

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317

ПОЛОЖЕНИЕ ВХОДНОГО ЗРАЧКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ИЗОПЛАНАТИЧЕСКОЙ И АНАСТИГМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПЕРВИЧНЫХ АБЕРРАЦИЙ

© 2011 г. Е. В. Ермолаева; В. А. Зверев, доктор техн. наук; И. А. Королева; И. Н. Тимощук, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: tim_ir@rambler.ru

Показано, что в изображении, образованном оптической системой, состоящей из двух отражающих поверхностей сферической формы, при афокальном компенсаторе aberrаций из двух тонких линз, расположенных в параллельных пучках лучей перед зеркальной системой, может быть достигнута не только апланатическая, но и анастигматическая (плананастигматическая) коррекция aberrаций.

Ключевые слова: оптическая система, отражающая поверхность, входной зрачок, афокальный компенсатор, изображение, коррекция aberrаций.

Коды OCIS: 110.0110.

Поступила в редакцию 20.01.2011.

Угловое поле изображаемого объективами Кассегрена и Грегори пространства предметов ограничено такими aberrациями, как кома, астигматизм и кривизна поверхности изображения. Если коэффициенты деформации в уравнениях несферических поверхностей принять в качестве коррекционных параметров, то получим оптическую систему объектива Ричи–Кретгена при апланатической коррекции aberrаций образованного изображения. В 1935 году Ф. Росс предложил установить перед главным фокусом в сходящемся пучке лучей дополнительную афокальную линзовую систему, исправляющую кому изображения, образованного главным зеркалом пятиметрового рефлектора [1]. В 1934 году профессором В.Н. Чуриловским [2] была показана возможность компенсации сферической aberrации и комы в изображении, образованном сферическими поверхностями двухзеркальной системы, с помощью двухлинзового афокального компенсатора, расположенного в сходящемся пучке лучей. В общем случае апланатической коррекцией aberrаций обладает изображение, создаваемое оптической системой, состоящей из двух отражающих поверхностей сфериче-

ской формы и афокального компенсатора aberrаций из двух тонких линз, расположенных в параллельных пучках лучей перед зеркальной системой. Однако при определенном расположении компенсатора относительно зеркальной системы возможна и коррекция остаточного астигматизма изображения. Рассмотрим условия такой коррекции aberrаций.

Оптическую систему из двух отражающих поверхностей сферической формы можно представить с помощью углов, образованных осевым виртуальным лучом с оптической осью, и записать в виде

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0 & n_1 &= 1 \\ \alpha_2 &= \alpha & d_1 &= d & n_2 &= -1 \\ \alpha_3 &= 1 & n_3 &= 1.\end{aligned}$$

Первичные aberrации изображения, образованного двухзеркальной системой, определим коэффициентами [3]

$$\begin{aligned}S_I &= B_0, & S_{II} &= J(K_0 + qB_0), \\ S_{III} &= J^2(C_0 + 2qK_0 + q^2B_0),\end{aligned}$$

где $B_0 = -(1/4)(1 - h_2)\alpha^3 + (1/4)h_2(1 - \alpha - \alpha^2)$. При $f' = 1$ и $s_I = -\infty$ коэффициент $q = -s_p$, где s_p – расстояние от первой поверхности оптиче-

ской системы до центра входного зрачка. Если $B_0 \neq 0$, то $s_{II} = 0$ при

$$s_{pk} = K_0/B_0, \quad (1)$$

а $s_{III} = 0$ при

$$s_{PA}^2 - 2(K_0/B_0)s_{PA} + C_0/B_0 = 0. \quad (2)$$

Высота $h_2 = s'_F \alpha_3 = s'_F$. Коэффициент центрального экранирования зрачка по диаметру $k_3 = h_2/h_1 = h_2$. Выразим задний фокальный отрезок s'_F в масштабе расстояния между отражающими поверхностями как $s'_F = k_s d$. При этом

$$d = k_3/k_s. \quad (3)$$

Так как $h_2 = 1 - \alpha d$, то $\alpha = (1 - h_2)/d = ((1 - k_3)/k_3)k_s$. Полученные соотношения позволяют преобразовать выражения, определяющие коэффициенты B_0 , K_0 и C_0 , к виду

$$B_0 = \frac{1}{4} k_3 \left[1 - \frac{1 - k_3}{k_3} k_s - \frac{(1 - k_3)^2}{k_3^2} k_s^2 - \frac{(1 - k_3)^4}{k_3^4} k_s^3 \right], \quad (4)$$

$$K_0 = -\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \frac{k_3}{k_s} \left[1 - \frac{(1 - k_3)^2}{k_3^2} k_s^2 \right] \left(1 - \frac{1 - k_3}{k_3} k_s \right), \quad (5)$$

$$C_0 = \frac{1}{k_3} \left(1 + \frac{k_3}{k_s} \right) + \frac{1}{4} \frac{k_3}{k_s^2} \left[1 - \frac{(1 - k_3)^2}{k_3^2} k_s^2 \right] \left(1 - \frac{1 - k_3}{k_3} k_s \right). \quad (6)$$

Пусть $k_s = -k_3$. Тогда при $k_3 = 0$, т. е. в том случае, когда изображение, создаваемое первой поверхностью, расположено в плоскости, проходящей через вершину второй поверхности, коэффициенты $B_0 = 1/4$, $K_0 = -1/2$, $C_0 = 1$. При этом $s_{pk} = s_{PA} = -2$, что и следовало ожидать.

Конструктивно вполне приемлем вариант объектива при $k_s = -1$, т. е. в том случае, когда изображение, создаваемое двухзеркальной системой, расположено в плоскости, проходящей через вершину первой поверхности. В этом случае выражения (4), (5) и (6) принимают следующий вид:

$$B_0 = \frac{1}{4} - \frac{(1 - k_3)^2}{4k_3} \left[1 - \frac{(1 - k_3)^2}{k_3^2} \right], \quad (7)$$

$$K_0 = -\frac{1}{2} - \frac{1 - 2k_3}{4k_3^2}, \quad (8)$$

$$C_0 = -1 - \frac{1 - 6k_3}{4k_3^2}. \quad (9)$$

Пусть, например, $k_3 = 0,3$. Тогда $B_0 = 2,065$, $K_0 = -1,611$, $C_0 = 1,222$. При этом в соответствии с формулой (1) расстояние $s_{pk} = -0,780$. Решив уравнение (2), получаем $s_{PA1} = -0,65$, $s_{PA2} = -0,910$.

По формулам (7), (8) и (9) в случае центрального экранирования зрачка по диаметру ($0 \leq k_3 \leq 1$) вычисляем значения коэффициентов B_0 , K_0 и C_0 . Подставив вычисленные значения коэффициентов в формулы (1) и (2), находим соответствующие значения s_{pk} , s_{PA1} и s_{PA2} . Кривая зависимости $s_{pk} = s_{pk}(k_3)$ представлена на рис. 1, а кривые зависимостей $s_{PA1} = s_{PA1}(k_3)$ и $s_{PA2} = s_{PA2}(k_3)$ – на рис. 2.

Если входной зрачок (апертурную диафрагму) расположить на расстоянии s_{pk} от первой

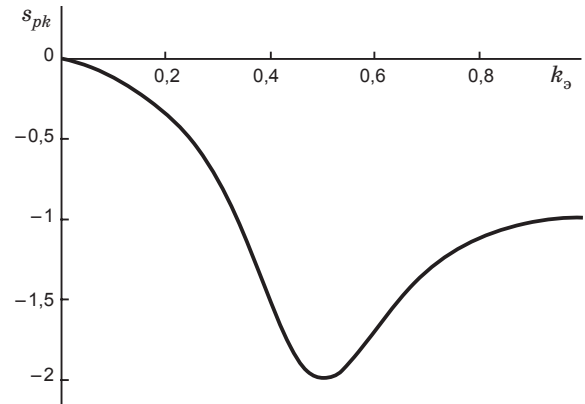


Рис. 1. Кривая зависимости положения входного зрачка от коэффициента центрального экранирования при изопланатической коррекции аберраций.

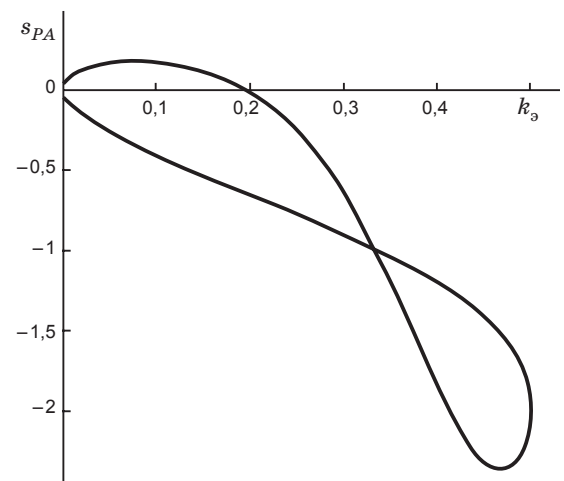


Рис. 2. Кривая зависимости положения входного зрачка от коэффициента центрального экранирования при анастигматической коррекции аберраций.

поверхности оптической системы, то получим изопланатическую коррекцию aberrаций созданного изображения. Поместив, например, во входном зрачке несферическую поверхность пластинки (пластинку Шмидта), позволяющую компенсировать остаточную сферическую aberrацию [4], получим оптическую систему с апланатической коррекцией aberrаций созданного ею изображения.

Если тонкий двухлинзовый афокальный компенсатор остаточных сферической aberrации и комы расположить на расстоянии s_{PA1} или s_{PA2} от первой поверхности оптической системы, то получим принципиальную возможность рассчитать оптическую систему, формирующую изображение, свободное не только от сферической aberrации и комы, но и от астигматизма. Оптическую схему такой системы можно представить в виде, показанном на рис. 3.

Оптическая сила афокального компенсатора из двух тонких линз $-\varphi_k = \varphi_{k1} + \varphi_{k2} = 0$. При этом астигматизм изображения, созданного компенсатором, будет отсутствовать. Тогда коэффициенты, определяющие остаточные aberrации изображения, будут определяться как

$$S_{I\Sigma} = S_{Ik} + S_{I3C} = S_{Ik} + B_0,$$

$$S_{II\Sigma} = S_{IIk} + S_{II3C} = S_{IIk} - K_0 + s_{PA}B_0,$$

$$S_{III\Sigma} = 0.$$

Положив $S_{I\Sigma} = 0$ и $S_{II\Sigma} = 0$, получаем

$$S_{Ik} = -B_0, \quad (10)$$

$$S_{IIk} = K_0 - s_{PA}B_0. \quad (11)$$

Оптическую систему компенсатора с помощью углов α_i можно записать в виде

$$\begin{array}{ll} \alpha_1 = 0 & n_1 = 1 \\ \alpha_2 = d_{1k} = 0 & n_2 = n \\ \alpha_3 = \alpha_k & d_{2k} = 0 \quad n_3 = 1 \\ \alpha_4 = d_{3k} = 0 & n_4 = n \\ \alpha_5 = 0 & n_5 = 1. \end{array}$$

Расстояние от компенсатора до первой поверхности зеркальной системы $d_k = -s_{PA}$. В соответствии с формулой (3) при $k_s = -1$ расстояние между отражающими поверхностями зеркальной системы $d = -k_s$. При этом конструктивным ограничением построения рассматриваемой оптической системы является очевидное условие $d_k > k_s$. Используя кривые, представленные

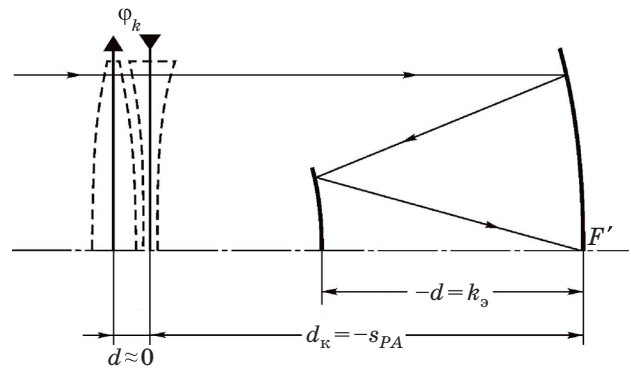


Рис. 3. Схема двухзеркального объектива-анастигмата (плананастигмата) с афокальным компенсатором aberrаций широкого пучка лучей.

на рис. 2, находим отрезок s_{PA} , соответствующий требуемому значению коэффициента k_s . Раскрыв выражения, определяющие коэффициенты S_{Ik} и S_{IIk} , получаем

$$S_{Ik} = \left(\frac{n}{(n-1)^2} \right) \times \quad (12)$$

$$\times \left[(1+2n)\alpha_k^2(\alpha_4 - \alpha_2) - (2+n)\alpha_k(\alpha_4^2 - \alpha_2^2) \right],$$

$$S_{IIk} = ((1+n)\alpha_k(\alpha_4 - \alpha_2))/(n-1). \quad (13)$$

Подставив полученные выражения в формулы (10) и (11), получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными α_2 и α_4

$$(2+n)\alpha_k(\alpha_4^2 - \alpha_2^2) - \quad (14)$$

$$-(1+2n)\alpha_k^2(\alpha_4 - \alpha_2) = \left((n-1)^2/n \right) B_0,$$

$$\alpha_k(\alpha_4 - \alpha_2) = (n-1/n+1)(K_0 - s_{PA}B_0). \quad (15)$$

В этих уравнениях углы α_2 и α_4 определяют “прогиб” линз и, по сути, являются коррекционными параметрами афокального компенсатора. Угол α_k определяет оптическую силу линз компенсатора. Следовательно, чем больше угол α_k , тем больше оптическая сила линз, а соответственно, тем выше их относительное отверстие, что может привести к появлению трудно устранимых aberrаций более высокого, чем третий, порядка, т. е. может привести к неудовлетворительному качеству созданного изображения. С другой стороны, при малом угле α_k линзы компенсатора обладают малой оптической силой. При этом для достижения требуемого коррекционного эффекта линзы должны обладать большим “прогибом”, т. е. будут обладать весьма крутыми поверхностями,

что также определяет возможность появления аберраций более высокого порядка. Поэтому для достижения наилучшей коррекции аберраций принято принимать $\alpha_k = 0,3-0,5$. При выбранном значении α_k уравнения (14) и (15) образуют систему уравнений, решив которую, находим величины α_2 и α_4 , а следовательно,

и требуемые для коррекции аберраций параметры линз.

Окончательная коррекция аберраций осуществляется путем оптимизации параметров с помощью специальных программ автоматизированного расчета оптических систем, например программы "САРО".

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Михельсон Н.Н.* Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 512 с.
2. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
3. *Зверев В.А.* Основы геометрической оптики. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.
4. *Грамматин А.П., Демидова Е.А., Зверев В.А., Романова Г.Э.* Аберрационные свойства оптической системы из двух отражающих поверхностей сферической формы с компенсатором // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 4. С. 11–15.