

Линзовый светосильный объектив для инфракрасной области спектра

В.И. Кузичев¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Светосильные линзовые объективы для инфракрасной области спектра требуют применения дорогостоящих кристаллов. Поэтому в таких объективах простейшей схемой следует считать схему из двух линз, расположенных на конечном расстоянии. Для расширения коррекционных возможностей схемы с целью обеспечения высокого качества изображения необходимы асферические поверхности. Предложена методика проектирования такого объектива, обеспечивающая качественное исправление всех монохроматических aberrаций кроме дисторсии и даны рекомендации по уменьшению aberrаций хроматизм положения и хроматизм увеличения. Приведен пример расчета объектива с относительным отверстием 1:1,2, угловым полем 15° и качеством изображения, близким к дифракционному.

E-mail: rl-3@mx.bmstu.ru

Ключевые слова: aberrация, асферическая поверхность, качество изображения, коррекция.

Широкое применение оптико-электронных систем, работающих в инфракрасной (ИК) области спектра, ставит перед оптотехникой задачу создания светосильных объективов с высоким качеством изображения. Использование матричных приемников излучения с конечными размерами чувствительной поверхности требует соответствующего углового поля объективов. В таких объективах требуется качественная коррекция aberrаций как для точки на оси, так и в пределах заданного углового поля. При использовании только сферических поверхностей данная степень коррекции может быть обеспечена только в сложных, многолинзовых системах. С другой стороны, в качестве материалов, прозрачных для далекой ИК-области спектра (например, в интервале длин волн 8...14 мкм) необходимо применение дорогостоящих кристаллов. Поэтому наиболее рациональным вариантом светосильного объектива следует считать двухлинзовый объектив с асферическими поверхностями. Качественная коррекция aberrаций объектива для точек вне оси может быть обеспечена только при условии исправления кривизны Петцваля ($S_{IV} \approx 0$), поэтому одна из линз должна быть отрицательной. Таким образом, удовлетворение всех указанных выше противоречивых условий можно обеспечить в оптической схеме телеобъектива.

Анализ коррекционных возможностей оптической схемы телеобъектива как системы, состоящей из двух тонких компонентов, может быть проведен на основе теории aberrаций третьего порядка. Уже на первоначальной стадии этого анализа желательно зафиксиро-

вать положение апертурной диафрагмы (АД). Так как в схеме светосильного телеобъектива максимальный диаметр будет иметь первый компонент, то апертурной диафрагмой и входным зрачком объектива должна быть оправа первого компонента.

Оптическая схема телеобъектива как системы тонких компонентов при выбранном положении апертурной диафрагмы приведена на рис. 1. Рассматривая объектив как приведенную оптическую систему, для параметров первого и второго вспомогательных лучей будем иметь: $\alpha_1 = 0$; $h_1 = 1$; $\alpha_3 = 1$; $\beta_1 = 1$; $H_1 = 0$. Если φ_1 и φ_2 — приведенные оптические силы линз, то кривизна Петцваля будет определяться выражением [1]:

$$S_{IV} = \frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2}. \quad (1)$$

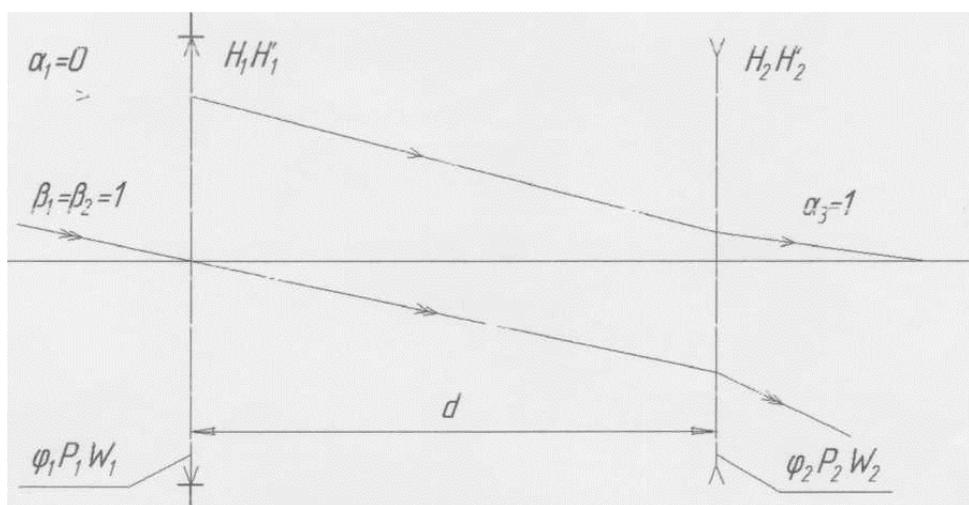


Рис. 1. Оптическая схема телеобъектива из тонких компонентов

Суммы Зейделя, определяющие монохроматические аберрации объектива, выраженные через параметры P_1 , W_1 первой линзы и P_2 , W_2 второй линзы будут иметь вид:

$$\begin{aligned} S_I &= P_1 + h_2 P_2; \\ S_{II} &= W_1 + H_2 P_2 + W_2; \\ S_{III} &= \varphi_1 + \frac{H_2^2}{h_2} P_2 + 2 \frac{H_2}{h_2} W_2 + \varphi_2. \end{aligned} \quad (2)$$

В формулах (2) нет дисторсии S_V , так как эта аберрация не влияет на размер пятна рассеивания. Согласно формулам (2) астигматизм S_{III} объектива при расположении апертурной диафрагмы на первом компоненте ($H_1 = 0$) зависит только от конструкции второго компонента

(P_2, W_2). Сферическая aberrация S_I и кома объектива S_{II} зависят от конструкции как первого, так и второго компонентов. При решении системы уравнений (2) следует иметь в виду, что для одиночной линзы со сферическими поверхностями параметр W может быть как положительным, так и отрицательным, в то время как параметр P всегда положительный. Если одну из поверхностей одиночной линзы сделать асферической, то можно получить отрицательные значения параметра P . При введении асферики параметр W не изменяется.

Согласно формулам (2) при расположении апертурной диафрагмы на первой линзе асферичность поверхности на второй линзе будет влиять на сферическую aberrацию S_I , кому S_{II} и астигматизм S_{III} , в то время как асферическая поверхность на первой линзе будет влиять только на сферическую aberrацию.

Поскольку асферическая поверхность не влияет на изменение кривизны Петцваля S_{IV} , то формулы (2) для оптической системы с асферическими поверхностями имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} S_{Ia} &= S_I + \Delta S_{Ia}; \\ S_{IIa} &= S_{II} + \Delta S_{IIa}; \\ S_{IIIa} &= S_{III} + \Delta S_{IIIa}, \end{aligned} \quad (3)$$

где S_I, S_{II} и S_{III} — суммы aberrаций третьего порядка оптической системы со сферическими поверхностями; $\Delta S_{Ia}, \Delta S_{IIa}, \Delta S_{IIIa}$ — поправки к соответствующим суммам, обусловленные введением асферических поверхностей:

$$\begin{aligned} \Delta S_{Ia} &= \sum_1^q b_k \frac{\delta n_k}{r_k^3} h_k^4; \\ \Delta S_{IIa} &= \sum_1^q b_k \frac{\delta n_k}{r_k^3} h_k^3 H_k; \\ \Delta S_{IIIa} &= \sum_1^q b_k \frac{\delta n_k}{r_k^3} h_k^2 H_k^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь b_k — коэффициент деформации сферической поверхности, равный квадрату эксцентриситета поверхности второго порядка с обратным знаком ($b_k = e_k^2$).

Указанное выше разделение влияния параметров P_1 и P_2 на суммы $\Delta S_{IIa}, \Delta S_{IIIa}$ позволяет рациональным образом получить заданные значения ΔS_{IIa} и ΔS_{IIIa} , а затем с помощью параметра P_1 получить заданное значение ΔS_{Ia} , сохранив неизменными ΔS_{IIa} и ΔS_{IIIa} .

Хроматизм положения $S_{I_{xp}}$ и хроматизм увеличения $S_{II_{xp}}$ объектива из двух тонких линз при апертурной диафрагме (входном зрачке), совпадающей с первым компонентом будут определяться по формулам ($H_1 = 0$):

$$\begin{aligned} S_{I_{xp}} &= -\frac{\varphi_1}{\nu_1} - \frac{h_2^2 \varphi_2}{\nu_2}; \\ S_{II_{xp}} &= -\frac{\varphi_2 H_2 h_2}{\nu_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку оба компонента объектива являются одиночными линзами, то хроматизм увеличения $S_{II_{xp}}$ принципиально не исправляется. Его можно существенно уменьшить, если в качестве материала второй линзы использовать кристалл с высоким коэффициентом дисперсии (ν). Хроматизм положения $S_{I_{xp}}$ при $\varphi_1 > 0$ и $\varphi_2 < 0$ можно исправить подбором соответствующих коэффициентов дисперсии ($\nu_1 > \nu_2$). Однако, учитывая высокое относительное отверстие объектива ($D/f' > 1:1,5$), рационально хроматизм положения сделать недоисправленным $S_{I_{xp}} < 0$, чтобы обеспечить исправление сферохроматической аберрации на зоне зрачка.

Согласно предложенной выше методике был разработан вариант светосильного двухлинзового объектива, имеющего следующие основные характеристики: фокусное расстояние $f' = 100$ мм, относительное отверстие $D/f' = 1:1,2$, угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 15^\circ$. Объектив предназначен для работы в дальней ИК-области спектра в диапазоне длин волн от $\lambda_1 = 8$ мкм до $\lambda_2 = 12$ мкм. Монохроматические аберрации корригировались для основной длины волны $\lambda_0 = 10$ мкм. В качестве материалов линз использовались [2]: в положительной линзе — кремний ($n_{\lambda_0} = 3,4179$, $\nu = 1\,900$), в отрицательной — германий ($n_{\lambda_0} = 4,0025$, $\nu = 910$).

В первоначальной стадии расчета светосильного объектива следует иметь в виду, что приведенные оптические силы компонентов объектива не должны превышать 1,1—1,3. В противном случае могут быть недопустимо большими аберрации высших порядков как для точки на оси, так и для точек вне оси. При известных показателях преломления обеих линз, задавшись кривизной Петцваля ($S_{IV} = 0,05 \dots 0,1$) и оптической силой одной из линз, согласно (1) определяем оптическую силу другой линзы. После этого, выполняя условие масштаба, определяем расстояние между линзами и все внешние параметры первого (α и h) и второго (β и H) вспомогательных лучей. По формулам (5) вычисляем обе хроматические суммы, а по формулам (2)—(4) параметры P и W , а также эксцентриситеты кривых вто-

рого порядка, удовлетворяющие заданным значениям монохроматических сумм Зейделя. С учетом технологических особенностей контроля асферических поверхностей асферической рационально делать вогнутую поверхность.

Учитывая указанные выше рекомендации, был разработан исходный вариант двухлинзового объектива. Приняв $\varphi_1 = 1,05$ и задавшись $S_{IV} = 0,05$ по формуле (1) определяем $\varphi_2 = -0,58$, а расстояние между линзами приведенного объектива $d = 0,7$. Рассчитав параметры первого и второго вспомогательных лучей и задавшись суммами Зейделя $S_{Ia} = 0,02$; $S_{IIa} = -0,03$; $S_{IIIa} = -0,03$, по формулам (2)—(4) определяем параметры P и W каждой линзы и квадраты эксцентриситетов асферических поверхностей второго порядка. Установив из конструктивных требований толщину каждой линзы, по полученным параметрам P и W определяем радиусы кривизны каждой из линз. Обе линзы имеют форму менисков, обращенных выпуклой стороной к предметной плоскости. Асферические поверхности линз вогнутые и имеют форму гиперболоида. Последующая оптимизация исходного варианта объектива несущественно изменила его конструктивные параметры, что подтверждает обоснованность выбора исходного варианта на основе использования теории аббераций третьего порядка.

Сферическая абберация объектива для основной длины волны в пределах всего входного зрачка не превышает $0,03\lambda$, для крайних длин волн составляет $0,1\lambda$. Условие изопланатизма в пределах всего зрачка составляет $0,03\%$, что свидетельствует о качественном исправлении комы вблизи оси.

Меридиональная и сагиттальная кривизна изображения в пределах углового поля (до 10°) не превышает $0,03$ мм. Дисторсия объектива положительная и составляет 5% на краю поля.

Модуляционная передаточная функция объектива в пределах большей части углового поля (до 10°) соответствует дифракционному уровню и только на краю поля снижается на $0,15..0,20$ мм по сравнению с дифракционным уровнем. Таким образом, разработанная методика позволяет проектировать светосильные двухлинзовые объективы для ИК области спектра с высоким качеством изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заказов П.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. СПб: Лань, 2008. 448 с.
2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 444 с.

Статья поступила в редакцию 16.10.2012