

## ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТИВ С ПЛОСКИМ ПОЛЕМ

Канд. техн. наук АРТЮХИНА Н. К., асп. БОГАТКО А. В.

Белорусский национальный технический университет

Зеркальные объективы обладают рядом существенных преимуществ перед линзовыми и находят широкое применение в различных областях оптического приборостроения, особенно при работе в УФ и ИК областях спектра. Часто требуется регистрация очень слабых и достаточно протяженных объектов, что определяет разработку объективов и систем с увеличенным полем зрения при сохранении высокой светосилы, которые должны быть откорректированы на сферическую aberrацию, кому, астигматизм и кривизну изображения.

Возможности двухзеркальных систем в построении изображения, свободного от сферической aberrации, комы и астигматизма, на плоском поле ограничены в силу недостаточного количества в них коррекционных параметров. Создан ряд удачных трехзеркальных конструкций, обеспечивающих высокие относительные отверстия, однако угловые поля в них ограничены из-за виньетирования, причем для этих систем характерно неудобное расположение плоскости изображения. Четырехзеркальные объективы обладают высокими коррекционными возможностями [1, 2], но имеют сложную асферику зеркал, значительные габариты, большое экранирование и виньетирование по полю, поэтому они изготавливаются лишь в единичных экземплярах.

Известны анастигматы, состоящие из двух зеркал [3].

В предлагаемой работе рассматривается светосильный апланатический анастигмат подобного типа с исправленной кривизной изображения. Объектив, оптическая схема которого представлена на рис. 1, состоит из главного выпуклого и вторичного вогнутого зеркал и имеет удобно размещенную для исследования плоскость изображения.

Введем условия масштаба:

$$\alpha_1 = 0; \alpha_3 = 1; h_1 = 1; f' = 1.$$

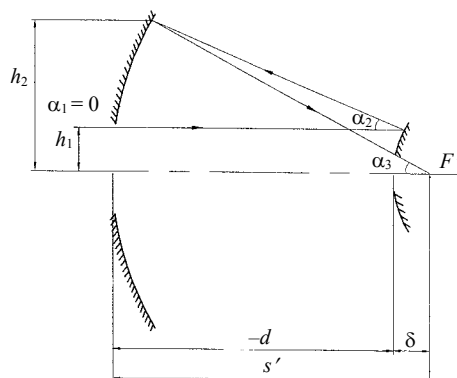


Рис. 1. Двухзеркальный анастигмат с плоским полем

Конструктивные параметры, согласно [4], определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{2}{\alpha_2}; \quad d = \frac{1 - h_2}{\alpha_2}; \\ r_2 &= \frac{2h_2}{1 + \alpha_2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Для того чтобы в системе были исправлены сферическая aberrация, кома, астигматизм и кривизна изображения, необходимо выполнение условий:

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{2}(Q + h_2 Q_2) = 0; \\ K_0 &= -\frac{1}{4} + \frac{1}{2} h_2 S_2 Q_2 = 0; \\ C_0 &= D_0 - 2S_2 W_2 + h_2 S_2^2 Q_2 = 0; \\ D_0 &= \frac{1}{2} \left( \alpha_2 - \frac{1 + \alpha_2}{h_2} \right) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $B_0, K_0, C_0, D_0$  – коэффициенты III порядка соответствующих монохроматических aberrаций.

Для вспомогательных величин имеем следующую сводку формул:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= T_1\sigma_1 + P_1; & W_2 &= \frac{1-\alpha_2^2}{2}; \\ Q_2 &= T_2\sigma_2 + P_2; & S_2 &= \frac{-d}{h_2}; \\ T_1 &= -\frac{\alpha_2^3}{4}; & P_1 &= -\frac{\alpha_2^3}{4}; \\ T_2 &= \frac{(1+\alpha_2)^3}{4}; & P_2 &= \frac{1-\alpha_2}{4}(1-\alpha_2^2), \end{aligned} \right\} (3)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – деформации первого и второго зеркал, причем  $\sigma = -e^2$ , а  $e^2$  – квадрат эксцентриситета меридиональной кривой II порядка поверхности зеркал.

Решив систему уравнений (2), получим:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1+\alpha_2}{\alpha_2^4} - 1; \\ \sigma_2 &= \frac{1-(1-\alpha_2)(1-\alpha_2^2)}{(1+\alpha_2)^3}, \end{aligned} \right\} (4)$$

где

$$\alpha_2 = \pm \sqrt{\frac{1}{2}}.$$

Тогда конструктивные параметры системы численно равны:

$$t_1 = 2,8284; \quad d = -2; \quad \sigma_1 = 5,8284;$$

$$t_2 = 2,8284; \quad \sigma_2 = 0,1716.$$

Отрицательное значение угла  $\alpha_2$  определяет вариант системы с мнимым изображением, который не имеет практического значения.

При расчете зеркальных систем, кроме определения конструктивных параметров и исследования коррекционных возможностей, важное место занимает разработка мероприятий для защиты плоскости изображения от попадания постороннего света, что достигается введением специальных защитных бленд и экранов.

На рис. 2 показан ход двух нулевых лучей, входящих в систему параллельно оптической оси: луча  $I$ , идущего на край входного зрачка, и луча  $I_1$ , идущего на край отверстия в главном зеркале. Параметры  $h_1, h_2, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  и  $\bar{h}_1, \bar{h}_2, \bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2, \bar{\alpha}_3$ , описывающие ход лучей  $I$  и  $I_1$  со-

ответственно, определяются по формулам (I.11) и (I.27) [4].

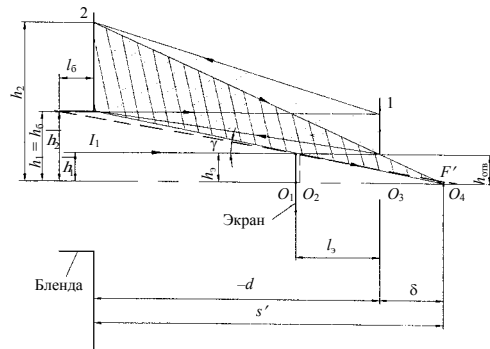


Рис. 2. Защита плоскости изображения от постороннего света

Как видим, лучи, идущие на высоте, меньшей  $\bar{h}_1$ , являются паразитными, следовательно, их необходимо срезать при помощи специального экрана. Положение экрана определяют его координаты:  $h_3$  – высота экрана относительно оптической оси;  $l_3$  – положение экрана относительно вершины первого зеркала.

Очевидно, высота экрана  $h_3$  не может быть меньше  $h_{отв}$ . Примем  $h_3 = h_{отв} = \bar{h}_1$ . Тогда коэффициент линейного экранирования будет определяться выражением

$$\eta = \frac{h_3}{\bar{h}_1}. \quad (5)$$

Длина экрана  $l_3$  не может быть меньше отрезка  $O_2O_3$ , иначе произойдет срезание полезных лучей экраном. Из рис. 2 находим:

$$O_2O_3 = O_2F' - \delta = O_2F' - (S' + d);$$

$$O_2F' = \frac{h_2}{\alpha_3}.$$

Опасным лучом прямого света будет являться луч, идущий через край экрана на край изображения. Его, а также другие возможные лучи постороннего света необходимо срезать при помощи бленды, которую устанавливают у центрального отверстия вторичного зеркала. Положение бленды определяется ее высотой относительно оптической оси  $h_6$  и длиной относительно вершины вторичного зеркала  $l_6$ .

Примем  $h_6 = \bar{h}_1$ .

Длину бленды  $l_6$  выбираем таким образом, чтобы паразитный луч, проходящий по краям бленды и экрана, засекал на фокальной плоскости отрезок  $y^*$ , больший половины линейного поля зрения объектива  $y$ .

Из рис. 2 имеем:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{h_6 - h_3}{l_6 + (-d - l_3)}; \quad Q_1 O_4 = \frac{h_3}{\operatorname{tg} \gamma};$$

$$F O_4 = Q_1 O_4 - Q_1 F = Q_1 O_4 - S + (-d - l_3);$$

$$y^* = F O_4 \operatorname{tg} \gamma,$$

или после преобразования

$$y^* = h_3 - \frac{h_6 - h_3}{l_6 - d - l_3} (S + d + l_3). \quad (6)$$

Вариант объектива с техническими характеристиками:  $f' = 50$  мм;  $D/f' = 1:1$ ;  $2\omega = 3^\circ$  имеет следующие конструктивные параметры:

$$r_1^* = 141,42 \text{ мм}; \quad d = -100 \text{ мм};$$

$$r_2^{**} = 141,42 \text{ мм};$$

$$S = 120,71 \text{ мм}; \quad h_3 = 10,36 \text{ мм}; \quad h_6 = 25 \text{ мм};$$

$$l_3 = 30 \text{ мм}; \quad l_6 = 15 \text{ мм}.$$

Форма асферических поверхностей определяется уравнениями:

$$*: \quad y^2 + z^2 = 282,84x - 6,8482x^2;$$

$$**: \quad y^2 + z^2 = 282,84x - 1,1716x^2.$$

Аберрационный расчет, проведенный с помощью ЭВМ, показал, что данный объектив формирует резкое, неискаженное изображение. Диаметр пятна рассеяния точки на оси – 0,206 мм, дисторсия на краю поля – 0,034 %, неизопланатизм на краю зрачка – 0,15 %, астигматизм и кривизна изображения по полю равны нулю.

Недостатком объектива остается наличие асферических поверхностей. Дальнейшее исследование зеркальных систем с целью упрощения конструкции с одновременным увеличе-

нием оптических характеристик привело к получению двухзеркальных систем с четырьмя отражениями (с двойным отражением от каждого из зеркал) [5, 6]. Эти схемные решения, состоящие из двух сферических зеркал, позволяют устранить три-четыре аберрации.

## ВЫВОД

Таким образом, в двухзеркальном анастигмате с плоским полем воздушный промежуток между зеркалами равен удвоенному фокусному расстоянию системы, а радиусы кривизны первого и второго зеркал равны. Сферическая аберрация и кома объектива устранены введением эллиптических поверхностей. Рассчитанная система обладает рядом достоинств, главными из которых являются: возможность устранения четырех аберраций малым числом компонентов, удобное расположение плоскости изображения, легкость процесса сборки и юстировки. Плоскость изображения защищена от постороннего света специальными блендой и экраном.

Объектив может использоваться для аэрофотосъемки, в космической астрономии, а также для исследований в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ган, М. А. Асферические поверхности в оптических приборах / М. А. Ган, Н. И. Куликовская // Оптико-механическая промышленность. – 1990. – № 11.
2. Попов, Г. М. Современная астрономическая оптика / Г. М. Попов. – М.: Наука, 1988. – 486 с.
3. Wynne, C. G. Two-mirror anastigmats / C. G. Wynne. – JOSA, 1969. – V. 59, No. 5.
4. Чуриловский, В. Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка / В. Н. Чуриловский. – Л.: Наука, 1968. – 312 с.
5. Артюхина, Н. К. Зеркальная концентрическая система / Н. К. Артюхина, А. В. Богатко // Прикладная оптика-2004: VI междунар. конф. – СПб., 2004.
6. Артюхина, Н. К. Зеркальные системы с четырьмя отражениями / Н. К. Артюхина, А. В. Богатко, В. А. Марчик // Наука – образованию, производству, экономике: Материалы III междунар. конф. – Минск, 2005.

Поступила 6.06.2005