РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317.1

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2007 г. **В. А. Зверев**, доктор техн. наук; **А. Н. Шепелевич**

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

E-mail: zverev@unitel.spb.ru

С помощью принятых коэффициентов выражена взаимосвязь параметров системы тонких компонентов и получено уравнение, определяющее все многообразие оптических систем из трех тонких зеркальных компонентов. Для типовых случаев построения оптической системы показано, что конкретизация значений коэффициентов, входящих в уравнение, определяется требованиями к габаритным параметрам разрабатываемой оптической системы и к коррекции аберраций образованного ею изображения.

Коды OCIS: 200.0200, 220.0220.

Поступила в редакцию 26.06.2006.

Дополнив каждую отражающую поверхность сферической или несферической формы безаберрационной плоской поверхностью, образуем систему тонких зеркальных компонентов, обладающих оптической силой $\varphi_i = (-1)^i \dfrac{2}{r_i}$, где r_i – радиус кривизны в осевой точке первой по ходу лучей отражающей поверхности компонента, при этом расстояние между i-м и $(i+1)$-м компонентами $d_i = (-1)^i d_{0i}$, где d_{0i} – расстояние между i-й и $(i+1)$-й поверхностями в исходной системе. Будем считать, что в системе из трех компонентов $\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \varphi_3$. Обозначим $\varphi_3 = \varphi_k$, $\varphi_2 = \varphi_0$, а $d_2 = d$. Взаимосвязь параметров определим с помощью соответствующих коэффициентов в виде: $\varphi_1 = k_k\varphi_k$, $\varphi_2 = k_0\varphi_k$, $d_1 = k_t d$, $\varphi_k d = d_k$, $s'_{F'} = k_s d$. Используя формулы $\alpha_{i+1} - \alpha_i = h_i\varphi_i$, $h_{i+1} = h_i - \alpha_{i+1}d_i$, при $\alpha_1 = 0$ получаем

$$\alpha_2 = h_1\varphi_1 = h_1 k_k \varphi_k,$$
$$h_2 = h_1 - \alpha_2 d_1 = h_1\left(1 - k_k k_t d_k\right),$$
$$\alpha_3 = \alpha_2 + h_2\varphi_2 = h_1\varphi_k\left(k_k + k_0 - k d_k\right),$$

где

$$k = k_k k_t k_0,\quad \varphi_{12} = \frac{\alpha_3}{h_1} = \varphi_k\left(k_k + k_0 - k d_k\right),$$
$$h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2 = h_1\left[1 - \left(k_k + k_0 + k_k k_t\right)d_k + k d_k^2\right],$$
$$\alpha_4 = \alpha_3 + h_3\varphi_3 =$$
$$= h_1\varphi_k\left[1 + k_k + k_0 - \left(k_k + k_0 + k_k k_t + k\right)d_k + k d_k^2\right].$$

Используя полученные соотношения, находим, что оптическая сила рассматриваемой оптической системы в целом

$$\varphi = \frac{\alpha_4}{h_1} = \varphi_k\left[1 + k_k + k_0 - \left(k_k + k_0 + k_k k_t + k\right)d_k + k d_k^2\right], \tag{1}$$

а задний фокальный отрезок

$$s'_{F'} = k_s d = \frac{h_3}{\alpha_4} = \frac{1 - \left(k_k + k_0 + k_k k_t\right)d_k + k d_k^2}{\varphi_k\left[1 + k_k + k_0 - \left(k_k + k_0 + k_k k_t + k\right)d_k + k d_k^2\right]}. \tag{2}$$

При этом

$$k_s d_k = \frac{1 - \left(k_k + k_0 + k_k k_t\right)d_k + k d_k^2}{1 + k_k + k_0 - \left(k_k + k_0 + k_k k_t + k\right)d_k + k d_k^2}. \tag{3}$$

Первичная аберрация кривизны поверхности изображения определяется коэффициентом $S_{IV} = \sum\limits_{i=1}^{i=m} \dfrac{\varphi_i}{n_i}$. В рассматриваемом случае $S_{IV} = -\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 = -\varphi_k(1 + k_k + k_0)$. Положив $S_{IV} = 0$, находим, что $1 + k_k + k_0 = 0$. Это соотношение позволяет преобразовать выражения (1) и (3) к виду

$$\varphi = \varphi_k d_k\left[1 + k_k^2 k_t - k_k k_t\left(1 + k_k\right)d_k\right], \tag{4}$$

$$k_s d_k = \frac{1}{d_k}\,\frac{1 + \left(1 - k_k k_t\right)d_k - k_k k_t\left(1 + k_k\right)d_k^2}{1 + k_k^2 k_t - k_k k_t\left(1 + k_k\right)d_k}. \tag{5}$$

Выражение (5) удобно представить уравнением

$$d_k^3 - Ad_k^2 + Bd_k + C = 0, \quad (6)$$

где

$$A = \frac{1}{k_s}\left(1 + \frac{k_s}{k_k k_t}\frac{1 + k_k^2 k_t}{1 + k_k}\right),$$

$$B = \frac{1 - k_k k_t}{k_s k_k k_t\left(1 + k_k\right)}, \; C = \frac{1}{k_s k_k k_t\left(1 + k_k\right)}.$$

Уравнение (6) по сути дела определяет все многообразие оптических систем из трех тонких зеркальных компонентов. Конкретизация значений коэффициентов, входящих в уравнение, определяется требованиями к габаритным параметрам разрабатываемой оптической системы и к коррекции аберраций образованного ею изображения. Так, например, естественно предположить существование системы, для которой коэффициенты $k_t = 1$, $k_s = 1$. Тогда выражения, определяющие коэффициенты уравнения (6), принимают вид

$$A = \frac{1 + k_k + 2k_k^2}{k_k\left(1 + k_k\right)},$$

$$B = \frac{1 - k_k}{k_k\left(1 + k_k\right)}, \; C = \frac{1}{k_k\left(1 + k_k\right)}.$$

В общем случае, решив кубическое уравнение (6) при выбранных значениях коэффициентов k_k, k_t и k_s, находим величину d_k. Из выражения (4) следует, что в масштабе фокусного расстояния всей системы (при $\varphi = 1$) оптическая сила

$$\varphi_k = \frac{1}{d_k}\frac{1}{1 + k_k^2 k_t - k_k k_t\left(1 + k_k\right)d_k}. \quad (7)$$

Определив величину φ_k, находим $d = \dfrac{d_k}{\varphi_k}$, $s'_{F'} = k_s d$, $\varphi_1 = k_k\varphi_k, \varphi_2 = -\left(1 + k_k\right)\varphi_k, \; \varphi_3 = \varphi_k$.

Положив $k_s = k_t = k_k = 1$, получаем $A = 2$, $B = 0$, $C = 0{,}5$. При этом уравнение (6) принимает вид

$$d_k^3 - 2d_k^2 + 0{,}5 = 0.$$

Одно из трех решений этого уравнения дает значение $d_k = 0{,}597$. Подставив соответствующие величины в выражение (7), получаем $\varphi_k = 2{,}078$. В этом случае $d = s'_{F'} = 0{,}287$, $\varphi_1 = \varphi_3 = 2{,}078$, а $\varphi_2 = -4{,}156$.

Важным частным случаем трехкомпонентной зеркальной системы является система, в которой $d_k = 1$, а следовательно, $d = \dfrac{1}{\varphi_k} = f'_k = f'_s$. Таким образом, в этом случае будем иметь телецентрический ход главных лучей в пространстве изображений. Положив $d_k = 1$, при $k_s = k_t = 1$ уравнение (6) преобразуется в уравнение

$$k_k^2 + k_k - 1 = 0.$$

Одно из двух решений этого уравнения дает значение $k_k = 0{,}618$. Заметим, что при $k_k = 0{,}618$ коэффициенты $k_0 = -1 - k_k = -1{,}618$, а $k = k_k k_0 = -1$. Тогда при $\varphi = 1$ и $d_k = 1$ из уравнения (1) находим, что оптическая сила $\varphi_k = 2{,}618$. При этом $\varphi_1 = 1{,}618$, $\varphi_2 = -4{,}236$, $\varphi_3 = 2{,}618$, а $d = 0{,}382$.

Непременной особенностью зеркальных оптических систем является экранирование центральной части световых пучков лучей. Коэффициент центрального экранирования по диаметру входного зрачка

$$\eta = \frac{h_2}{h_1} = 1 - k_k k_t d_k.$$

При этом $d_k = \dfrac{1 - \eta}{k_k k_t}$. Подставив это соотношение в выражение (7), получаем

$$\varphi_k = \frac{1}{1 - \eta}\frac{k_k k_t}{\left(1 + k_k\right)\eta - k_k\left(1 - k_k k_t\right)}. \quad (8)$$

При заданных (или выбранных) значениях коэффициентов k_k, k_t и η задний фокальный отрезок определится выражением (2), которое в результате подстановки соответствующих соотношений и последующих преобразований принимает вид

$$s'_{F'} = \frac{1}{(1 - \eta)\varphi_k}\frac{\eta(1 - \eta) + \eta k_k k_t - (1 - \eta)^2 k_k}{1 - (1 - \eta)k_k k_t + \eta k_k^2 k_t}. \quad (9)$$

Оптические системы, образованные сочетанием отражающих поверхностей, являются единственными системами, применение несферических поверхностей в которых представляется необходимым и естественным. При сравнительно простой конструкции зеркальных оптических систем применение несферических поверхностей позволяет получить изображение хорошего качества в пределах достаточно большого углового поля предмета. Поэтому находят применение оптические системы, в которых в качестве рабочей используется полевая зона изображения (кольцевая часть изображения). При этом лучи, формирующие изображение, проходят вне зоны вторичного зеркала в пространстве предметов, как показано на рис. 1.

Дополнив формально каждую отражающую поверхность трехзеркальной системы $З_1$, $З_2$, $З_3$ плоской поверхностью, образуем эквивалентную ей систему тонких компонентов, показанную на рис. 2. На этом рисунке буквами $Э_1$ и $Э_2$ обозначены положения вторичного зеркала (второго компонента) в роли экрана.

В рассматриваемом случае апертурную диафрагму вполне естественно совместить с оправой вторичного зеркала, а центр ее – с вершиной зеркала.

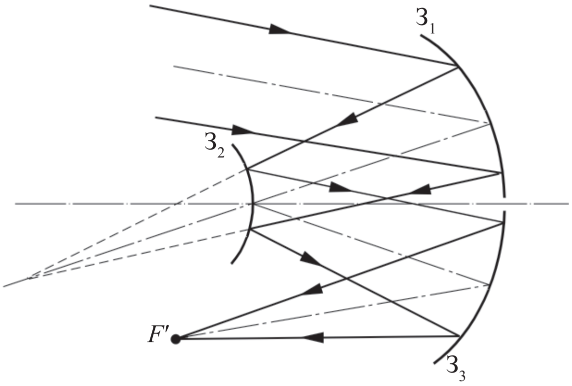

Рис. 1. Формирование изображения внеосевой точки предмета неэкранируемым пучком лучей.

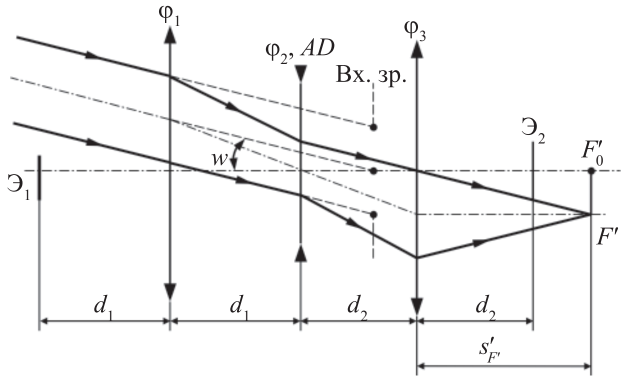

Рис. 2. Оптическая система из трех тонких компонентов, эквивалентная трехзеркальной системе.

При этом отрезок $a'_{p'} = d_1$. Тогда в соответствии с формулой отрезков удаление входного зрачка от первого компонента

$$a_{p_1} = \frac{a'_{p'}}{1 - a'_{p'}\varphi_1} = \frac{d_1}{1 - \varphi_1 d_1}.$$

Отрезок $a_{p_2} = a'_{p_2} = 0$. Тогда $a_{p_2} = -d_2$, а

$$a'_{p_3} = \frac{a_{p_3}}{1 + a_{p_3}\varphi_3} = -\frac{d_2}{1 - \varphi_3 d_2}.$$

Определим минимальный полевй углол, при котором наклонный пучок лучей проходит через оптическую систему без виньетирования.

Диаметр апертурной диафрагмы определяется по ходу осевого пучка лучей следующим очевидным соотношением:

$$D_{AD} = \frac{D_{вх}}{f'_1}\left(f'_1 - d_1\right) = D_{вх}\left(1 - \varphi_1 d_1\right), \tag{10}$$

где $D_{вх}$ – диаметр входного зрачка рассматриваемой оптической системы.

При этом в соответствии с рис. 2 тангенс минимального полевого угла

$$\mathrm{tg}w_{\min} \geq \frac{D_{вх} + D_{AD}}{2\left(d_1 + a_{p_1}\right)} = \frac{1 - \varphi_1 d_1}{2d_1} D_{вх}.$$

При $\dfrac{D_{вх}}{f'} = 2A$, где f' – фокусное расстояние системы в целом,

$$\mathrm{tg}w_{\min} \geq A\frac{1 - k_k k_t \varphi_k d}{k_t d}. \tag{11}$$

Линейные величины, входящие в это выражение, представлены в масштабе фокусного расстояния системы (или при $f' = 1$).

Вполне очевидно, что наклонные световые пучки лучей могут виньетироваться вторичным зеркалом (вторым компонентом) в положении $Э_2$ (как показано на рис. 2). Определим минимальное значение полевого угла при условии отсутствия такого виньетирования.

При известном диаметре D_{AD} апертурной диафрагмы диаметр $D_{вых}$ выходного зрачка определим соотношением

$$D_{вых} = \frac{a'_{p_3}}{a_{p_3}} D_{AD} = \frac{D_{AD}}{1 - \varphi_3 d_2}. \tag{12}$$

Диаметр $D_{св}$ сечения наклонного светового пучка лучей плоскостью апертурной диафрагмы в положении $Э_2$ находим из очевидного соотношения

$$\frac{D_{св}}{s'_{F'} - d_2} = \frac{D_{вых}}{s'_{F'} - a'_{p_3}}.$$

Отсюда следует, что

$$D_{св} = \frac{s'_{F'} - d_2}{s'_{F'} - a'_{p_3}} D_{вых} = \frac{s'_{F'} - d_2}{s'_{F'} - a'_{p_3}} \frac{D_{AD}}{1 - \varphi_3 d_2} = \frac{s'_{F'} - d_2}{s'_{F'}\left(1 - \varphi_3 d_2\right) + d_2} D_{AD}. \tag{13}$$

Тангенс полевого угла $w'_{2\min}$ в пространстве изображений в рассматриваемом случае определяется как $\mathrm{tg}w'_{2\min} = \dfrac{l'}{a'_{p_3} - s'_F}$, где $l' = -f'\mathrm{tg}w_{2\min}$. Отсюда следует, что

$$\mathrm{tg}w'_{2\min} = f'\frac{\mathrm{tg}w_{2\min}}{s'_{F'} - a'_{p_3}}. \tag{14}$$

Пусть $\tilde{l}'$ – расстояние от оптической оси оптической системы до точки пересечения главного луча с плоскостью апертурной диафрагмы в положении $Э_2$. При этом

$$-\tilde{l}' = \left(d_2 - a'_{p_3}\right)\mathrm{tg}w'_{2\min} = \frac{D_{AD} + D_{св}}{2}.$$

Отсюда находим, что

$$\mathrm{tg}w'_{2\min} = \frac{D_{AD} + D_{св}}{2\left(d_2 - a'_{p_3}\right)}.$$

Учитывая соотношения (10), (12)–(14), найденное выражение можно преобразовать к виду

$$\mathrm{tg}w_{2\min} \geq Ak_s\left(1-k_k k_t \varphi_k d\right). \qquad (15)$$

В рассмотренном варианте применения трехкомпонентной зеркальной системы линейный размер полезного изображения в меридиональной плоскости

$$2l' = f'\left[\mathrm{tg}w_{\min} - \mathrm{tg}\left(w_{\min}+2W\right)\right],$$

где $2W$ – требуемое угловое поле оптической системы в пространстве предметов.

Это выражение удобно преобразовать к виду:

$$2l' = -\frac{1+\mathrm{tg}w_{\min}}{1-\mathrm{tg}w_{\min}\mathrm{tg}2W} f'\mathrm{tg}2W =$$

$$= -\frac{1+\mathrm{tg}w_{\min}}{1-2\mathrm{tg}w_{\min}\mathrm{tg}W-\mathrm{tg}^2W} 2f'\mathrm{tg}W.$$

Полученная параметрическая модель трехкомпонентной системы отражающих поверхностей позволяет не только рассчитать оптическую систему с заданными параметрами, но и исследовать взаимосвязь ее параметров с характером коррекции аберраций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зверев В.А., Шепелевич А.Н.* Понятие тонкого компонента в системе отражающих поверхностей // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 21–26.
2. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов. М.–Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.