

10. Богатинский Е. М., Коротаев В. В., Мараев А. А., Тимофеев А. Н. Исследование путей ослабления влияния воздушного тракта в распределенных оптико-электронных системах предупреждения техногенных катастроф // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. № 3 (67). С. 130.
11. Мараев А. А., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н., Пантюшин А. В. Исследование метода спектрально-анализа в оптико-электронной системе предупреждения техногенных катастроф // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 12. С. 80—81.
12. Порфирьев Л. Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. СПб: Изд-во „Лань“, 2013. 400 с.

Сведения об авторах

- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: igor@grv.ifmo.ru
- Антон Андреевич Мараев** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: antoshka87@gmail.com
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru
- Вадим Федорович Гусаров** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: hoarfrost.vg@gmail.com

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
05.03.14 г.

УДК 535.317.226

К. В. ЕЖОВА, В. А. ЗВЕРЕВ, НГУЕН ВАН ЛУЕН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

Рассматриваются методы определения основных параметров оптической системы переменного увеличения при замене реальной оптической системы эквивалентной системой тонких компонентов. Показано, что знание основных параметров компонентов позволяет вычислить текущие значения их абберрационных параметров, получить представление о характере изменения абберрационных свойств системы, а следовательно, оценить возможность уменьшения абберраций изображения путем изменения значений основных параметров.

Ключевые слова: абберрация, переменное увеличение, оптическая система переменного увеличения, коэффициент абберрации, тонкий компонент, основной параметр.

Любая сколь угодно сложная оптическая система, состоящая из произвольного числа элементов (линз), при конечном расстоянии между ее главными плоскостями и отличной от нуля оптической силе называется однокомпонентной, если при всех возможных подвижках она перемещается как единое целое. Однокомпонентную оптическую систему целесообразно представить главными плоскостями, положение которых на оптической оси определяется главными точками H и H' . При известном фокусном расстоянии f' оптической системы и требуемом поперечном увеличении V изображения расстояние L между осевыми точками предмета и изображения определяется формулой [1]

$$L = d_{HH'} - \frac{(1-V)^2}{V} f', \quad (1)$$

где $d_{HH'}$ — расстояние между главными плоскостями.

При конечном расстоянии между предметом и изображением, сформированным одиночным оптическим компонентом, и продольном перемещении компонента величины V и L изменяются согласно зависимости $V = V(L)$, вытекающей из формулы (1) при $f' = \text{const}$, и соответственно $d_{HH'} = \text{const}$. Из этой же формулы следует, что при $f' \neq \text{const}$ возможно соблюдение условия $L = \text{const}$. При этом изменение поперечного увеличения изображения будет определяться зависимостью $V = V(f')$.

Для абберационного анализа реальных оптических систем переменного увеличения целесообразно использовать введенные проф. Г. Г. Слюсаревым понятие „тонкий компонент“ и его основные параметры [2]. Если в однокомпонентной системе толщины линз и воздушные промежутки между ними не считаются коррекционными параметрами, то в первом приближении их можно принять равными нулю. При этом однокомпонентная система представляет собой тонкий компонент, расстояние между главными плоскостями которого равно нулю. Оптическая сила оптической системы, состоящей из двух тонких компонентов φ_1 и φ_2 , равна $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1\varphi_2d$, где d – расстояние между компонентами, при этом $d_{HH'} = -\frac{\varphi_1\varphi_2d^2}{\varphi}$.

Пусть ν -й компонент состоит из k преломляющих поверхностей, разделенных конечными толщинами и воздушными промежутками. Первичные сферическая абберация и кома изображения, сформированного этим оптическим компонентом, определяются соответственно коэффициентами S_I и S_{II} [3]:

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=k} h_i P_i ; \tag{2}$$

$$S_{II} = \sum_{i=1}^{i=k} H_i P_i - J \sum_{i=1}^{i=k} W_i , \tag{3}$$

где $h_1 = s_1\alpha_1$; $H_1 = s_p\beta_1$; s_1 — расстояние от осевой точки предмета до первой поверхности рассматриваемого компонента; s_p — расстояние от центра входного зрачка компонента до его первой поверхности; J — инвариант Лагранжа — Гельмгольца: $J = n\alpha l = 1 \cdot \alpha_1(s_p - s_1)\beta_1$.

Для тонкого компонента выражения, определяющие коэффициенты S_I и S_{II} , принимают следующий вид:

$$S_I = hP; \tag{4}$$

$$S_{II} = HP - JW, \tag{5}$$

где $h = a_1\alpha_1$; $H = a_p\beta_1$; a_1 — расстояние от осевой точки предмета до передней главной плоскости рассматриваемого компонента; a_p — расстояние от центра входного зрачка компонента до его главной плоскости; $J = n\alpha l = 1 \cdot \alpha_1(a_p - a_1)\beta_1$.

Заменим рассматриваемый ν -й компонент тонким с таким расчетом, чтобы коэффициенты, определяемые формулами (2), (3), равнялись коэффициентам, определяемым формулами (4), (5). При этом находим, что параметры P и W определяются выражениями

$$P = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^{i=k} h_i P_i ; \tag{6}$$

$$W = \frac{a_p \beta_1 P - \sum_{i=1}^{i=k} H_i P_i}{\alpha_1 (a_p - a_1) \beta_1} + \frac{s_p - s_1}{a_p - a_1} \sum_{i=1}^{i=k} W_i. \quad (7)$$

Монохроматические первичные aberrации изображения, сформированного тонким компонентом, определяются параметрами P и W , которые функционально связаны с основными параметрами P и W уравнениями вида [2]

$$P = (\alpha' - \alpha)^3 P + 4\alpha(\alpha' - \alpha)^2 W + \alpha(\alpha' - \alpha)[2\alpha(2 + \pi) - \alpha']; \quad (8)$$

$$W = (\alpha' - \alpha)^2 W + \alpha(\alpha' - \alpha)(2 + \pi), \quad (9)$$

где π — свободный параметр компонента, зависящий только от его относительных оптических сил ϕ_i и показателей преломления n_i линз, входящих в компонент [2].

Решая систему уравнений (7), (9) относительно основных параметров, получаем

$$P = \frac{1}{(\alpha' - \alpha)^3} \{P - 4\alpha W + \alpha(\alpha' - \alpha)[(4 + 2\pi)\alpha + \alpha']\}; \quad (10)$$

$$W = \frac{1}{(\alpha' - \alpha)^2} [W - \alpha(\alpha' - \alpha)(2 + \pi)]. \quad (11)$$

Применив формулы (6) и (7), находим значения параметров P и W для одного из компонентов при определенных фиксированных положениях его в системе. Подставив эти значения в формулы (10) и (11), получим значения основных параметров P и W . Однако для другого фиксированного положения компонента получим значения P и W , близкие к значениям основных параметров, но не равные им. Для однозначного определения параметров P и W можно применить следующий способ.

Оптическую систему принято определять радиусами кривизны оптических поверхностей, расстояниями между их осевыми точками и показателями преломления разделяемых поверхностями сред. Известно [1], что $n_{i+1}\alpha_{i+1} - n_i\alpha_i = h_i \frac{n_{i+1} - n_i}{r_i}$. Применив эту формулу ко

всем поверхностям компонента, при $\alpha_1 = 0$ и $h_1 = f'_k$, где f'_k — фокусное расстояние компонента, находим значения углов α_i во всех средах, разделяемых поверхностями компонента, и высот h_i на главных плоскостях поверхностей. При этом параметры P и W , полученные в со-

ответствии с формулами $h_1 P = \sum_{i=1}^{i=k} h_i P_i$ и $W = \sum_{i=1}^{i=k} W_i$, будем считать основными параметрами компонента.

Рассмотрим другой метод определения параметров P и W — на основе результатов расчета реального луча осевого пучка.

При $\alpha = 0$ $\sin \omega' = \frac{m}{f'}$, где m — координата луча на входном зрачке. При этом продольная первичная сферическая aberrация определяется выражением

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} \frac{m^2}{f'^2} S_I,$$

где $S_I = \sum h_i P_i$.

Пусть $m_{кр} = m$ — координата крайнего луча на входном зрачке пучка лучей. Тогда

$$\Delta s'_{кр} = -\frac{1}{2} \frac{m_{кр}^2}{f'^2} S_I. \quad (12)$$

Формула (12) определяет точное значение сферической aberrации, если при $m = \frac{\sqrt{2}}{2} m_{кр}$ соблюдается условие

$$\Delta s' = -\frac{1}{4} \frac{m_{кр}^2}{f'^2} S_I = \frac{1}{2} \Delta s'_{кр}.$$

Уменьшение координаты $m_{кр}$ до некоторой (наибольшей) величины также обеспечивает выполнение этого условия. Тогда при замене реальной оптической системы эквивалентным тонким компонентом имеем $S_I = S_{I\text{экв}} = h_1 P = f' P$. При этом

$$P = -\frac{2f'}{m_{кр}^2} \Delta s'_{кр} = -\frac{4f'}{m_{кр}^2} \Delta s'.$$

Меридиональная составляющая первичной поперечной aberrации изображения, сформированного лучами в меридиональной плоскости, определяется выражением

$$-2\delta g' = \omega^3 S_I + 3\omega'^2 w S_{II} + \dots,$$

где $S_I = h_1 P$ и $S_{II} = H_1 P - JW$.

При $\beta_1 = 1$ размер виртуального изображения $l' = -f' \beta_1 = -f'$. Тогда при $\alpha' = 1$ инвариант $J = n' \alpha' l' = 1 \cdot 1 \cdot (-f') = -f'$. Первичная кома

$$\delta g' = -\frac{3}{2} \omega'^2 w S_{II}. \quad (13)$$

Для тонкого компонента $S_{II} = H_1 P - JW = a_p P + f' W$. Для реальной оптической системы поперечное увеличение изображения в плоскости, сопряженной входному зрачку, принимается равным $V_{зр} = 1^\times$, при этом для тонкого компонента $a_p = 0$. В результате имеем $S_{II} = f' W$. Подставив это выражение в формулу (13), получим

$$\delta g' = -\frac{3}{2} \omega'^2 w S_{II} = \frac{3}{2} \omega'^2 y'.$$

В результате расчета хода луча осевого пучка определяется коэффициент отклонения изображения от условия изопланатизма:

$$\eta = \frac{\Delta f'}{f'} + \frac{\Delta s'}{s'_p - s'_1}.$$

В рассматриваемом случае расстояние s'_p определяется при $V_{зр} = 1^\times$. Тогда величина первичной меридиональной комы определяется выражением

$$\delta g' = 3\eta y'. \quad (14)$$

Формула (14) определяет точное значение меридиональной комы, если при $m = \frac{\sqrt{2}}{2} m_{кр}$ соблюдается условие $\eta = \frac{1}{2} \eta_{кр}$.

Приравняв правые части выражений (13) и (14), получим

$$W = \frac{2\eta}{\omega'^2}.$$

В общем случае оптическая система объектива с переменным фокусным расстоянием состоит из системы оптического сопряжения, системы переменного увеличения и системы переноса изображения [4]. В этом случае при $\alpha_1 = 0$ и $\alpha' = 1$ высота $h_1 = f'$. При каждом значении фокусного расстояния получаем значения углов α и α' для каждого компонента оптической системы.

Для исследования абберационных свойств реальной оптической системы переменного увеличения предложено заменить ее эквивалентной системой тонких оптических компонентов. Рассмотренные методы позволяют определить основные параметры P и W каждого компонента. Используя формулы (8) и (9), находим текущие значения параметров P и W , а следовательно, значения коэффициентов S_I и S_{II} и соответственно значения аббераций. Изложенная последовательность вычислений определяет алгоритм числового моделирования абберационных свойств системы и дает наглядное представление о характере изменения аббераций. Бесспорное достоинство рассмотренных методов анализа абберационных свойств системы заключается в возможности улучшения качества изображения путем изменения основных параметров компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М. — Л.: Машиностроение, 1966. 564 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. Ежова К. В., Зверев В. А., Нгуен Ван Луен. Абберационные свойства тонкого компонента как базового элемента композиции оптической системы переменного увеличения // Оптич. журн. 2013. Т. 80, № 12. С. 26—30.

Сведения об авторах

- Ксения Викторовна Ежова** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра прикладной и компьютерной оптики, Санкт-Петербург; E-mail: ezhovakv@aco.ifmo.ru
- Виктор Алексеевич Зверев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра прикладной и компьютерной оптики, Санкт-Петербург; E-mail: post_vaz@rambler.ru
- Нгуен Ван Луен** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра прикладной и компьютерной оптики, Санкт-Петербург; E-mail: ngvluyen@yahoo.com

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
24.02.14 г.