

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

УДК 535.31; 681.7.067.23

ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТИВ БЕЗ ЭКРАНИРОВАНИЯ С БИНАРНОЙ АСФЕРИКОЙ

© 2011 г. А. П. Грамматин, доктор техн. наук; А. А. Харченко

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

E-mail: aneta-84@mail.ru

Рассмотрены свойства аберраций второго порядка, возникающие в центрированных оптических системах, содержащих асферическую поверхность, образованную вращением любой плоской кривой вокруг нормали в некоторой ее точке, если эта нормаль не является осью симметрии кривой. Показано, что происходит увеличение углового размера целевого поля трехзеркального объектива без экранирования на 10–26% при замене в данной системе асферической поверхности второго типа (сплюснутый сфероид) поверхностью с вышеуказанной асферикой.

Ключевые слова: трехзеркальный объектив без экранирования, асферическая поверхность, бинарная асферика.

Коды OCIS: 080.4035

Поступила в редакцию 17.11.2010

Профессор М.М. Русинов в 1987 г. обнаружил, что при наличии в центрированной оптической системе хотя бы одной асферической поверхности, образованной вращением эвольвенты окружности вокруг нормали в некоторой ее точке, возникают поперечные аберрации второго порядка [1]. В 1990 г. профессором А.П. Грамматиным было показано, что поверхность, полученная вращением эвольвенты окружности, является частным случаем [2]. Поперечные геометрические аберрации второго порядка свойственны поверхностям, образованным вращением любой плоской кривой вокруг нормали в некоторой ее точке, если эта нормаль не является осью симметрии кривой. Уравнение полученной таким образом поверхности вращения может быть представлено в виде уравнения (1) [2]

$$z = a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + a_4\rho^4 + \dots + a_n\rho^n. \quad (1)$$

При этом OZ – ось вращения (оптическая ось), начало прямоугольных координат z, y, x совпадает с вершиной O поверхности, $\rho = \sqrt{y^2 + x^2}$.

Таким образом, это уравнение описывает две поверхности (рис. 1), одна из которых (1–1) является результатом вращения участка исход-

ной кривой, соответствующего значению $\rho > 0$ (участок 0–1), а вторая поверхность (2–2) – $\rho < 0$ (участок 0–2) [3].

Уравнение (1) отличается от обычного уравнения асферической поверхности наличием членов, содержащих нечетные степени величины ρ .

Использование в оптических системах асферических поверхностей, описываемых урав-

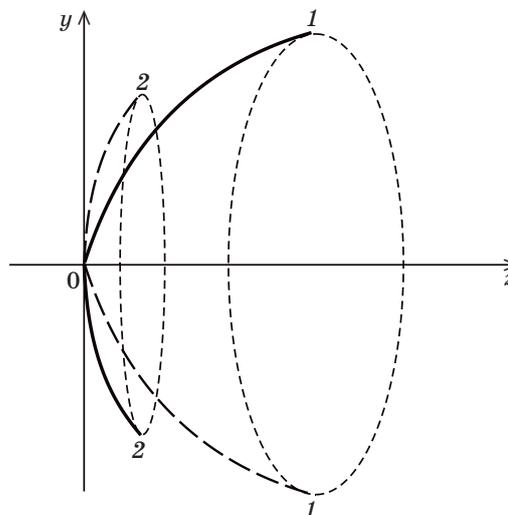


Рис. 1. Оптическая поверхность с бинарной асферикой.

нением (1), может оказаться полезным, если с помощью aberrаций второго порядка может быть достигнута перебалансировка остаточных aberrаций, приводящая к их существенному уменьшению.

Наиболее перспективной в этом направлении является возможность воздействия на кривизну поля изображения. Пусть некоторая поверхность оптической системы сначала является сферической и имеет радиус кривизны r . Тогда все нечетные коэффициенты в уравнении (1) будут равны нулю, а коэффициент

$$a_4 = 1/8[(1 + b)/r^3], \quad (2)$$

где $b = 0$ (коэффициент деформации). Деформируя эту поверхность путем придания коэффициенту b значения, отличного от нуля, можно осуществить изменение астигматизма третьего порядка. При этом кривизна поля изображения останется неизменной, так как коэффициент b в выражение суммы Петцваля SIV не входит. При постоянном значении SIV между изменениями меридиональной $\Delta Z'm$ и сагиттальной $\Delta Z's$ составляющих астигматизма третьего порядка существует зависимость

$$\Delta Z'm = 3\Delta Z's. \quad (3)$$

Если теперь коэффициенту a_3 в уравнении (1) придать значение, отличное от нуля, то в оптической системе возникнут aberrации второго порядка, в том числе и астигматизм. При этом изменения меридиональной $\Delta Z'm$ и сагиттальной $\Delta Z's$ составляющих астигматизма второго порядка связаны между собой соотношением

$$\Delta Z'm = 2\Delta Z's. \quad (4)$$

При сравнении выражений (3) и (4) видно, что с помощью асферизации одной из поверхностей оптической системы можно получить в любой точке поля изображения $\Delta Z'm = \Delta Z's = 0$, т. е. устранить кривизну поля изображения. Но при этом возникнут aberrации как третьего, так и второго порядка. Компенсация aberrаций третьего порядка возможна обычными средствами. Для устранения aberrаций второго порядка были изучены их свойства [2].

Фигура пятна рассеяния для произвольной точки углового поля, а также величины отдельных aberrаций зависят только от соотношения между высотами h и H , где h – высота падения параксиального луча, идущего из осевой точки предмета, а H – высота падения параксиального луча, идущего из центра входного зрачка. Сферическая aberrация второго порядка не-

постоянна по полю изображения и в пределе при $h \ll H$ исчезает, астигматизм при $h \gg H$ в широких наклонных пучках не проявляется, в то время как для бесконечно тонких пучков он существует. Фигура рассеяния лучей, соответствующая коме, изменяет свой вид в зависимости от соотношения между величинами h и H , а ее значение в пределе при $H \gg h$ остается постоянной. Когда величины h и H соизмеримы, провести строгое разделение поперечных составляющих на элементарные aberrации невозможно. Несмотря на это методами приближенных вычислений был выполнен численный анализ элементарных aberrаций. В результате которого сделаны следующие выводы [2]:

- сферическая aberrация второго порядка постепенно уменьшается от центра поля изображения к краю,
- кома достигает максимального значения примерно при $H = 2h$, а затем остается неизменной,
- астигматизм в широких наклонных пучках проявляется в полной мере приблизительно при $H \geq 2h$.

В качестве примера рассмотрим трехзеркальный объектив без экранирования (рис. 2) [4]. В исследуемой системе aberrацией, ухудшающей качество изображения, а также ограничи-

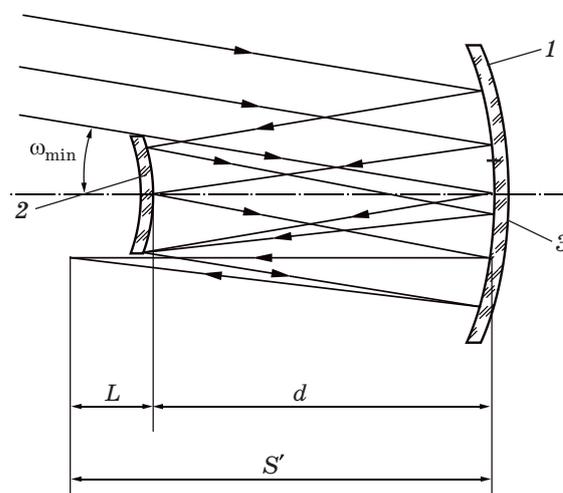


Рис. 2. Схема трехзеркального объектива. 1 – положительное вогнутое первое зеркало (имеет форму гиперболоида), 2 – отрицательное выпуклое второе зеркало, 3 – положительное вогнутое третье зеркало (имеет форму сплюснутого сфероида), L – расстояние от вершины зеркала 2 до плоскости изображения, d – расстояние между зеркалами 2 и 1, 3, $S' = L + d$ – расстояние от последнего зеркала 3 до плоскости изображения, ω_{\min} – минимальный угол наклона внеосевого пучка лучей.

Результаты расчета углового размера щелевого поля для систем, содержащих асферическую поверхность второго типа, и систем, содержащих бинарную асферику

f' , мм	K	S'/f'	$2\omega_{x_1}$, град	$2\omega_{x_2}$, град
250	5	0,4	20	22
250	4	0,4	15	18
500	5	0,4	13,7	16
750	5	0,4	11,7	14
1000	5	0,4	8,6	11,5

вающей поле изображения, является астигматизм, т. е. кривизна поля изображения.

Покажем, как меняется размер щелевого поля изображения объектива при замене асферической поверхности второго типа (сплюснутый сфероид) поверхностью с бинарной асферикой. Критерием оценки качества системы является критерий Марешаля.

Результаты исследования приведены в таблице, где f' – фокусное расстояние системы, K – диафрагменное число, S'/f' – относительное рабочее расстояние до изображения, $2\omega_{x_1}$ – угловое щелевое поле системы с асферическими поверхностями второго типа, $2\omega_{x_2}$ – угловое щелевое поле системы, в которой форма третьего зеркала – бинарная асферика.

Видно, что при использовании бинарной асферики происходит увеличение значения 2ω на 10–25%. Введение бинарной асферики приводит к уменьшению кривизны поля изобра-

жения, но в то же время появляется сферическая aberrация второго порядка в центре поля. В рассматриваемом случае система работает краями поля, поэтому сферическая aberrация не повлияет на качество получаемого изображения.

Особое внимание следует обратить на незначительное изменение максимального съема материала с ближайшей сферы при изготовлении оптической поверхности бинарной асферики. Максимальное изменение не превышает 2,8 мкм. Для контроля качества таких поверхностей используется интерференционный метод с синтезированной голограммой в качестве компенсатора.

Таким образом, в работе показано, что при введении в систему трехзеркального объектива без экранирования бинарной асферической поверхности происходит увеличение щелевого поля изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русинов М.М. Об aberrациях второго порядка в центрированных оптических системах // Изв. вузов. Приборостроение. 1987. № 5. С. 64–68..
2. Грамматин А.П. Свойства геометрических aberrаций второго порядка // Оптический журнал. 1994. № 8. С. 34–38.
3. Грамматин А.П., Марчук С.М. Асферические оптические поверхности нового типа и их aberrационные свойства // ОМП. 1990. № 11. С. 55–57.
4. Грамматин А.П., Сычева А.А. Трехзеркальный объектив телескопа без экранирования // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 1. С. 24–27.