

АБЕРРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОГО КОМПОНЕНТА КАК БАЗОВОГО ЭЛЕМЕНТА КОМПОЗИЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

© 2013 К. В. Ежова, канд. техн. наук; В. А. Зверев, доктор техн. наук;
Нгуен Ван Луен

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: post_vaz@rambler.ru

Применение аналитических соотношений взаимосвязи основных параметров тонкого компонента с параметрами при произвольном его положении относительно плоскости предмета позволило выполнить анализ изменения состояния коррекции аберраций при его перемещении.

Ключевые слова: .

Коды OCIS: 240.0240, 080.1735.

Поступила в редакцию 11.07.2013.

Расчет системы переменного увеличения (СПУ) в области параксиальных соотношений сводится к выбору оптической силы компонентов системы и определению закона их перемещений, при которых достигается требуемый диапазон изменения поперечного увеличения изображения. Очевидно, что диапазон и закон перемещения компонентов определяются их начальным положением, в основу определения которого может быть положено требование минимальной длины системы, наиболее близкой к линейной закономерности их перемещения и др. Затем следует выбор конструкции оптической системы компонентов и оптимизация их конструктивных параметров по критерию качества изображения, как правило, при трех значениях поперечного увеличения, т.е. в трех положениях компонентов. Такой выбор диапазона перемещения компонентов далеко не всегда может оказаться наиболее благоприятным для сохранения неизменной коррекции аберраций. Поэтому разработка метода абберрационной оценки выбранного диапазона перемещения компонентов является весьма актуальной задачей.

Очевидно, что любая оптическая СПУ может существовать лишь при конечном расстоянии между предметом и его изображением. Если предмет расположен на бесконечном расстоянии, то для оптического сопряжения плоскости предмета с плоскостью предмета оптической СПУ необходима дополнительная оптическая система. Сочетание объектива φ_0 с СПУ $\varphi_{СПУ}$ образует объектив переменного фокусного расстояния. В этой схеме реально возможны три комбинации оптических сил компонентов: $\varphi_0 > 0$, $\varphi_{СПУ} > 0$; $\varphi_0 > 0$, $\varphi_{СПУ} < 0$; $\varphi_0 < 0$, $\varphi_{СПУ} > 0$.

Оптическая сила двухкомпонентной системы определяется как $\varphi = \varphi_0 + \varphi_{СПУ} - \varphi_0 \varphi_{СПУ} d$, где d – расстояние между задней главной плоскостью компонента φ_0 и передней главной плоскостью компонента $\varphi_{СПУ}$. В случае однокомпонентной системы переменного увеличения изменение фокусного расстояния системы в целом достигается за счет изменения расстояния d путем продольного перемещения компонента $\varphi_{СПУ}$ или его предметной плоскости, т.е. объектива φ_0 . Пусть, например, смещается объектив φ_0 . Тогда при изменении фокусного рас-

стояния изменяется и задний фокальный отрезок системы $a'_F = (1 - \varphi_0 d)/\varphi$. Для компенсации возникающей в этом случае расфокусировки изображения необходимо дополнительное смещение обоих компонентов на величину изменения этого отрезка.

В случае однокомпонентной оптической системы переменного увеличения от выбора начального значения при одной и той же кратности изменения увеличения зависит расстояние между предметом и изображением. Поэтому начальное значение увеличения выбирают, как правило, из соображений габаритных размеров. Этот выбор может оказаться неоптимальным с точки зрения наилучшего сохранения коррекции аберраций изображения при перемещении компонента. Для выбора начального значения увеличения из условия сохранения качества изображения необходимо установить аналитическую зависимость аберрационных свойств изображения от текущих значений поперечного увеличения изображения. Для исследования аберрационных свойств реальную оптическую систему заменим эквивалентной системой тонких оптических компонентов.

Первичные монохроматические аберрации изображения, сформированного оптической системой, определяются соответствующими коэффициентами S_i . В рассматриваемом случае S_i^{OC} – коэффициент первичных аберраций изображения, сформированного системой оптического сопряжения плоскости изображаемого предмета с плоскостью предмета системы переменного увеличения; $S_i^{СПУ}$ – коэффициент первичных аберраций изображения, сформированного системой переменного увеличения.

В свою очередь коэффициенты первичных аберраций определяются параметрами P и W , функционально связанными с основными параметрами \mathbf{P}^* и \mathbf{W}^* тонкого компонента уравнениями вида [1]

$$P = (\alpha' - \alpha)^3 \mathbf{P}^* + 4\alpha(\alpha' - \alpha)^2 \mathbf{W}^* + \alpha(\alpha' - \alpha) \times [2\alpha(2 + \pi) - \alpha'], \quad (1)$$

$$W = (\alpha' - \alpha)^2 \mathbf{W}^* + \alpha(\alpha' - \alpha)(2 + \pi). \quad (2)$$

В том случае, когда апертурной диафрагмой служит оправа первого компонента, его относительное отверстие сохраняется неизменным при изменении фокусного расстояния объектива. При этом, если $\alpha_{OC} = 0$, угол α'_{OC} естественно принять равным единице. Тогда для системы оптического сопряжения уравнения (1) и (2) принимают вид

$$P_{OC} = \mathbf{P}^*_{OC}, \quad (3)$$

$$W_{OC} = \mathbf{W}^*_{OC}. \quad (4)$$

В этом случае для системы переменного увеличения угол $\alpha_{СПУ} = \alpha'_{OC} = 1$, а угол $\alpha'_{СПУ} = 1/V_{СПУ}$. Обозначив $V_{СПУ} = V$, получаем

$$P_{СПУ} = [(1 - V)^3/V^3] \mathbf{P}^*_{СПУ} + 4[(1 - V)^2/V^2] \times \mathbf{W}^*_{СПУ} + [(1 - V)/V^2][2V(2 + \pi) - 1], \quad (5)$$

$$W_{СПУ} = [(1 - V)^2/V^2] \mathbf{W}^*_{СПУ} + [(1 - V)/V](2 + \pi). \quad (6)$$

Первичные аберрации широкого пучка лучей определяются коэффициентами S_I (сферическая аберрация) и S_{II} (кома).

Поперечная сферическая аберрация изображения, сформированного системой оптического сопряжения, определяется как

$$\delta g'_{OC} = (-1/2)\omega'^3_{OC} S^0_1. \quad (7)$$

Поперечная сферическая аберрация изображения, сформированного оптической системой переменного увеличения, определяется выражением

$$\delta g'_{СПУ} = -(1/2)\alpha'_{СПУ}\omega^3_{СПУ} S^{СПУ}_1 = (-V/2)\alpha'_{OC}\omega^3_{СПУ} S^{СПУ}_1 = (-1/2)V\omega'^3_{OC} S^{СПУ}_1. \quad (8)$$

При этом сферическая аберрация изображения, сформированного рассматриваемой оптической системой в целом, –

$$\delta g' = V\delta g'_{OC} + \delta g'_{СПУ} = -(1/2)V\omega'_{OC} S_1, \quad (9)$$

где $S_1 = S^{OC}_1 + S^{СПУ}_1$.

Аналогично находим, что меридиональная кома изображения –

$$\delta g' = -(3/2)V\omega'^2_{OC} w_{10c} S_{II}, \quad (10)$$

где $S_{II} = S^{OC}_{II} + S^{СПУ}_{II}$.

В рассматриваемом случае

$$S_I = h_{OC} P_{OC} + h_{СПУ} P_{СПУ}, \quad (11)$$

$$S_{II} = H_{OC} P_{OC} + H_{СПУ} P_{СПУ} + f'_{OC}(W_{OC} + W_{СПУ}). \quad (12)$$

Расстояние от оптической оси до точки падения осевого виртуального луча на первый компонент –

$$h_{oc} = f'_{oc}\alpha'_{oc} = f'_{oc}, \quad (13)$$

расстояние

$$\begin{aligned} h_{спв} &= h_{oc} - \alpha'_{oc}d = h_{oc} - d = \\ &= h_{oc} - f'_{oc} + a_{спв} = ((1 - V)/V)f'_{спв}. \end{aligned} \quad (14)$$

Подставив соотношения (3), (5), (13) и (14) в выражение (11), получаем

$$\begin{aligned} S_I &= f'_{oc}P_{oc}^* + ((1 - V)^2/V^3)f'_{спв}[(1 - V)^2/V]P_{спв}^* + \\ &+ 4(1 - V)W_{спв}^* + 2V(2 + \pi) - 1] \end{aligned} \quad (15)$$

Расстояние от оптической оси до точки падения главного виртуального луча на первый компонент $H_{oc} = 0$. При этом

$$H_{спв} = H_{oc} - \beta'_{oc}d = -d = -f'_{oc}((1 - V)/V)f'_{спв}. \quad (16)$$

С учетом соотношений (4)–(6) и (16) выражение (12) можно представить в виде

$$\begin{aligned} S_{II} &= (((1 - V)/V)f'_{спв} - f'_{oc})\{((1 - V)^3/V^3)P_{спв}^* + \\ &+ 4((1 - V)^2/V^2)W_{спв}^* + (1 - V)/V^2[2V(2 + \pi) - 1]\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для ряда значений $V = V_1$ находим ряд значений $V = V_2$, удовлетворяющих требуемой кратности m изменения поперечного увеличения. Для каждого интервала $[V_1, V_2]$ значений поперечного увеличения выбираем среднее значение V_3 . Подставляя последовательно эти значения поперечного увеличения в уравнение (15), при $S_I = 0$ получаем систему из трех линейных уравнений, решая которую, находим $P_{спв}$, $W_{спв}$ и $\tilde{P}_{oc} = f'_{oc}P_{oc}^*/f'_{спв}$. Подставив найденные значения величин в уравнение (15), определяем зависимость $\tilde{S}_I = VS_I/f'_{спв} = \tilde{S}_I(V)$. Из условия равенства абсолютных значений экстремальных отклонений \tilde{S}_I^{extr} от нулевого значения уточняем величину V_3 . Подставив те же значения величин в уравнение (17), определяем зависимость $\tilde{S}_{II} = VS_{II}/f'_{спв} = \tilde{S}_{II}(V)$ и сопоставляем ее с зависимостью $S_I(V)$ для каждого интервала $[V_1, V_2]$. Рассмотренный подход к анализу абберационных свойств двухкомпонентной системы с однокомпонентной системой переменного уве-

личения позволяет выбрать интервал значений поперечного увеличения при наилучшем сочетании абберационных характеристик сформированного изображения.

При $V_{спв} < 0$ оптический компонент $\varphi_{спв}$ образует мнимое изображение, что определяет необходимость дополнения рассматриваемой схемы оптической системой переноса изображения (СПИ) – $\varphi_{спи}$. Поперечное увеличение изображения, сформированного системой $\varphi_{спи}$, соответствует условию $V_{спи} < 0$. В результате получаем, что поперечное увеличение изображения, сформированного оптической системой рассматриваемой схемы, равно $V = V_{спв}V_{спи} > 0$.

Если апертурная диафрагма расположена в пространстве изображений СПУ, относительное отверстие объектива сохраняется неизменным при изменении его фокусного расстояния. Сохраняется неизменным и поперечное увеличение $V_{спи}$ изображения, сформированного системой переноса изображения. В этом случае естественно принять для всей рассматриваемой оптической системы угол $\alpha' = 1$. При этом угол $\alpha_{спи} = V_{спи}$. Тогда первичные монохроматические абберации сформированного изображения определяются соответствующими коэффициентами S_i , каждый из которых в рассматриваемом случае можно заменить суммой

$$S_i = S_i^{oc} + S_i^{спв} + S_i^{спи}, \quad (18)$$

где $S_i^{спи}$ – коэффициент первичных аббераций изображения, сформированного СПИ. В свою очередь, коэффициенты первичных аббераций определяются параметрами P и W , функционально связанными с основными параметрами P^* и W^* уравнениями (1) и (2). Для системы переноса изображения уравнения (1) и (2) принимают вид

$$\begin{aligned} P_{спи} &= (1 - V_{спи})^3P_{спи}^* + 4V_{спи}(1 - V_{спи})^2W_{спи}^* + \\ &+ V_{спи}(1 - V_{спи})[2V_{спи}(2 + \pi) - 1], \end{aligned} \quad (19)$$

$$W_{спи} = (1 - V_{спи})^2W_{спи}^* + V_{спи}(1 - V_{спи})(2 + \pi). \quad (20)$$

В этих уравнениях величина $V_{спи}$ может принимать произвольное, но неизменное при изменении фокусного расстояния, значение.

Для СПУ угол $\alpha'_{спв} = V_{спи}$, а угол $\alpha_{спв} = V_{спв}V_{спи}$. Обозначив $V_{спв} = V$, получаем

$$P_{\text{СПУ}} = V_{\text{СПУ}}^3 \left\{ (1 - V)^3 \mathbf{P}_{\text{СПУ}}^* + 4V(1 - V)^2 \mathbf{W}_{\text{СПУ}}^* + V(1 - V)[2V(2 + \pi) - 1] \right\}, \quad (21)$$

$$W_{\text{СПУ}} = V_{\text{СПУ}}^2 \left[(1 - V)^2 \mathbf{W}_{\text{СПУ}}^* + V(1 - V)(2 + \pi) \right]. \quad (22)$$

Для системы оптического сопряжения плоскости изображаемого предмета с плоскостью предмета СПУ угол $\alpha_{\text{ОС}} = 0$, а угол $\alpha'_{\text{ОС}} = \alpha_{\text{СПУ}} = V_{\text{СПУ}} V$. При этом система уравнений (4) и (5) принимает вид

$$P_{\text{ОС}} = V_{\text{СПИ}}^3 V^3 \mathbf{P}_{\text{ОС}}^*, \quad (23)$$

$$W_{\text{ОС}} = V_{\text{СПИ}}^2 V^2 \mathbf{W}_{\text{ОС}}^*. \quad (24)$$

Коэффициенты S_I и S_{II} , определяющие аберрации широкого пучка лучей, в рассматриваемом случае равны

$$S_I = h_{\text{ОС}} P_{\text{ОС}} + h_{\text{СПУ}} P_{\text{СПУ}} + h_{\text{СПИ}} P_{\text{СПИ}}, \quad (25)$$

$$S_{II} = H_{\text{ОС}} P_{\text{ОС}} + H_{\text{СПУ}} P_{\text{СПУ}} + H_{\text{СПИ}} P_{\text{СПИ}} + f'(W_{\text{ОС}} + W_{\text{СПУ}} + W_{\text{СПИ}}), \quad (26)$$

$$\text{где высота } h_{\text{ОС}} = f' \alpha' = f'_{\text{ОС}} V_{\text{СПИ}} V_{\text{СПУ}} = f'_{\text{ОС}} V_{\text{СПИ}} V. \quad (27)$$

Очевидно, что

$$h_{\text{СПИ}} = a_f \alpha' = (1 - V_{\text{СПИ}}) f'_{\text{СПИ}}. \quad (28)$$

Задний отрезок однокомпонентной системы переменного увеличения $a'_{\text{СПУ}} = (1 - V) f'_{\text{СПУ}}$, при этом

$$h_{\text{СПУ}} = a'_{\text{СПУ}} \alpha'_{\text{СПУ}} = (1 - V) V_{\text{СПИ}} f'_{\text{СПУ}}. \quad (29)$$

Подставив выражения (19), (21), (23), (27)–(29) в уравнение (25), получаем

$$S_I = V^4 V_{\text{СПИ}}^4 f'_{\text{ОС}} \mathbf{P}_{\text{ОС}}^* + (1 - V) V_{\text{СПИ}}^4 f'_{\text{СПУ}} \left\{ (1 - V)^3 \mathbf{P}_{\text{СПУ}}^* + 4V(1 - V)^2 \mathbf{W}_{\text{СПУ}}^* + V(1 - V)[2V(2 + \pi) - 1] \right\} + S_I^{\text{СПИ}}, \quad (30)$$

где

$$S_I^{\text{СПИ}} = (1 - V_{\text{СПИ}}) f'_{\text{СПИ}} \left\{ (1 - V_{\text{СПИ}})^3 \mathbf{P}_{\text{СПИ}}^* + 4V_{\text{СПИ}} \times (1 - V_{\text{СПИ}})^2 \mathbf{W}_{\text{СПИ}}^* + V_{\text{СПИ}} (1 - V_{\text{СПИ}})[2V_{\text{СПИ}}(2 + \pi) - 1] \right\}. \quad (31)$$

Коэффициент $S_I^{\text{СПИ}}$ может принимать произвольное, но неизменное в конкретной схеме, значение.

Пусть в первом приближении $S_I^{\text{СПИ}} = 0$. Тогда при $S_I = 0$ при трех значениях поперечного увеличения выражение (30) преобразуем в систему трех линейных уравнений, решая которые, находим значения величин $\mathbf{P}_{\text{СПУ}}^*$, $\mathbf{W}_{\text{СПУ}}^*$ и $f'_{\text{ОС}} \mathbf{P}_{\text{ОС}}^* / f'_{\text{СПУ}}$. Затем находим функциональную зависимость $\tilde{S}_I = S_I / (V_{\text{СПИ}}^4 f'_{\text{СПУ}}) = \tilde{S}_I(V)$. Для выбора наилучшего сочетания аберрационных характеристик применяем тот же подход, что и для двухкомпонентной системы с однокомпонентной СПУ.

Известно, что в двухкомпонентной схеме при нелинейном перемещении компонентов возможна полная компенсация расфокусировки изображения [2, 3]. В этом случае начальное значение поперечного увеличения изображения, знак и параметры оптических компонентов, величина перемещений компонентов выбираются, как правило, из соображений компактности системы в целом. Однако и в этом случае важно уточнить значения выбранных параметров системы из условия сохранения состояния коррекции аберраций неизменным при изменении поперечного увеличения изображения. Очевидно, что в оптической системе из двух компонентов число основных параметров удваивается. Параметры \mathbf{P}_1^* , \mathbf{P}_2^* , \mathbf{W}_1^* и \mathbf{W}_2^* позволяют сохранить параметр P неизменным, по крайней мере, при четырех значениях поперечного увеличения V . Таким образом, в случае двухкомпонентной СПУ имеем четыре основных параметра и один параметр, который должен оставаться неизменным при пяти значениях поперечного увеличения. В результате получаем систему из пяти линейных уравнений с пятью неизвестными. Возможность сохранения более стабильной коррекции аберраций позволяет существенно (в несколько раз) увеличить перепад поперечного увеличения изображения, сформированного двухкомпонентной системой переменного увеличения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
 2. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов. М.–Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
 3. *Журова С. А., Зверев В.А.* Основы композиции принципиальных схем оптических систем переменного увеличения // Оптический журнал. 1999. №10. С. 68–85.
-