЬМА ОТРАЖЕНИЯМИ

Рассматривается двухзеркальный объектив с двойным отражением от каждой из поверхностей, состоящий из двух сферических зеркал с равными радиусами кривизны. Приведен математический аппарат для расчета системы, ее габаритные и аберрационные характеристики, исследована зависимость коэффициента экранирования от конструктивных параметров объектива.

**Ключевые слова:** объектив, выпуклое зеркало, вогнутое зеркало, аберрации, центральное экранирование.

Разработка зеркальных регистрирующих систем является актуальной задачей оптического приборостроения в связи с существенным расширением спектрального диапазона работы оптических приборов. Интерес к зеркальным объективам обусловлен рядом преимуществ, которыми они обладают по сравнению с линзовыми и зеркально-линзовыми объективами, а именно: меньшими габаритами и массой конструкции, потенциальной возможностью увеличения входной апертуры, возможностью работы в широкой области спектра — от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной. На современном этапе представляет интерес разработка зеркальных объективов с увеличенным угловым полем при высоком относительном отверстии; такие системы требуют коррекции сферической аберрации, комы, астигматизма и кривизны изображения.

Возможности двухзеркальных систем по построению изображения, свободного от сферической аберрации, комы, астигматизма и кривизны, ограничены в силу недостаточного количества коррекционных параметров. Как правило, такие системы состоят из двух асферических поверхностей, что вызывает трудности при их изготовлении и контроле. Особый интерес представляют двухзеркальные концентрические объективы [1, 2], сочетающие в себе технологичность конструкции и высокую степень коррекции аберраций. Недостатком этих систем являются большие продольные габариты. Известны трехзеркальные объективы с двойным отражением от главного зеркала [3], а также четырехзеркальные системы с попарно совмещенными вершинами зеркал [4], однако их изготовление является весьма трудоемким.

В настоящей статье предлагается новое схемное решение зеркального объектива, который состоит из главного выпуклого и вторичного вогнутого сферических зеркал (рис. 1), оптическая схема при этом обеспечивает процесс повторного отражения пучка лучей от каждого из зеркал.

Расчет объектива проводился по методике В. Н. Чуриловского [5]. Условие расчета первого параксиального луча (условие нормировки):

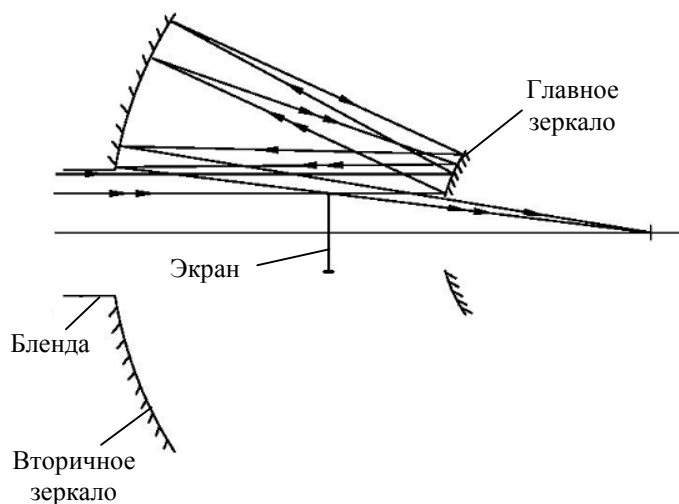


Рис. 1

$$\alpha_1=0; \alpha_5=1; h_1=1,0; f'=1,0.$$

Значения тангенсов углов  $\alpha_s$ , образованных нулевым лучом с оптической осью, и высот  $h_s$  лучей на поверхностях зеркал необходимы для определения конструктивных параметров ( $r_s, d_s$ ) системы ( $s=1, \overline{m}$  — число поверхностей). Радиусы  $r_s$  зеркальных поверхностей и осевые расстояния  $d_s$  между зеркалами вычисляются в соответствии с выражениями

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{2}{\alpha_2}, \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}, \quad r_3 = \frac{2h_3}{\alpha_3 + \alpha_4}, \quad r_4 = \frac{2h_4}{\alpha_4}; \\ d_1 &= \frac{1-h_2}{\alpha_2}, \quad d_2 = \frac{h_2-h_3}{\alpha_3}, \quad d_3 = \frac{h_3-h_4}{\alpha_4}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Дополнительные условия для расчета двухзеркального объектива с двойным отражением от каждой из поверхностей характеризуются соотношениями

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r_3, \quad r_2 = r_4, \\ d_1 &= d_3 = -d_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Из равенств (2) с учетом (1) получим следующие выражения для расчета высот лучей на поверхностях:

$$h_2 = \frac{\alpha_4}{\alpha_2 - \alpha_3}, \quad h_3 = \frac{\alpha_3 + \alpha_4}{\alpha_2}, \quad h_4 = \frac{\alpha_4(\alpha_4 + 1)}{\alpha_2^2 - \alpha_3^2}. \quad (3)$$

Условия устранения в системе сферической аберрации, комы, астигматизма и кривизны изображения соответственно принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^m h_s Q_s = 0, \\ K_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^m W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^m h_s S_s Q_s = 0, \\ C_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^m \frac{v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s}{h_s} - \sum_{s=1}^m S_s W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^m h_s S_s^2 Q_s = 0, \\ D_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^m \frac{v_s \alpha_{s+1} - v_{s+1} \alpha_s}{h_s} + C_0 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Вспомогательные величины  $W_s, S_s, P_s, Q_s$  для расчета коэффициентов аберраций для каждой отражающей поверхности представлены в таблице.

Величина	Поверхность			
	1-я	2-я	3-я	4-я
$W_s$	$\frac{\alpha_2^2}{2}$	$\frac{\alpha_3 - \alpha_2}{2}(\alpha_3 + \alpha_2)$	$\frac{\alpha_4 - \alpha_3}{2}(\alpha_4 + \alpha_3)$	$\frac{1 - \alpha_4}{2}(1 + \alpha_4)$
$S_s$	0	$\frac{d}{1 - \alpha_2 d}$	$\frac{d}{1 - \alpha_2 d} + \frac{d}{(1 - \alpha_2 d)(1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d)}$	$\frac{d}{1 - \alpha_2 d} + \frac{d}{(1 - \alpha_2 d)(1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d)} + \frac{d}{(1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d)(1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d - \alpha_4 d)}$

Величина	Поверхность			
	1-я	2-я	3-я	4-я
$P_s$	$-\frac{\alpha_2^3}{4}$	$\frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{4}(\alpha_3 + \alpha_2)$	$-\frac{(\alpha_4 - \alpha_3)^2}{4}(\alpha_4 + \alpha_3)$	$\frac{(1 - \alpha_4)^2}{4}(1 + \alpha_4)$
$Q_s$	$-\frac{\alpha_2^3}{4}$	$\frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{4}(\alpha_3 + \alpha_2)$	$-\frac{(\alpha_4 - \alpha_3)^2}{4}(\alpha_4 + \alpha_3)$	$\frac{(1 - \alpha_4)^2}{4}(1 + \alpha_4)$

Углы  $\alpha_s$  находим из условий устранения аберраций (4) с учетом уравнений (3) и таблицы. Расчет производился с использованием программного пакета MathCad, при этом в целях поиска схемного решения с оптимальной коррекцией аберраций коэффициенты аберраций задавались с незначительным отклонением от нуля. В результате исследования была рассчитана система, имеющая следующие параметры нулевого луча:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0, \quad h_1 = 1, \\ \alpha_2 &= 0,9239149, \quad h_2 = 1,765195, \\ \alpha_3 &= 0,706975, \quad h_3 = 1,1796716, \\ \alpha_4 &= 0,3829411, \quad h_4 = 1,4968271, \\ \alpha_5 &= 1, \end{aligned}$$

что соответствует конструктивным параметрам объектива, состоящего из сферических зеркал с равными радиусами кривизны (в относительных единицах):

$$\begin{aligned} r_1 = r_2 = r_3 = r_4 &= 2,1647015, \\ d_1 = d_3 = -d_2 &= -0,8282095. \end{aligned}$$

Коэффициенты остаточных аберраций третьего порядка данного схемного решения при этом равны  $B_0 = 0$ ,  $K_0 = -0,125$ ,  $C_0 = -0,167$ ,  $D_0 = -0,167$ .

В качестве дополнительных условий при расчете системы использовался коэффициент центрального экранирования, который в процессе расчета был минимизирован. В рассматриваемом объективе экранирование осуществлялось на обоих зеркалах из-за наличия в них центральных отверстий. Коэффициент центрального экранирования для первого (главного) зеркала определяется выражением

$$\xi_1 = h_0 / h_1 = h_0,$$

где  $h_0$  — высота нулевого луча по краю центрального отверстия в главном зеркале, причем  $h_0 = \delta$  при  $\alpha_5 = 1$  ( $\delta$  — расстояние от поверхности главного зеркала до плоскости изображения), тогда имеем

$$\xi_1 = \delta. \tag{5}$$

Экранирование на четвертом зеркале будет осуществляться, если высота луча на четвертой поверхности ( $h_{4(\text{экр})}$ ) будет меньше  $h_1$ , т.е. если  $h_{4(\text{экр})} < 1$ .

Решая уравнения (1) относительно  $h_4$ , определим

$$h_4 = 1 - \alpha_2 d + \alpha_3 d - \alpha_4 d,$$

тогда, учитывая равенство (5), получим

$$h_{4(\text{экр})} = \delta - \alpha_2 d + \alpha_3 d - \alpha_4 d \quad \text{и} \quad h_{4(\text{экр})} = h_4 - 1 + \delta.$$

Для рассчитанной системы  $h_{4(\text{экр})} = 1,16$ , следовательно, коэффициент экранирования определяется только величиной  $h_0$  и равняется  $\xi_1 = 0,67$ .

Если же в двухзеркальном объективе с четырьмя отражениями  $h_{4(\text{экр})} < 1$ , то коэффициент экранирования для четвертого зеркала будет определяться выражением

$$\xi_2 = \frac{h_1 - h_{4(\text{экр})}}{h_4 - h_{4(\text{экр})}},$$

которое для  $h_4 = -d + \delta$  преобразуется к виду

$$\xi_2 = \frac{2 - 2\delta + d}{1 - \delta},$$

откуда

$$\delta = \frac{2 + d - \xi_2}{2 - \xi_2}.$$

Зависимость коэффициента экранирования двухзеркального объектива с четырьмя отражениями от конструктивных параметров системы представлена на рис. 2.

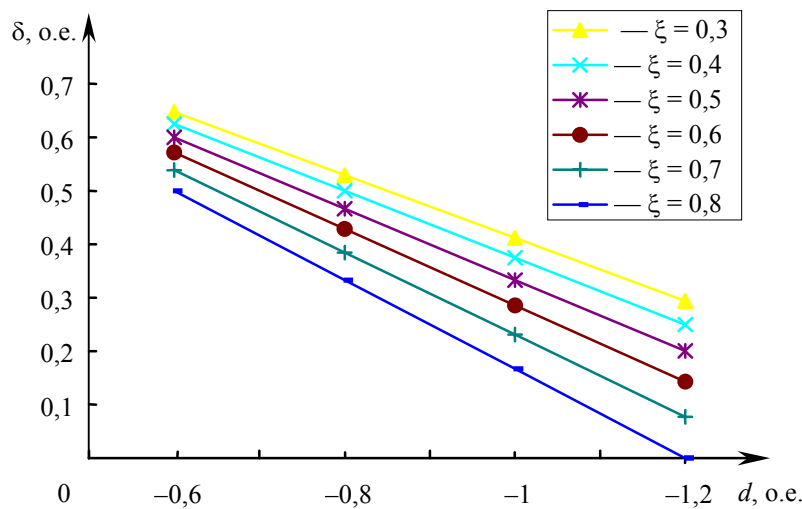


Рис. 2

При разработке зеркальных систем, кроме определения конструктивных параметров и исследования коррекционных возможностей, большое значение имеет защита плоскости изображения от постороннего света, что в рассматриваемом объективе достигается введением специального защитного экрана и бленды (см. рис. 1).

Графики остаточных aberrаций рассчитанного объектива [6] при фокусном расстоянии  $f' = 200$  мм, относительном отверстии  $D/f' = 1:4$  и угловом поле  $2\omega = 6^\circ$  показаны на рис. 3, где  $\eta$  — неизопланатизм;  $\Delta Y$  — дисторсия;  $Z'_m, Z'_s$  — астigmatические отрезки;  $\Delta X', \Delta Y'$  — сагитальная и меридиональная составляющие поперечных aberrаций широкого внеосевого пучка.

Продольная сферическая aberrация объектива на краю входного зрачка составляет 0,00054 мм, диаметр кружка рассеяния ( $2\omega = 0$ ) — 0,00013 мм. Задний отрезок системы при этом равен  $S' = 299$  мм, а расстояние, определяющее удаление плоскости изображения относительно первого зеркала,  $\delta = 134$  мм.

В процессе исследования было получено схемное решение, которое представляет теоретический и практический интерес. Рассчитанный двухзеркальный объектив с четырьмя отражениями отличается простотой и технологичностью конструкции, поскольку состоит из двух сферических поверхностей, что упрощает процесс изготовления, сборки и юстировки; вместе с тем он обладает достаточно высокими коррекционными возможностями. Объектив спосо-

бен развивать увеличенное угловое поле ( $2\omega = 6^\circ$ ) и является достаточно светосильным ( $D/f' = 1:4$ ).

К недостаткам системы следует отнести значительное центральное экранирование, составляющее 67 %, что приводит к существенному снижению частотно-контрастной характеристики.

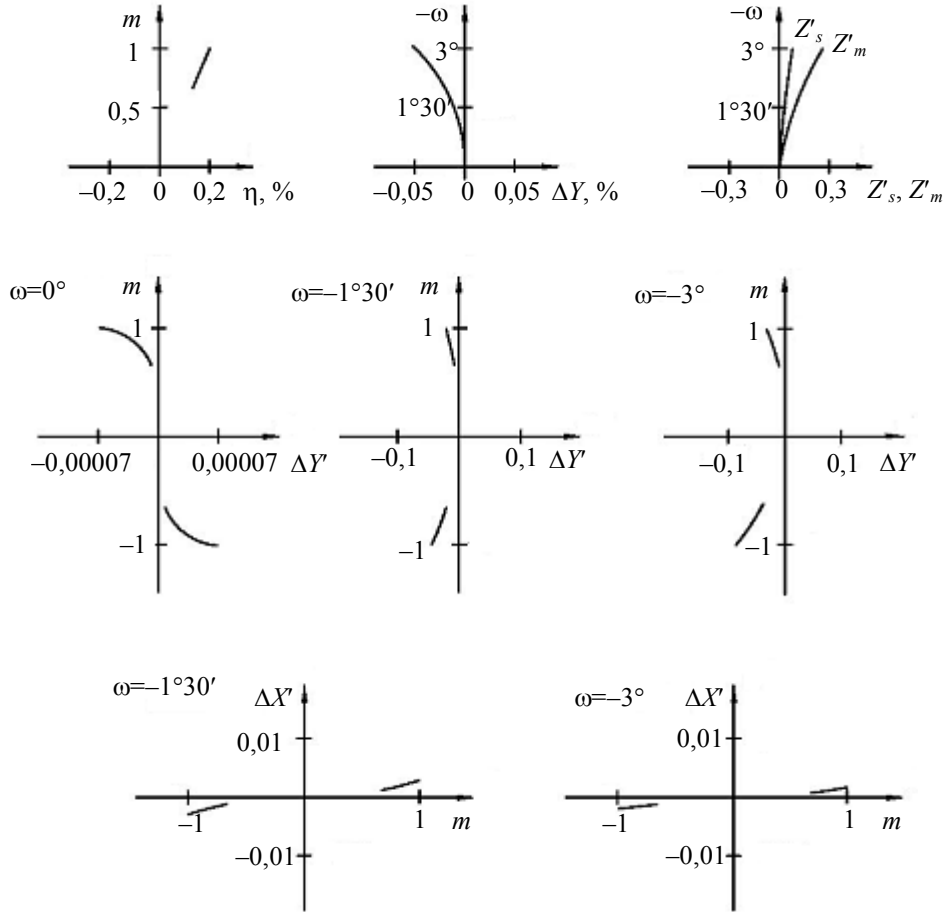


Рис. 3

Предлагаемое схемное решение позволяет значительно уменьшить продольные габариты конструкции по сравнению с концентрическим объективом [2], а исполнение системы только из отражающих компонентов обеспечивает возможность ее использования в широком спектральном диапазоне, что особенно актуально в связи с развитием ИК-техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Г. М. Асферические поверхности в астрономической оптике. М.: Наука, 1980. С. 62—63.
2. Артюхина Н. К., Богатко А. В. Зеркальная концентрическая система // Сб. трудов VI междунар. конф. „Прикладная оптика — 2004“. СПб., 2004. Т. 3. С. 305.
3. Цуканова Г. И. Оптические системы телескопов с синтезированной апертурой // Оптический журн. 1994. № 9. С. 28—31.
4. Korch D. Two well-corrected four-mirror telescopes // Applied Opt. 1974. Vol. 13, N 8. P. 1767.
5. Чуриловский В. Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л.: Наука, 1968. 312 с.
6. Пат. 9022 РБ. Зеркальный объектив с четырьмя отражениями / Н. К. Артюхина, А. В. Богатко, Н. А. Толстик // Оф. Бюл. Изобретения. Патентные модели. Промышленные образцы. 2007.

***Сведения об авторах***

- Нина Константиновна Артюхина*** — канд. техн. наук; Белорусский национальный технический университет, кафедра лазерной техники и технологии, Минск; профессор;  
E-mail: art4913@rambler.ru
- Алла Владимировна Богатко*** — аспирант; ЗАО „Янсар“, Минск; инженер-конструктор;  
E-mail: bav-jim@list.ru

Рекомендована кафедрой  
лазерной техники и технологии

Поступила в редакцию  
03.09.07 г.