

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317.2

## ВАРИАНТЫ КОМПОЗИЦИИ ЗЕРКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТИВОВ ГРЕГОРИ И КАССЕГРЕНА

© 2012 г. С. В. Гайворонский; В. А. Зверев, доктор техн. наук

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

E-mail: gaivoronsky@mail.ru, post\_vaz@rambler.ru

Выполнен анализ габаритных параметров и aberrационных характеристик вариантов композиций оптических систем из отражающих поверхностей на основе объективов Грекори и Кассегрена.

**Ключевые слова:** оптическая система, отражающая поверхность, входной зрачок, выходной зрачок, параметры, aberrации.

Коды OCIS: 200.0200, 220.0220

Поступила в редакцию 10.11.2011

Известно, что изображение, образованное системой конфокальных отражающих параболоидов (системой Мерсенна), свободно от сферической aberrации, комы и астигматизма. При нарушении конфокальности поверхностей в системе Мерсенна фокусное расстояние преобразованной системы приобретает конечное значение. Таким путем из системы Мерсенна кеплеровского типа получаем двухзеркальную систему Грекори, а из системы Мерсенна галилеевского типа – систему Кассегрена. В изображении, образованном любой из полученных систем, возникает некоторая сферическая aberrация, устранение которой легко достигается изменением формы поверхности вторичного зеркала на эллиптическую (в системе Грекори) или гиперболическую (в системе Кассегрена). Изменяя эксцентриситет в уравнении сечения меридиональной плоскостью отражающих поверхностей, можно устраниить в образованном изображении не только сферическую aberrацию, но и кому. М.М. Русинов обратил внимание на то, что если изображение, образованное объективом Грекори, расположить в плоскости, проходящей через вершину отражающей поверхности главного (большого) зеркала, то само это зеркало изобразится вторичным зеркалом в плоскости промежуточного изобра-

жения, образованного отражающей поверхностью главного зеркала [1, 2]. Если при этом отражающую поверхность главного зеркала принять в качестве входного зрачка объектива, то его изображение в плоскости промежуточного изображения будет выходным зрачком рассматриваемой оптической системы. В этом случае в выходной зрачок системы можно поместить какой-либо коррекционный элемент, например, дополнительную отражающую поверхность, как показано на рис. 1. Показанную на рисунке оптическую систему в параксимальной области можно записать в виде:

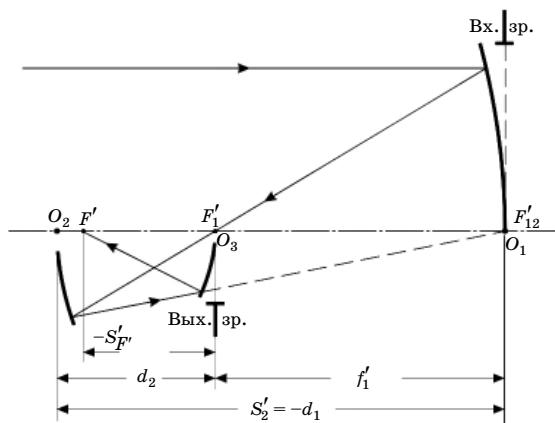


Рис. 1. Оптическая схема объектива с отражающей поверхностью в выходном зрачке.

$$\begin{array}{ll} \alpha_1 = 0 & n_1 = 1 \\ \alpha_2 = & d_1 = n_2 = -1 \\ \alpha_3 = & d_2 = n_3 = 1 \\ \alpha_4 = \alpha' = 1 & n_4 = -1. \end{array}$$

Выразив линейные величины в масштабе фокусного расстояния системы, получаем:  $h_1 = 1$  отношение  $h_2/h_1 = h_2 = -k_\vartheta$  определяет коэффициент центрального экранирования зрачка (осевого пучка лучей) по диаметру. При этом  $-k_\vartheta = 1 - \alpha_2 d_1$ . В соответствии с рисунком справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} d_1 &= -f'_1 - d_2; \alpha_2 = -h_1/f'_1 = -1/f'_1; \\ h_2/h_1 &= -k_\vartheta = -d_2/f'_1; d_2 = k_\vartheta f'_1; \\ h_3 &= h_2 - \alpha_3 d_2 = -k_\vartheta - \alpha_3 k_\vartheta f'_1; h_3/\alpha_3 = f'_1; \\ k_\vartheta + \alpha_3 k_\vartheta f'_1 &= -\alpha_3/f'_1; \alpha_3 = -(1/f'_1)(k_\vartheta/(1 + k_\vartheta)); \\ h_3 &= S'_{F'} \alpha' = S'_{F'}; \end{aligned}$$

пусть

$$S'_{F'} = -k_S d_2,$$

тогда

$$S'_{F'} = -k_S k_\vartheta f'_1;$$

$$h_3 = f'_1 \alpha_3 = -k_\vartheta/(1 + k_\vartheta) = -k_S k_\vartheta f'_1 = 1/(k_S(1 + k_\vartheta)).$$

Коэффициент  $k_\vartheta$  ( $k_\vartheta > 0$ ) величина известная (задана или выбрана); значение коэффициента  $k_S$  выбирается из конструктивных соображений. Значения параметров  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $f'_1$ ,  $S'_{F'}$  определяются полученными соотношениями, которые в соответствии с последовательностью вычислений можно представить в виде:

$$f'_1 = \frac{1}{k_S(1 + k_\vartheta)}, \quad (1)$$

$$\alpha_2 = -\frac{1}{f'_1}, \quad (2)$$

$$d_2 = k_\vartheta f'_1, \quad (3)$$

$$d_1 = -d_2 - f'_1, \quad (4)$$

$$S'_{F'} = -k_S d_2, \quad (5)$$

$$\alpha_3 = \frac{S'_{F'}}{f'_1}. \quad (6)$$

Сферическая aberrация, кома и астигматизм третьего порядка изображения, образованного рассматриваемой оптической системой, определяются соответственно коэффициентами:

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=3} h_i Q_i, \quad (7)$$

$$S_{II} = \sum_{i=1}^{i=3} H_i Q_i - J \sum_{i=1}^{i=3} W_i, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} S_{III} = & \sum_{i=1}^{i=3} \frac{H_i^2}{h_i} Q_i - 2J \sum_{i=1}^{i=3} \frac{H_i}{h_i} W_i + \\ & + J^2 \sum_{i=1}^{i=3} \frac{v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i}{h_i}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $Q_i = P_i + T_i \sigma_i$ ;  $\sigma_i$  – коэффициент “деформации” сферической поверхности в уравнении:  $x^2 + y^2 = 2r_i z - (1 + \sigma_i)z^2$ ;  $J$  – инвариант Лагранжа-Гельмгольца;  $J = n' \alpha' l'$ . Здесь  $n' = -1$ ,  $\alpha' = 1$ ,  $l' = f' \beta_1$ . При  $\beta_1 = 1$  в масштабе фокусного расстояния имеем  $J = -1$ . В рассматриваемом случае высоты точек пересечения главного виртуального луча с главными плоскостями поверхностей равны:  $H_1 = 0$ ; при  $\beta_1 = 1$ , угол  $\beta_2 = -1$ , при этом высота  $H_2 = H_1 - \beta_2 d_1 = d_1 = -1/k_S$ ; высота  $H_3 = 0$ .

Выражения, определяющие коэффициенты первичных aberrаций изображения, образованного рассматриваемой оптической системой, можно представить в виде:

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=3} h_i P_i + T_1 \sigma_1 - k_\vartheta T_2 \sigma_2 - \frac{k_\vartheta}{1 + k_\vartheta} T_3 \sigma_3, \quad (10)$$

$$S_{II} = -\frac{1}{k_S} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \sum_{i=1}^{i=3} W_i, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} S_{III} = & -\frac{1}{k_S^2 k_\vartheta} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \\ & + \frac{2}{k_S k_\vartheta} W_2 + 1 + 2k_S(1 + k_\vartheta) + \frac{1 + k_S}{k_\vartheta}. \end{aligned} \quad (12)$$

Коррекционными параметрами в рассматриваемой оптической системе являются коэффициенты деформации отражающих поверхностей  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ . Из вида выражений (11) и (12) следует, что подбором коэффициента  $\sigma_2$  можно компенсировать или остаточную кому или астигматизм. Следовательно, располагая тремя коррекционными параметрами, можно компенсировать лишь две aberrации из трех. Раскрыв величины, входящие в выражения, определяющие коэффициенты  $S_I$  и  $S_{II}$ , при  $S_{II} = 0$  получаем

$$\sigma_2 = \frac{2 - k_S^2(2k_\vartheta - 1)}{k_S^2(2k_\vartheta - 1)^3}. \quad (13)$$

При этом коэффициент  $S_I$  определяется выражением вида

$$S_I = \frac{1}{4} k_S^3 (1 - k_\Theta)^3 (1 + \sigma_1) - \frac{1 - 2k_\Theta}{2} k_S^3 k_\Theta - \frac{1}{4} \frac{1 - k_S^2 k_\Theta^2}{1 - k_\Theta} (1 - k_S k_\Theta) k_\Theta \left[ 1 - \frac{(1 + k_S k)^2}{(1 - k_S k)^2} \sigma_3 \right]. \quad (14)$$

Отсюда следует, что при  $S_I = 0$  коэффициенты деформации могут принимать и такие значения, как  $\sigma_1 = 0$  при  $\sigma_3 \neq 0$  или  $\sigma_3 = 0$  при  $\sigma_1 \neq 0$ . Очевидным достоинством рассматриваемой оптической системы является то, что при апланатической коррекции aberrаций главное (большое) зеркало может иметь сферическую форму.

Для расширения коррекционных возможностей отражающую поверхность главного зеркала рассматриваемой системы заменим системой из двух отражающих поверхностей типа системы Кассегрена. При этом апертурной диафрагмой может служить отражающая поверхность первого зеркала. Рассмотрим случай, когда апертурной диафрагмой служит отражающая поверхность второго зеркала. Будем считать, что на этой же поверхности расположено изображение, образованное третьей отражающей поверхностью, как показано на рис. 2. В результате параметрического анализа рассматриваемой композиции зеркальной оптической системы получены соотношения, которые можно представить в следующей последовательности параметрического синтеза системы (при  $\alpha_1 = 0; h_1 = -1$ )

$$d_1 = -\frac{k_\Theta}{k_S(k_1 + k_2)}, \quad (15)$$

$$\alpha_2 = \frac{k_\Theta - 1}{d_1}, \quad (16)$$

$$d_2 = -(k_1 + k_2)d_1, \quad (17)$$

$$\alpha_3 = \frac{k_\Theta}{k_1 d_1}, \quad (18)$$

$$d_3 = k_2 d_1, \quad (19)$$

$$\alpha_4 = \frac{k_2}{k_1 + k_2} \frac{k_\Theta}{k_1 d_1}, \quad (20)$$

$$s'_{F'} = \frac{k_2 k_\Theta}{k_1 + k_2}. \quad (21)$$

При  $\beta_1 = 0$  и  $H_2 = 0$  (в плоскости апертурной диафрагмы) получаем:  $H_1 = S_p = 1/(k_s(k_1 + k_2))$ ;  $H_3 = -1/k_3$ ;  $H_4 = 0$ . Первичные aberrации изо-

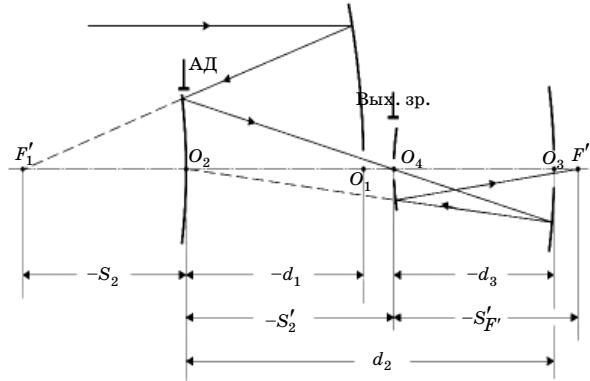


Рис. 2. Оптическая схема зеркального объектива с апертурной диафрагмой на вторичном зеркале.

бражения в рассматриваемом случае определяются коэффициентами [3, 4]:

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=4} h_i P_i - T_1 \sigma_1 - k_\Theta T_2 \sigma_2 + \frac{k_2}{k_1} k_\Theta T_3 \sigma_3 + \frac{k_2 k_\Theta}{k_1 + k_4} T_4 \sigma_4, \quad (22)$$

$$S_{II} = \frac{1}{k_S(k_1 + k_2)} (P_1 + T_1 \sigma_1) - \frac{1}{k_S} (P_3 + T_3 \sigma_3) - \sum_{i=1}^{i=4} W_i, \quad (23)$$

$$S_{III} = -\frac{1}{k_S^2(k_1 + k_2)^2} (P_1 + T_1 \sigma_1) + \frac{k_1}{k_2 k_S^2 k_\Theta} (P_3 + T_3 \sigma_3) + \frac{2}{k_S(k_1 + k_2)} W_1 + \frac{2k_1}{k_2 k_S k_\Theta} W_3 - \frac{(1 - k_\Theta)^2}{k_\Theta^2} k_S (k_1 + k_2) + \frac{k_1 + k_2}{k_2 k_\Theta} (1 + k_S) + \frac{k_S}{k_\Theta}. \quad (24)$$

Положив в выражениях (23) и (24) коэффициенты  $S_{II} = 0$  и  $S_{III} = 0$ , получим систему уравнений, решив которую найдем значения коэффициентов  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Подставив найденные значения этих коэффициентов в формулу (22), при  $S_I = 0$  получим уравнение, содержащее неизвестные коэффициенты  $\sigma_2$  и  $\sigma_4$ . Отсюда следует, что коэффициенты деформации могут принимать и такие значения, как  $\sigma_2 = 0$  при  $\sigma_4 \neq 0$  или  $\sigma_4 = 0$  при  $\sigma_2 \neq 0$ . Таким образом, в рассматриваемой оптической системе при апланатической коррекции aberrаций вторичное зеркало может иметь сферическую форму.

Кривизна поверхности изображения определяется коэффициентом, равным

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^{i=4} \frac{v_i \alpha_{i+1} - v_{i+1} \alpha_i}{h_i} = \\ = -\alpha_2 - \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{h_2} + \frac{\alpha_3 + \alpha_4}{h_3} - \frac{1 + \alpha_4}{h_4}. \quad (25)$$

Заменив углы и высоты определяющими их выражениями, получаем

$$S_{IV} = \frac{k_1 + k_2}{k_\Theta} \left[ \frac{(1 - k_\Theta)^2}{k_\Theta} k_S - \frac{1 + k_S}{k_2} - \frac{k_S}{k_1 + k_2} \right]. \quad (26)$$

Рассматриваемая система имеет вполне конструктивный вид, если принять  $k_1 = k_2 = k_S = 1$ . При этом при  $S_{IV} = 0$  выражение (26) приобретает вид уравнения:  $k_\Theta^2 - (2/9)k_\Theta + 1 = 0$ . Этому уравнению удовлетворяет решение  $k_\Theta = 0,234$ . Таким образом, в рассматриваемой системе возможна компенсация не только сферической аберрации, комы и астигматизма, но и кривизны поверхности изображения.

Рассмотрим вариант композиции оптической системы, когда апертурной диафрагмой является отражающая поверхность главного зеркала. На этой же поверхности расположено ее изображение, образованное второй и третьей отражающими поверхностями системы, как показано на рис. 3. В результате параметрического анализа рассматриваемой композиции зеркальной оптической системы получены соотношения, которые можно представить в следующей последовательности параметрического синтеза системы:

$$d_1 = -\frac{1}{k_S} \frac{k_\Theta}{1 + k_1(1 - k_\Theta)}, \quad (27)$$

$$\alpha_2 = \frac{k_\Theta - 1}{d_1}, \quad (28)$$

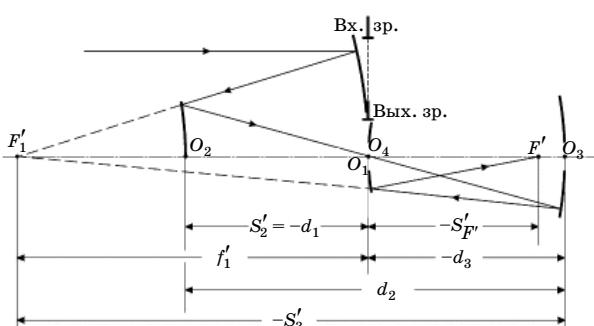


Рис. 3. Оптическая схема зеркального объектива с апертурной диафрагмой на главном зеркале.

$$d_2 = -(1 + k_1)d_1, \quad (29)$$

$$\alpha_3 = \frac{k_\Theta}{d_1}, \quad (30)$$

$$d_3 = k_1 d_1, \quad (31)$$

$$\alpha_4 = \frac{k_1 k_\Theta}{d_1} \frac{1 - k_\Theta}{1 + k_1(1 - k_\Theta)}, \quad (32)$$

$$s'_{F'} = \frac{k_1 k_\Theta}{1 + k_1(1 - k_\Theta)}. \quad (33)$$

При расстоянии от первой отражающей поверхности до входного зрачка  $S_p = 0$  высота  $H_1 = 0$ . При угле  $\beta_1 = 1$  высота  $H_2 = -k_\Theta/(k_S(1 + k_1(1 - k_\Theta)))$ , высота  $H_3 = -1/k_S$ ; главный виртуальный луч пересекает центр выходного зрачка на высоте  $H_4 = 0$ .

Первичные aberrации изображения, образованного рассматриваемой системой, определяются коэффициентами

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=4} h_i P_i - T_1 \sigma_1 - k_\Theta T_2 \sigma_2 + k_1 k_\Theta T_3 \sigma_3 + \\ + \frac{k_1 k_\Theta}{1 + k_1(1 - k_\Theta)} T_4 \sigma_4, \quad (34)$$

$$S_{II} = -\frac{1}{k_S} \frac{k_\Theta}{1 + k_1(1 - k_\Theta)} (P_2 + T_2 \sigma_2) - \\ - \frac{1}{k_S} (P_3 + T_3 \sigma_3) - \sum_{i=1}^{i=4} W_i, \quad (35)$$

$$S_{III} = -\frac{1}{k_S^2} \frac{k}{[1 + k_1(1 - k)]^2} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \\ + \frac{1}{k_1 k_S^2 k_\Theta} (P_3 + T_3 \sigma_3) - \frac{2}{k_S [1 + k_1(1 - k)]} W_2 + \\ + \frac{2}{k_1 k_S k_\Theta} W_3 + k_S \frac{1 - k_\Theta}{k_\Theta} + \\ + \frac{1 + k_1(1 - k_\Theta)}{k_\Theta^2} \left[ k_S (2k_\Theta - 1) + \frac{1 + k_S}{k_1} k_\Theta \right]. \quad (36)$$

Положив в выражениях (35) и (36) коэффициенты  $S_{II} = 0$  и  $S_{III} = 0$ , получим систему из двух уравнений, решив которую найдем значения коэффициентов  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ . Подставив найденные значения коэффициентов в формулу (34), получим уравнение с неизвестными коэффициентами  $\sigma_1$  и  $\sigma_4$ . Отсюда следует, что коэффициенты деформации могут принимать и такие значения, как  $\sigma_1 = 0$  при  $\sigma_4 \neq 0$  или  $\sigma_4 = 0$  при  $\sigma_1 \neq 0$ . Очевидным достоинством рассматриваемой схемы является то, что она не содержит аберраций изображения, что является важным преимуществом зеркальных систем.

ваемой оптической системы является то, что при апланатической коррекции aberrаций главное (большое) зеркало может иметь сферическую форму. Можно показать, что в рассма-

триваемой системе возможна компенсация не только сферической aberrации, комы и астигматизма, но и кривизны 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. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.
-