УДК 535.317

ВАРИАНТЫ КОМПОЗИЦИИ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТИВА ГРЕГОРИ

 О. В. Багдасарова; Д. Н. Воронцов; Г.В. Карпова

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: dimitrion@hotbox.ru

Проанализированы аберрационные свойства модифицированного объектива Грегори с афокальным линзовым компенсатором аберраций. Представлен вариант конструктивного решения зеркально-линзового объектива на основе системы Мерсенна грегорианского типа.

Ключевые слова: *зеркально-линзовый объектив, афокальный компенсатор, аберрационные свойства.*

Коды OCIS: 200.0200, 220.0220.

Поступила в редакцию 08.12.2011.

Ранее было обращено внимание на то, что если осевая точка изображения, образованного объективом Грегори, расположена в вершине главного (первого) зеркала, то само это зеркало изображается вторичным зеркалом в плоскости промежуточного изображения, образованного отражающей поверхностью главного зеркала. Если при этом поверхность главного зеркала оптической системы объектива считать поверхностью входного зрачка (апертурной диафрагмой), то его изображение в плоскости промежуточного изображения будет выходным зрачком системы [1, 2]. В этом случае в выходном зрачке системы можно разместить, например, афокальный компенсатор из двух тонких линз, как показано на рис. 1.

Введем обозначения: D_1 – диаметр главного зеркала; D_2 – диаметр вторичного зеркала; D – диаметр входного зрачка; D' – диаметр выходного зрачка. Кроме того, введем обозначения отрезков, показанных на рисунке:

$$O_1F_1' = f_1';\ O_2F_1' = s_2;\ O_2O_1 = s_2' = O_2F'.$$

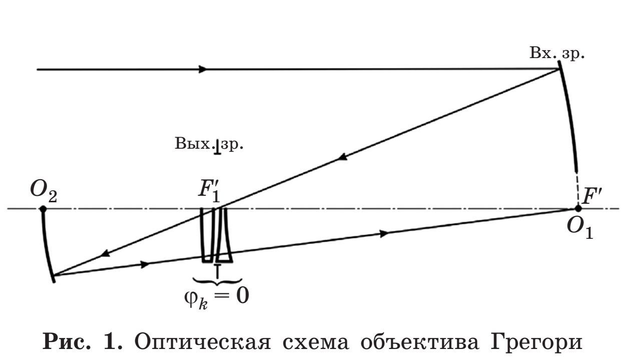

Рис. 1. Оптическая схема объектива Грегори с афокальным компенсатором аберраций.

Вторичное зеркало экранирует центральную часть главного зеркала (входного зрачка). В соответствии с рисунком коэффициент центрального экранирования зрачка по диаметру определяется отношением

$$k_Э = D_2/D = s_2/f_1'. \qquad (1)$$

При этом поперечное увеличение изображения входного зрачка, образованного вторичным зеркалом, равно

$$V_P = -s_2/(s_2 + f_1') = -k_Э/(1 + k_Э). \qquad (2)$$

Диаметр выходного зрачка равен

$$D' = -V_P D = k_Э/(1 + k_Э)D. \qquad (3)$$

Угловое поле $2W$ изображаемого пространства, как правило, невелико. Поэтому можно считать, что величина промежуточного изображения равна $l_1' = -f_1'\mathrm{tg}W \approx f_1'W$. Поскольку промежуточное изображение расположено в плоскости выходного зрачка, его диаметр должен удовлетворять условию: $2l_1' \leq D'k_Э$. Учитывая, что $2W > 0$, получаем

$$2W \leq (D'/f_1')k_Э. \qquad (4)$$

Величина изображения, образованного оптической системой в целом, равна $l' = Vl_1' = -f'W$, где V – поперечное увеличение изображения, образованного отражающей поверхностью вторичного зеркала. Очевидно, что $V = 1/V_P$. При этом

$$2W = -2l'/f' = -2l_1'/V_P f' = -D' k_Э/V_P f'$$

или (5)

$$2W = -(D/f')k_Э = -(1/F)k_Э,$$

где F – диафрагменное число системы ($F < 0$). Отсюда следует, что чем меньше светосила (чем больше абсолютная величина F) рассматриваемой системы, тем меньше угловое поле изображаемого пространства предметов. Длина рассматриваемой системы $L = s_2' = -Vs_2$. Учитывая соотношение (1), получаем

$$L = -k_Э f'. \tag{6}$$

Для определения радиуса кривизны при вершине поверхностей применим формулу отрезков $n'/s' - n/s = (n' - n/r)$. В рассматриваемом случае $n_1 = -n_2 = n_3 = 1$. Радиусы кривизны при вершине первой и второй отражающих поверхностей соответственно равны

$$r_1 = -2f_1' = [2k_Э/(1+k_Э)]f', \tag{7}$$

$$r_2 = -\left[2k_Э^2/(1+2k_Э)\right]f'. \tag{8}$$

Форму отражающих поверхностей рассматриваемой системы определим уравнением: $\rho^2 = 2rz - (1 + \sigma)z^2$, где $\rho^2 = x^2 + y^2$, σ – коэффициент "деформации" сферической поверхности. Такие первичные аберрации, как сферическая, кома и астигматизм, определяются соответственно коэффициентами [3, 4]: S_{I}, S_{II} и S_{III}. В уравнении, определяющем первую отражающую поверхность оптической системы Грегори, коэффициент $\sigma_1 = -1$ (отражающий параболоид). Коэффициент $S_{\mathrm{I}} = 0$ при $\sigma_2 = -(1 + 2k_Э)^{-2}$, при этом коэффициент $S_{\mathrm{II}} = -1/2$. Приняв коэффициенты σ_1 и σ_2 в качестве коррекционных параметров, найдем их значения из условия коррекции первичных аберраций: сферической и комы, т. е. из условия соблюдения равенств: $S_{\mathrm{I}} = 0$, $S_{\mathrm{II}} = 0$. Решив соответствующую систему уравнений, получаем

$$\sigma_1 = 2k_Э^3/(1+k_Э)^3 - 1, \tag{9}$$

$$\sigma_2 = -(1 + 2k_Э + 2k_Э^2)/(1+2k_Э)^3. \tag{10}$$

При этом остаточная аберрация первичного астигматизма определится коэффициентом

$$S_{\mathrm{III}} = (1+k_Э)/k_Э + \left[(1+2k_Э)/4k_Э^2\right]\left[1 + (1+2k_Э)^2\sigma_2\right]. \tag{11}$$

Пусть в этом выражении коэффициент $S_{\mathrm{III}} = 0$. Тогда коэффициент

$$\sigma_2 = \left[-2k + (1+2k_Э)^2\right]/(1+2k_Э)^3. \tag{12}$$

Из выражения, определяющего коэффициент первичной сферической аберрации, при $S_{\mathrm{I}} = 0$ получаем

$$\sigma_1 = \left[4k_Э^2/(1+k_Э)^2\right] - 1. \tag{13}$$

При $S_{\mathrm{I}} = 0$ и $S_{\mathrm{III}} = 0$, т. е. при коэффициентах σ_1 и σ_2, определяемых формулами (12) и (13), коэффициент остаточной первичной комы равен

$$S_{\mathrm{II}} = (2+k_Э)/2k_Э. \tag{14}$$

Для компенсации остаточной комы в плоскость промежуточного изображения поместим афокальный компенсатор из двух тонких линз. Полученную оптическую систему в параксиальной области можно представить углами α_i и записать в виде:

$$\begin{array}{lll}
\alpha_1 = 0 & & n_1 = 1 \\
\alpha_2 = (1+k_Э)/k_Э & d_1 = -k_Э & n_2 = -1 \\
\alpha_3 = 1 & d_2 = s_2 & n_3 = 1 \\
\alpha_4 & d_3 = 0 & n_4 = n \\
\alpha_5 & d_4 = 0 & n_5 = 1 \\
\alpha_6 & d_5 = 0 & n_6 = n \\
\alpha_7 = 1 & & n_7 = 1
\end{array}$$

α_4, α_6 – см. выражения (15) и (16) соответственно, α_5 – свободный параметр, высота $h_2 = k_Э/(1+k_Э)$. При условии компенсации остаточной комы без влияния на сферическую аберрацию и астигматизм углы

$$\alpha_4 = [(1+\alpha_5)/2]\Big[(1+2n)/(2+n) + [(n-1)/(n+1)][2 + k_Э/\left\{2k_Э(1-\alpha_5^2)\right\}\Big], \tag{15}$$

$$\alpha_6 = [(1+\alpha_5)/2]\Big[(1+2n)/(2+n) - [(n-1)/(n+1)][2 + k_Э/\left\{2k_Э(1-\alpha_5^2)\right\}\Big]. \tag{16}$$

Величина угла α_5 определяет оптические силы линз компенсатора и является свободным параметром, а от величины "стеклянных" углов α_4 и α_6 зависит "прогиб" линз компенсатора, а следовательно, и аберрации образованного ими изображения.

Афокальный двухлинзовый компенсатор обладает двумя коррекционными параметрами: углами α_4 и α_6, что принципиально позволяет компенсировать две монохроматические аберрации. При деформации второй поверхности, описываемой формулой (12), сферическая аберрация и кома изображения, образованного двухзеркальной системой, определяются коэффициентами, соответственно равными

$$S_{\mathrm{I}} = [(1-k_{\text{Э}}^2)/4k_{\text{Э}}^3](1+3k_{\text{Э}}), \qquad (17)$$

$$S_{\mathrm{II}} = (2+k_{\text{Э}})/2k_{\text{Э}}. \qquad (18)$$

Дополнив зеркальную систему афокальным компенсатором и положив коэффициенты, определяющие сферическую аберрацию и кому изображения, образованного системой в целом, равными нулю, получаем

$$\begin{gathered}\alpha_4 = [(2n+1)/(n+2)](1+\alpha_5/2) + \\ +(1/2)[(n-1)/(n+1)]S_{\mathrm{II}}/(1-\alpha_5) + \\ +[(n^2-1)/(n+2)]S_{\mathrm{I}}/2nk_{\text{Э}}S_{\mathrm{II}},\end{gathered} \qquad (19)$$

$$\alpha_5 = \alpha_4 - [(n-1)/(n+1)]S_{\mathrm{II}}(1-\alpha_5), \qquad (20)$$

где коэффициенты S_{I} и S_{II} определяются формулами (17) и (18).

Пусть отражающие поверхности главного и вторичного зеркал имеют форму параболоида вращения и образуют афокальную систему Мерсенна кеплеровского типа. Если в плоскость промежуточного изображения поместить линзовый компонент (например, склеенный из двух тонких линз объектив), то получим оптическую систему зеркально-линзового объектива, оптическая схема которого показана на рис. 2. В этом случае, если осевую точку предмета изобразить в осевой точке главного зеркала, а входной зрачок совместить с его отражающей поверхностью, то выходным зрачком системы будет линзовый компонент. Известно, что изображение, образованное зеркальной системой Мерсенна, свободно от сферической аберрации, комы и астигматизма. Однако тонкий линзовый компонент, расположенный в сходящемся пучке лучей, обладает малой, но вполне конечной толщиной и в рассматриваемой схеме практически эквивалентен плоскопараллельной пластинке. Аберрации, вносимые в изображение линзовым компонентом при таком его расположении, должны быть учтены при аберрационном расчете самого линзового компонента.

Линейная величина промежуточного изображения в подобных системах, как правило, мала. Поэтому линзовый компонент можно выполнить с отверстием в его центральной части. При этом линзовый компонент будет выходным зрачком системы, если входной зрачок расположить в передней фокальной плоскости главного зеркала (по сути дела, в плоскости промежуточного изображения), как показано на рис. 3. Аберрации изображения, образованного рассматриваемой системой, за

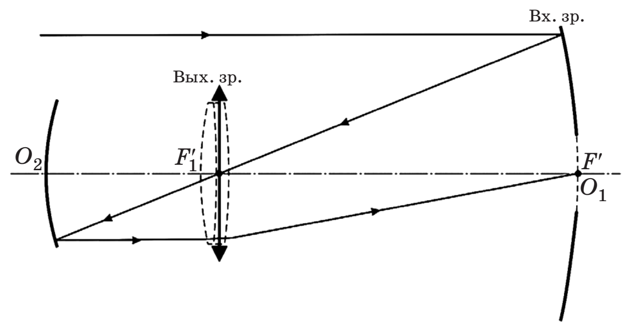

Рис. 2. Оптическая схема зеркально-линзового объектива, построенная на основе применения афокальной системы Мерсенна.

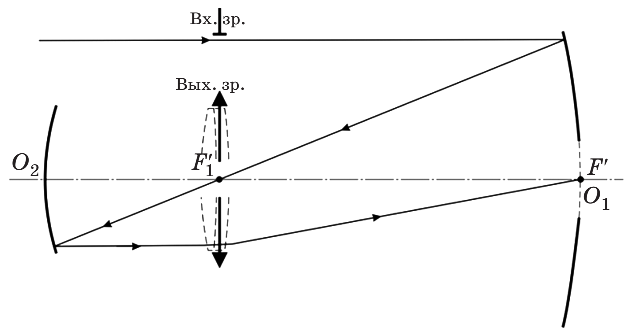

Рис. 3. Оптическая схема зеркально-линзового объектива с афокальной системой Мерсенна.

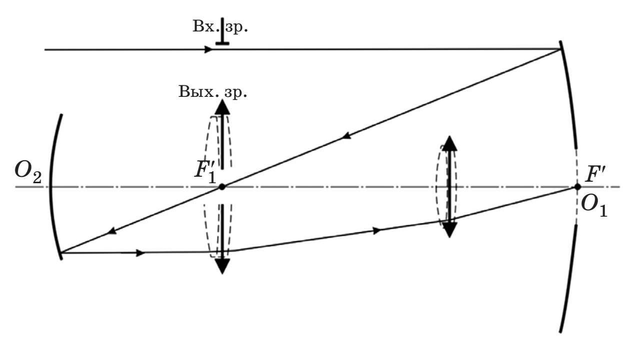

Рис. 4. Оптическая схема объектива, состоящего из афокальной системы Мерсенна и двухкомпонентной линзовой системы (объектива Пецваля).

исключением кривизны его поверхности, соответствуют аберрациям, присущим изображению, образованному тонким линзовым компонентом. Для компенсации остаточного астигматизма тонкий линзовый компонент можно заменить двухкомпонентной системой типа объектива Пецваля, как показано на рис. 4.

Подбором параметров компонентов можно компенсировать не только остаточный астигматизм, но и кривизну поверхности изображения.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Русинов М.М*. Несферические поверхности в оптике. М.: Недра, 1973. 296 с.
2. *Русинов М.М*. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
3. *Слюсарев Г.Г*. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
4. *Зверев В.А*. Основы геометрической оптики. СПбГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.