

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ АНАСТИГМАТИЧЕСКОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Канд. техн. наук АРТЮХИНА Н. К., асп. ПРИСЛОПСКИЙ С. Я.

Белорусский национальный технический университет

Широкое применение в оптическом приборостроении, особенно в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, находят зеркальные системы [1]. Они позволяют сократить габариты, уменьшить массу прибора при сохранении высокой входной апертуры. Кроме того, зеркала больших размеров значительно проще и дешевле в изготовлении, чем линзы такого же диаметра. Весьма актуальна задача улучшения качества изображения при разработке зеркальной оптики, поэтому представляет практический интерес расчет трехзеркальных систем, обладающих хорошими габаритными соотношениями и обеспечивающих апланатическую и анастигматическую коррекцию аберраций [2, 3]. В объективах с высокой и синтезированной апертурой часто требуются схемы двухступенчатой оптики с афокальной системой (насадкой) к фокусирующему компоненту [4, 5], где первая ступень – зеркальная афокальная система с видимым увеличением $\Gamma_{т.с.}$, а вторая – объектив с фокусным расстоянием $f'_{фок.об.}$, и эквивалентное фокусное расстояние $f'_{сист} = \Gamma_{т.с.} f'_{фок.об.}$.

В области аберраций третьего порядка можно доказать, что конструктивное выполнение афокальной системы, образованной классическим зеркальным объективом и одиночным параболическим зеркалом, используемыми в качестве окуляра, обеспечивает исправление четырех основных аберраций. В [6] рассмотрена трехзеркальная композиция с классическим объективом Кассегрена и вогнутым параболическим зеркалом. Зачастую удобно в зеркальных системах иметь промежуточное изображение [7, 8], при наличии которого проще решается задача защиты плоскости изображения от постороннего света. В настоящей работе проведены расчет и исследование системы, первое и второе зеркала которой образуют классический

объектив Грегори. За счет диафрагмы (ее роль выполняет отверстие в третьем зеркале) устраняются все возможные паразитные лучи [9].

На рис. 1 представлена ее оптическая схема, которая включает в себя три силовых отражающих компонента с совмещенными оптическими осями. Первый компонент – вогнутое параболическое зеркало 1; второй компонент выполнен в виде вогнутой эллиптической отражающей поверхности 2, передний геометрический фокус которой совмещен с фокусом первого компонента; третий отражающий компонент выполнен в виде выпуклой параболической поверхности 3, фокус которой совпадает с задним фокусом эллиптического зеркала.

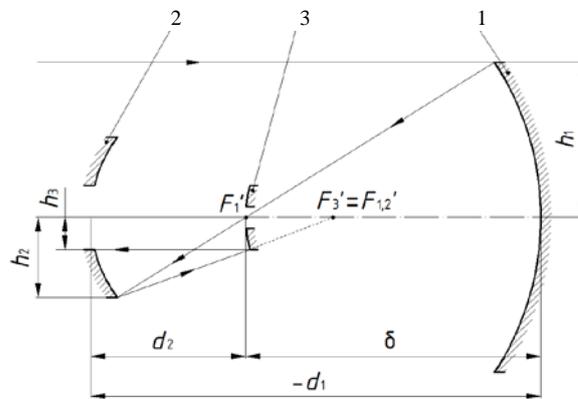


Рис. 1. Схема трехзеркальной афокальной системы

Исходными данными для проведения габаритного расчета рассматриваемой афокальной системы являются ее видимое увеличение Γ , относительное отверстие зеркального объектива Грегори D : $f'_{1,2}$ и диаметр входного зрачка D , определяемый оправой главного (первого) зеркала. Кроме этого, необходимо задавать условия нормировки для первого параксиального луча, идущего из осевой точки предмета на край входного зрачка:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \alpha_4 = 0; \quad \alpha_3 = -1; \\ n_1 = n_3 = 1; \quad n_2 = n_4 = -1; \\ h_1 = 1, \quad f'_{1,2} = 1. \end{aligned} \quad (1)$$

В результате расчета углов α_s и высот h_s луча, ход которого показан на рис. 1, получим сводку формул для определения радиусов зеркальных поверхностей r_s и осевых расстояний d_s между зеркалами (все обозначения приведены в [10]):

$$\begin{aligned} d_1 = \frac{1-h_2}{\alpha_2}; \quad d_2 = \frac{h_2-h_3}{\alpha_3} = \frac{1-\Gamma h_2}{\Gamma}; \\ r_1 = \frac{2}{\alpha_2}; \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}; \quad r_3 = \frac{2h_3}{\alpha_3 + \alpha_4}. \end{aligned} \quad (2)$$

В рассматриваемой системе, кроме аплантической и анастигматической коррекции aberrаций, можно осуществить план-коррекцию. Для этого необходимо выполнить условие Петцваля

$$\sum_{s=1}^3 \frac{1}{r_s} \left(\frac{1}{n_{s+1}} - \frac{1}{n_s} \right) = 0, \quad (3)$$

где n_s – показатели преломления оптических сред; s – номер зеркальной поверхности (все четные показатели будут равны -1 , а нечетные равны 1).

Коэффициент центрального экранирования ε в объективе Грегори определяется высотой нулевого луча на втором зеркале

$$\varepsilon = h_2 = \frac{1 + \alpha_2}{\alpha_2 - \Gamma}. \quad (4)$$

В общем случае третье зеркало может занимать различное положение относительно первого (главного) зеркала. Введем параметр δ , определяющий положение третьего зеркала относительно вершины первого зеркала, тогда в (2) и (3) необходимо учитывать дополнительное конструктивное условие $d_2 = -(d_1 - \delta)$. При расчете модификаций, когда оно расположено не в фокусе первого, а на некотором расстоянии δ от него, формула (4) усложняется и имеет следующий вид:

$$h_2 = \frac{1 + \alpha_2(1 - \delta\Gamma)}{\Gamma(1 + \alpha_2)}. \quad (5)$$

Для определения угла α_2 необходимо решить квадратное уравнение $\alpha_2^2(1 + \delta\Gamma - \Gamma) + \alpha_2\delta\Gamma^2 + \Gamma(1 - \Gamma) = 0$, к которому преобразуется условие Петцваля (3) при подстановке формул (2) и (5). Имеем

$$\alpha_2 = \frac{\Gamma(2 - \delta\Gamma) \pm \sqrt{[\Gamma(\delta\Gamma - 2)]^2 + 4\Gamma(\Gamma + 1)(1 - \Gamma - \delta\Gamma)}}{2(1 - \Gamma - \delta\Gamma)}. \quad (6)$$

Если последнее по ходу лучей зеркало расположено в фокальной плоскости первого зеркала ($-\delta = -f'_1$), то выражение (6) приводится к виду

$$\alpha_2 = \frac{3\Gamma \pm \sqrt{\Gamma(5\Gamma + 4)}}{2(1 - \Gamma)}. \quad (7)$$

Для устранения aberrаций третьего порядка (сферической aberrации, комы и астигматизма) в рассматриваемой оптической системе используем коэффициенты деформаций асферических зеркальных поверхностей σ_s , являющихся полноценными коррекционными параметрами. Использование остальных параметров может привести к конструктивно неосуществимой оптической схеме, дающей мнимое изображение или вообще не пропускающей свет на плоскость изображения. Воспользуемся формулами коэффициентов монохроматических aberrаций третьего порядка B_0, K_0, C_0, D_0 [10, с. 138–140] и решим систему уравнений, описывающих исправление сферической aberrации, комы и астигматизма:

$$\left\{ \begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 h_s Q_s = 0; \\ K_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 h_s S_s Q_s = 0; \\ C_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 \frac{v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s}{h_s} - \\ &\quad - \sum_{s=1}^3 S_s W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 h_s S_s^2 Q_s = 0. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Исправление кривизны изображения D_0 обеспечивается выполнением условия Петцваля (3) и устранением астигматизма ($C_0 = 0$). Вспомогательные величины, входящие в (8), определяются формулами:

$$v_s = \frac{1}{n_s}; \quad h_{s+1} = h_s - \alpha_{s+1} d_s;$$

$$r_s = h_s \frac{v_s - v_{s+1}}{v_s \alpha_{s+1} - v_{s+1} \alpha_s};$$

$$S_s = \sum_{s=1}^{m-1} \frac{v_s d_{s-1}}{h_s h_{s-1}}; \quad S_1 = 0; \quad Q_s = T_s \sigma_s + P_s; \quad (9)$$

$$T_s = \frac{(v_s \alpha_{s+1} - v_{s+1} \alpha_s)^3}{v_s v_{s+1} (v_{s+1} - v_s)^2};$$

$$P_s = \left(\frac{\alpha_{s+1} - \alpha_s}{v_{s+1} - v_s} \right)^2 (v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s);$$

$$W_s = \frac{\alpha_{s+1} - \alpha_s}{v_{s+1} - v_s} (v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s).$$

Используя условия нормировки (1) в формулах (9), получим выражения, сведенные в табл. 1. Первое и третье параболические зеркала афокальной системы характеризуются коэффициентами деформаций $\sigma_1 = \sigma_3 = -1,0$.

Таблица 1

Значения вспомогательных величин

Номер поверхности	T_s	P_s	W_s	S_s	v_s
1	$-\frac{\alpha_2^3}{4}$	$-\frac{\alpha_2^3}{4}$	$\frac{\alpha_2^2}{2}$	0	1
2	$-\frac{\alpha_2^3}{4}$	$\frac{(1+\alpha_2)^2}{4} \times (\alpha_2 - 1)$	$\frac{1-\alpha_2^2}{2}$	$-\frac{d_1}{1-\alpha_2 d_1}$	-1
3	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{d_1}{1-\alpha_2 d_1} + \frac{d_2}{(1-\alpha_2 d_1)(1-\alpha_2 d_1 + d_2)}$	1

Из решения системы уравнений (8) определяется коэффициент деформации эллиптического зеркала, который равен и противоположен по знаку квадрату эксцентриситета меридиональной кривой второго порядка:

$$e_2^2 = -\sigma_2 = \left(\frac{\alpha_2 + 1}{\alpha_2 - 1} \right)^2. \quad (10)$$

По формулам (2) получены конструктивные данные (табл. 2) нескольких вариантов теле-

скопических систем модификации $-\delta = -f'_1$, рассчитанных для следующих оптических характеристик: видимых увеличений $\Gamma = -4^\times$; -6^\times ; -8^\times , углов поля зрения $2\omega = 1^\circ$; 2° при $\varepsilon = 0,5$; $0,3$; $0,223$ и $D: f'_{1,2} = 1:2$. Системы обладают хорошей коррекцией aberrаций, их aberrационные характеристики представлены в табл. 3, где $\Delta D'$, $\Delta \sigma'$ – продольная и поперечная угловые сферические aberrации; η – величина неизопланатизма; Δ' – дисторсия; $L_m - L_s$ – величина астигматической разности; $\Delta \sigma'_\omega$ – угловой размер максимальной фигуры рассеяния по полю зрения. Коррекция aberrаций оценивалась с помощью пакета прикладных программ OPAL. Все рассчитанные оптические системы обладают компактными схемами, причем с возрастанием значения видимого увеличения Γ их осевая длина уменьшается. К примеру, при диаметре входного зрачка $D = 500$ мм габаритные размеры будут значительно меньше фокусного расстояния объектива Грегори, а именно:

$$-\Gamma = -4^\times; \quad I = 0,75 f'_{1,2};$$

$$-\Gamma = -6^\times; \quad I = 0,6 f'_{1,2};$$

$$-\Gamma = -8^\times; \quad I = 0,54 f'_{1,2}.$$

Таблица 2

Конструктивные параметры систем

Γ	ε	Номер поверхности	Уравнение поверхности	Осевое расстояние, мм
-4^\times	0,5	1	$y^2 + z^2 + 2000x = 0$	$d_1 = -750$
		2	$y^2 + z^2 - 666,667x + 0,889x^2 = 0$	$d_2 = 250$
		3	$y^2 + z^2 - 1000x = 0$	-
-6^\times	0,3	1	$y^2 + z^2 + 1836,668x = 0$	$d_1 = -600,667$
		2	$y^2 + z^2 - 387,892x + 0,863x^2 = 0$	$d_2 = 141,5$
		3	$y^2 + z^2 - 666,667x = 0$	-
-8^\times	0,223	1	$y^2 + z^2 + 1757 - 359x = 0$	$d_1 = -537,3$
		2	-	$d_2 = 97,95$
		3	$y^2 + z^2 - 500x = 0$	-

Таблица 3

Аберрационные характеристики

Γ	2ω	$\Delta D'$, дптр	$\Delta \sigma'$	η , %	$L_m - L_s$, дптр	Δ' , %	$\Delta \sigma'_\omega$
-4^\times	1°	0,00017	2,16"	0,0017	0	0,0438	31,1"
-4^\times	2°	0,00017	2,16"	0,0017	0,0001	0,1756	2' 10"
-6^\times	1°	0,00093	7,95"	0,0056	0	0,1051	1' 15"
-8^\times	1°	0,0009	5,8"	0,0039	0,0001	0,1918	2' 36"

ВЫВОД

Рассчитанные системы обладают хорошим качеством изображения с учетом аберраций высшего порядка и просты в технологическом отношении. Они могут применяться в качестве афокальных насадок к линзовым регистрирующим объективам, работающим в различных областях спектра. К тому же они могут найти применение в оптических системах с синтезированной апертурой, а при разъюстировке исследованных афокальных систем можно получить длиннофокусные объективы с высоким качеством изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Smith, W. J.** Modern Optical Engineering / W. J. Smith // The Design of Optical Systems; 3rd Ed. 2000, McGraw-Hill. – New York, 2000.
 2. **Mikhel'son, N. N.** Three-mirror telescope anastigmats / N. N. Mikhel'son // Optica Acta. – 1982. – Vol. 29, № 7. – P. 979–983.

3. **Смирнов, В. Д.** Астрономическая оптика в космических телевизионных системах / В. Д. Смирнов, М. А. Кувшинов, М. И. Скоморохов // Труды оптического общества имени Д. С. Рождественского: V междунар. конф. «Оптика», Санкт-Петербург, 20–23 окт. 2003 г. – СПб., 2003. – С. 160–161.

4. **Рябова, Н. В.** Концепция двухступенчатой оптики для крупных телескопов / Н. В. Рябова // Оптический журнал. – 1995. – № 10. – С. 21–23.

5. **Оптические** схемы объективов космических телескопов / А. И. Лысенко [и др.] // Оптический журнал. – 2002. – № 9. – С. 21–24.

6. **Артюхина, Н. К.** Композиция зеркальной астигматической афокальной системы / Н. К. Артюхина, Н. В. Корсак // Вестник БНТУ. – 2006. – № 1. – С. 41–44.

7. **Цуканова, Г. И.** Исследование конструктивных особенностей трехзеркального объектива с промежуточным изображением / Г. И. Цуканова, В. Д. Стариченкова // Оптический журнал. – 1997. – № 7. – С. 21–23.

8. **Артюхина, Н. К.** Четырехзеркальные планобъективы с промежуточным изображением / Н. К. Артюхина // Вестник БНТУ. – 2005. – № 4. – С. 46–49.

9. **Прислопский, С. Я.** Трехзеркальная анаберрационная телескопическая система / С. Я. Прислопский, Н. К. Артюхина // Материалы 61-й науч.-техн. конф. преподавателей, науч. работников, аспирантов, магистрантов и студентов приборостроительных специальностей, Минск, 5–30 апреля 2005 г. – Минск, 2005. – С. 23–25.

10. **Чуриловский, В. Н.** Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. – Л.: Машиностроение, 1968. – 312 с.

Поступила 10.04.2006