

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ ЗАФОКАЛЬНЫХ АПЛАНАТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВОВ

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

Белорусский национальный технический университет

Интенсивное развитие оптической промышленности в последние десятилетия привело к необходимости поиска новых схемных решений различных оптических систем с улучшенными характеристиками. Интерес к зеркальным системам связан с возможностью их использования в широком спектральном диапазоне, а также с отсутствием хроматических aberrаций.

Двухзеркальные объективы имеют несложную и компактную конструкцию. Однако малое число коррекционных параметров и сравнительно большие полевые aberrации и, как следствие, малые поля зрения и апертуры ограничивают область их применения. Существующие двухзеркальные объективы можно разделить на два вида: предфокальные и зафокальные [1].

В настоящей работе проводится исследование двухзеркальных зафокальных объективов, в которых достигается апланатическая коррекция [2].

Зафокальным называется объектив, состоящий из двух вогнутых зеркал, у которого лучи,

отраженные от первого по ходу луча зеркала, пересекают оптическую ось. В качестве первого примера рассмотрим систему с малым главным и большим вторичным зеркалами [3], имеющими равные по абсолютной величине радиусы (рис. 1).

Для первого параксиального луча имеем следующие начальные условия для габаритного расчета:

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_2 < 0; \quad \alpha_3 = -1; \quad h_1 = 1; \quad h_2 < -1.$$

Далее, в соответствии с [4], получаем выражения для конструктивных параметров (рис. 1):

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

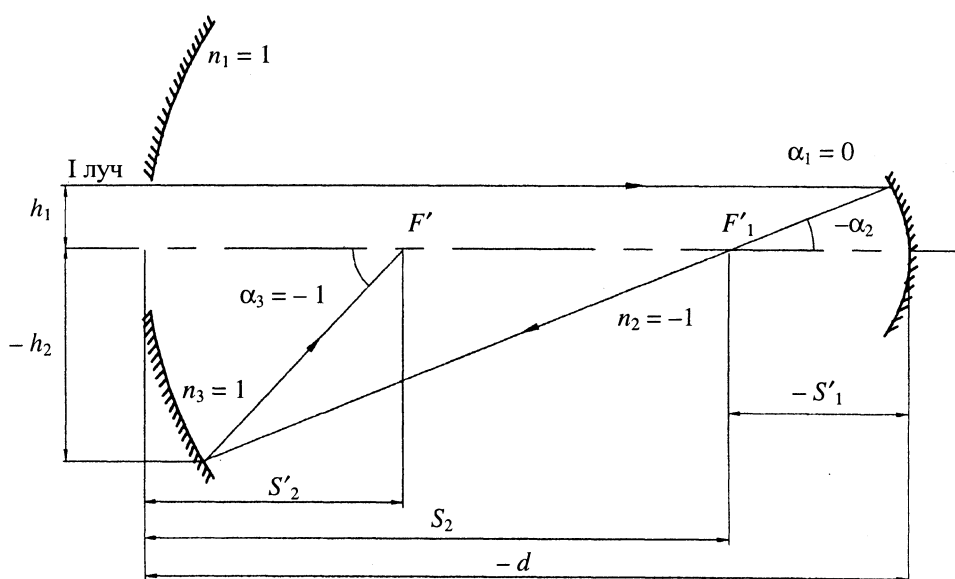


Рис. 1. Зафокальный объектив с малым главным и большим вторичным зеркалами

Учитывая, что $r_1 = -r_2$, имеем

$$h_2 = \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2}. \quad (2)$$

Тогда

$$d = \frac{2\alpha_2 - 1}{\alpha_2^2}. \quad (3)$$

Из (1)–(3) следует, что α_2 можно использовать в качестве свободного коррекционного параметра. Исследуем влияние величины угла α_2 на конструктивное решение системы.

Если $h_2 = -S'_2 = d$ (рис. 1), то решая (2) и (3), получаем

$$\alpha_2 = -1,618034.$$

Если $S'_2 = -h_2 = S_2 = S'_1 - d$, где $S'_1 = \frac{r_1}{2}$, то $\alpha_2 = -1$.

Следовательно, возможны следующие варианты:

- I. $\alpha_2 > -1$. III. $-1,618034 < \alpha_2 < -1$.
- II. $\alpha_2 = -1$. IV. $\alpha_2 = -1,618034$.
- V. $\alpha_2 < -1,618034$.

Соответствующие схемные решения показаны на рис. 2. Очевидно, что наиболее удобным является вариант V, обеспечивающий вынос плоскости изображения за пределы объектива.

Аберрационный расчет проводится в области аберраций третьего порядка. Для выполнения апланатической коррекции необходимо, в соответствии с [4], выполнение следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{2}(Q_1 + h_2 Q_2) = 0; \\ K_0 &= -\frac{1}{2}(W_1 + W_2) + \frac{1}{2}h_2 S_2 Q_2 = 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где B_0 и K_0 – коэффициенты сферической аберрации и комы III порядка; W_1 , W_2 , S_2 , Q_1 , Q_2 – вспомогательные величины, которые для данной системы принимают вид:

$$W_1 = \frac{\alpha_2^2}{2}; \quad W_2 = \frac{1 - \alpha_2^2}{2}; \quad S_2 = -\frac{d}{h_2};$$

$$Q_1 = -\frac{\alpha_2^3}{4}(\sigma_1 + 1);$$

$$Q_2 = -\frac{(1 - \alpha_2)^3}{4}\left(\sigma_2 + \frac{(1 + \alpha_2)^2}{(1 - \alpha_2)^2}\right);$$

σ_1 , σ_2 – деформации первого и второго зеркал, причем

$$\sigma = -e^2,$$

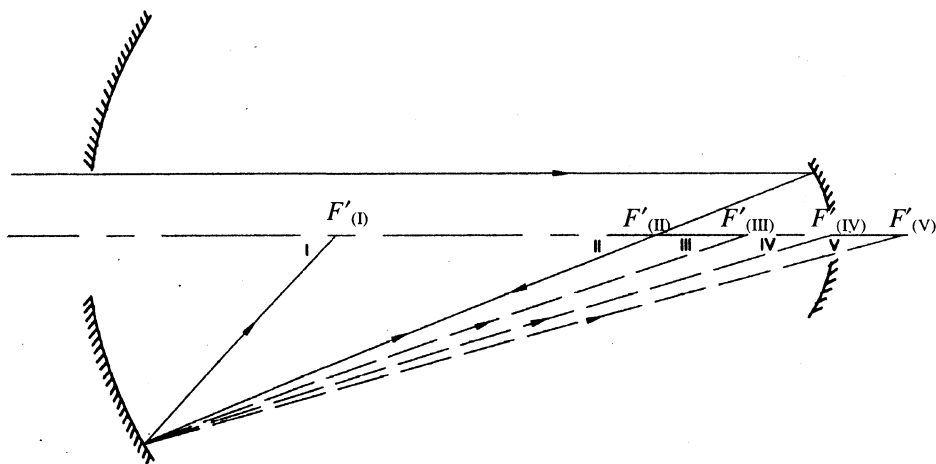


Рис. 2. Зафокальный объектив. Варианты: I. $\alpha_2 > -1$; II. $\alpha_2 = -1$; III. $1,618 < \alpha_2 < -1$; IV. $\alpha_2 = -1,618$; вариант V. $\alpha_2 < -1,618$

e^2 – квадрат эксцентриситета меридиональной кривой II порядка поверхности зеркал.

Решив систему уравнений (4) относительно σ_1 , σ_2 , получим следующие выражения для расчета деформаций зеркал:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= -\frac{2h_2}{d\alpha_2^3} - 1; \\ \sigma_2 &= \frac{2}{d(1-\alpha_2)^3} - \frac{(1+\alpha_2)^2}{(1-\alpha_2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Аберрационный расчет проводился при $f' = -100$ мм и $D/f' = 1/1,32$ с помощью ПЭВМ. Конструктивные параметры и аберрации зафокальных объективов с большим вторичным зеркалом приведены в табл. 1, где: $\Delta S'$ – продольная сферическая аберрация, мм; $\Delta Y'$ – поперечная сферическая аберрация, мм; η – неизопланатизм, %; X'_m , X'_s – меридиональная и сагиттальная составляющие астигматизма, мм; Δ' – дисторсия, %.

Как показал аберрационный расчет, зафокальные системы с малым главным и большим вторичным зеркалами и равными по абсолютной величине радиусами обеспечивают удовлетворительное качество изображения при относительных отверстиях до 1:1,32 и полях зрения до 4° . Необходимо отметить объектив 3, в котором, кроме достижения апланатической кор-

рекции, практически исправлена кривизна изображения.

В системах данного типа экранирование определяется размером приемника излучения и блендой (экраном), необходимой для защиты приемника от прямой засветки.

Таблица 1

Конструктивные параметры и аберрационные характеристики зафокальных объективов с малым главным и большим вторичным зеркалами

Конструктивные параметры							
№ п/п	α_2	$r_1 = -r_2$	h_2	d	σ_1	σ_2	
1	-0,400	-5,0000	-3,5000	-11,250	8,72300	-0,24846	
2	-1,000	-2,0000	-2,0000	-3,0000	0,33300	-0,08333	
3	-1,200	-1,6670	-1,8330	-2,3611	-0,10131	-0,08782	
4	-1,618	-1,2361	-1,6180	-1,6180	-0,52786	-0,12461	
5	-1,700	-1,1765	-1,5882	-1,5225	-0,57534	-0,13395	
Аберрационные характеристики							
№ п/п	2ω	Точка на оси			Точка вне оси		
		$\Delta S', \text{ мм}$	$\Delta Y', \text{ мм}$	$\eta, \%$	$X'_m, \text{ мм}$	$X'_s, \text{ мм}$	$\Delta', \%$
1	1°	0,00888	-0,003645	0,0798	-0,0186	-0,0042	0,0397
2	2°	0,01985	-0,008143	0,0843	-0,0286	-0,0267	0,0114
3	2°	0,02126	-0,008723	0,0832	-0,0178	0,0184	0,0178
4	4°	0,02055	-0,008430	0,0809	-0,0073	0,1293	0,0188
5	4°	0,02237	-0,009174	0,0790	0,00430	0,1398	0,0119

В качестве второго примера рассмотрим зафокальную удлиняющую систему типа Грегори [5].

Для габаритного расчета данной системы (рис. 3) справедлива сводка формул (1). Коэффициент центрального экранирования определяется величиной h_2

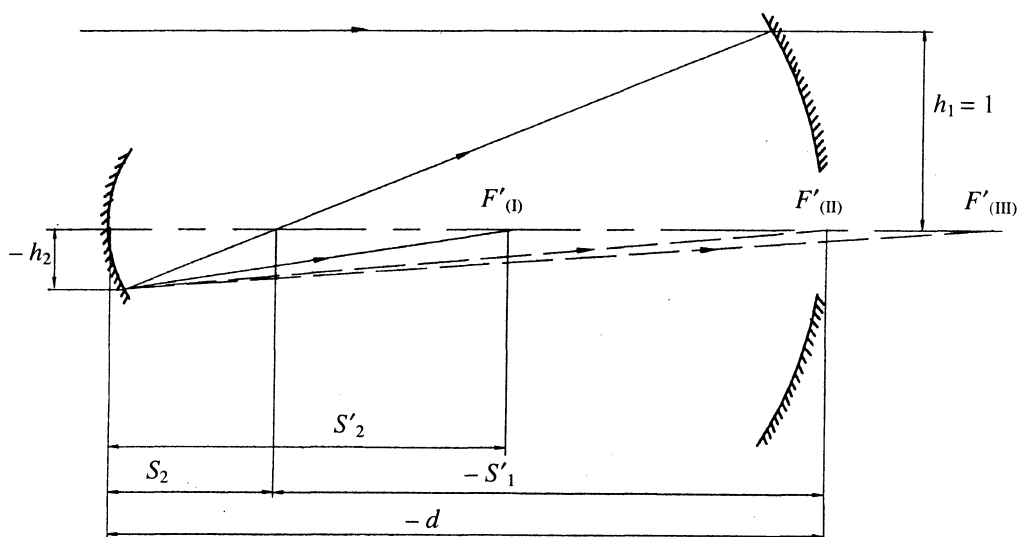


Рис. 3. Зафокальный удлиняющий объектив типа Грегори. Варианты: I. $|S'_2| < |d|$, $\alpha_2 > -3$; II. $|S'_2| = |d|$, $\alpha_2 = -3$; III. $|S'_2| < |d|$, $\alpha_2 < -3$

$$\eta = -h_2 = -(1 - \alpha_2 d). \quad (6)$$

При $r_1 \neq -r_2$ имеем свободные параметры α_2 и d . Определим, какие значения может принимать величина d . Из рис. 3 имеем: $|h_2| < |h_1|$, или $h_2 > -1$. Поскольку $S'_2 = -h_2$, получаем $S'_2 < 1$.

Следовательно, максимальное значение d порядка $-1,0$. Построив графики зависимостей $\eta = f(\alpha_2)$ для различных значений величины d , можно определить, что с конструктивной точки зрения оптимальным решением будет значение $-0,6 < d < -0,5$.

Вторым свободным параметром является величина α_2 , влияющая на конструктивное решение системы.

Пусть $d = -0,5$. Если $S'_2 = -h_2 = -d$, то получаем $\alpha_2 = -3$. Таким образом, имеем три варианта зафокальных объективов типа Грегори:

- I. $|S'_2| < |d|$; $\alpha_2 > -3$. II. $|S'_2| = |d|$; $\alpha_2 = -3$.
III. $|S'_2| < |d|$; $\alpha_2 < -3$.

Соответствующие схемные решения показаны на рис. 3.

Аберрационный расчет проводился при $f' = -300$ мм и $D/f' = 1/1,88$. Конструктивные параметры и аберрации зафокальных апланатов типа Грегори даны в табл. 2.

Аберрационный расчет показал, что зафокальные удлиняющие объективы типа Грегори могут обеспечивать удовлетворительное качество изображения при полях зрения и апертурах несколько меньших, чем в предыдущих системах. К ухудшению качества изображения в объективах типа Грегори приводят большие углы падения на вторичное зеркало.

Следует отметить, что зафокальные удлиняющие системы состоят из двух эллиптических зеркал, а зафокальные укорачивающие – по крайней мере, из одного эллиптического, что делает их более удобными с технологической

точки зрения по сравнению с предфокальными системами, поскольку для эллиптических зеркал существует простой и точный метод контроля при изготовлении.

Таблица 2

Конструктивные параметры и аберрационные характеристики зафокальных удлиняющих объективов типа Грегори

Конструктивные параметры							
№ п/п	d	α_2	$h_2 = -\eta$	r_1	r_2	σ_1	σ_2
1	-0,5	-2,7	-0,35	-0,74074	0,18919	-0,928873	-0,290070
2		-3,0	-0,50	-0,66670	0,25000	-0,925926	-0,312500
3		-3,2	-0,60	-0,62500	0,28570	-0,926758	-0,328370
Аберрационные характеристики							
№ п/п	2ω	Точка на оси			Точка вне оси		
		$\Delta S', \text{ мм}$	$\Delta Y', \text{ мм}$	$\eta, \%$	$X'_m, \text{ мм}$	$X'_s, \text{ мм}$	$\Delta', \%$
1	1°	0,01731	-0,004788	0,1060	0,0292	0,1110	0,0378
2	1°	0,01868	-0,005167	0,0090	0,0400	0,0972	0,0133
3	1°	0,02921	-0,008081	0,0055	0,0451	0,0927	0,0065

Таким образом, исследование двухзеркальных зафокальных апланатических объективов показало, что эти системы могут развивать значительные поля зрения и апертуры, просты в изготовлении. К недостаткам этих объективов следует отнести неудобное, во многих случаях, расположение плоскости изображения, а также большое экранирование, характерное для зафокальных удлиняющих систем типа Грегори.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михельсон Н. Н. Оптические телескопы: Теория и конструкция. – М.: Наука, 1976. – 512 с.
2. Артюхина Н. К., Богатко А. В. Расчет некоторых типов двухзеркальных зафокальных объективов // Оптика и лазерная физика. – 1997. – № 11. – С. 1–50.
3. Попов Г. М. Зафокальные апланатические системы из двух зеркал // Оптико-механическая промышленность. – 1975. – № 6. – С. 34–36.
4. Чуриловский В. Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. – Л.: Наука, 1968. – 312 с.
5. Ган М. А., Куликовская Н. И. Асферические поверхности в оптических приборах // Оптико-механическая промышленность. – 1990. – № 11. – С. 3–12.