

Н.К. Артюхина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ СВЕТОСИЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ С КОРРЕКТОРОМ МАНЖЕНА

УДК 535.317; 681.7 (047.1)(476)

Представлен материал исследования проектных модулей зеркально-линзовых систем, построенных с корректором Манжена, позволяющего создать универсальную абберационную модель светосильного зеркально-линзового анастигмата. Объективы могут быть использованы в ИК-системах, предназначенных для определения пространственного положения и формы, измерения параметров движения различных объектов.

The material of research of design modules of the mirror-lens systems constructed with the Manzhen's compensator, allowing to create universal aberrational model of a high aperture mirror-lens anastigmat is presented. objectives can be used in the IR systems intended for definition of spatial situation, a form, the parameters of various objects movement.

Введение

В настоящее время широкое распространение приобрела оптико-электронная продукция для инфракрасного (ИК) спектрального диапазона, применяемая в промышленности, научных исследованиях и военной технике [1,2], к которой относят тепловизионные системы для визуализации изображений; радиометрические ИКС для измерений температуры объектов, их яркости и других параметров; а также системы технического зрения для определения пространственного положения, формы, параметров движения различных объектов (обычно в сложных эксплуатационных условиях – высокая температура, большая влажность).

В связи с этим серьезное внимание уделяется созданию высокоразрешающей оптики и одновременно предъявляются жесткие требования по ограничению массогабаритных характеристик приборов, технологии и стоимости их изготовления [3]. Среди объективов оптических систем с минимальными продольными габаритами широкое распространение получила группа зеркальных и зеркально-линзовых (катадиоптрических) систем, схемы которых отличаются методами исправления сферической абберации, вносимой сферическим зеркалом, построением линзового компенсатора полевых аббераций (ПК). Они достаточно компактны (коэффициент телесокращения порядка 0,25–0,3), обладают высокой светосилой, хорошим коэффициентом светопропускания ($\tau \approx 0,9$). Кроме того, требования к стеклу, из которого может быть изготовлена подложка для зеркал, значительно ниже, чем требования к стеклу, предъявляемые для изготовления линзовых систем.

В оригинальных системах, использующих корректор Манжена, при сравнительно несложной конструкции можно получить достаточно совершенную коррекцию сферической абберации и меридиональной комы при отсутствии хроматизма

(зеркало Манжена – линзовый мениск со сферическими поверхностями, на выпуклой поверхности которого нанесено зеркальное покрытие). Кроме зеркала Манжена зеркально-линзовая композиция имеет дополнительные компенсаторы.

Известные из литературы рассчитанные варианты схем, среди которых план-объектив Л. Канцека с угловым полем $2\omega = 10^\circ$, имеющий простую конструкцию, но сложные оптические стекла (SF55, LaF23, FK23) [4]; светосильные системы: объектив [5] с относительным отверстием $D/f' = 1:1,2$, имеющим большое виньетирование для углового поля зрения $2\omega = 6,6^\circ$, зеркально-линзовая система [6] с увеличенным угловым полем $2\omega = 10^\circ$ при высоком относительном отверстии 1:1, не дают полного представления о возможностях катадиоптрических объективов, использующих корректор Манжена, в области которых представляется возможным находить новые решения [7,8].

Цель статьи – представить структуру моделирования катадиоптрических композиций с корректорами Манжена, позволяющую создать базовые зеркально-линзовые объективы для разработки технологически адаптированных моделей.

В настоящее время актуальной задачей оптического приборостроения является создание оптико-электронной аппаратуры, позволяющей повысить точность определения координат летающего объекта, поэтому в качестве объекта моделирования был выбран зеркально-линзовый объектив пеленгатора инфракрасного лазерного ответчика летательного объекта. Пеленгатор предназначен для определения угловых координат летательного объекта по лазерному ответчику, установленному на его борту, относительно линии прицеливания и автоматического сопровождения объекта. Основными параметрами, определяющими принцип построения оптической системы прибора, являются дальность действия, угловое поле зрения и

диапазон длин волн, в пределах которого он функционирует.

Зеркально-линзовый объектив (рис. 1,а) имеет в параллельном ходе перед корректором Манжена (2) положительную выпукло-плоскую линзу (1), на плоской поверхности которой в центре наносится вторичное зеркало (ВЗ), а в сходящемся пучке лучей перед фокальной плоскостью – ПК (3). Схема может использоваться как для канала сопровождения, так и приемного канала лазерного дальномера. Компактная конструкция (рисунок 1,б) обеспечивает минимальные продольные и поперечные габариты; зона центрального экранирования (нерабочая часть двух каналов) позволяет размещать дополнительную оптику, к примеру, объектив канала захвата.

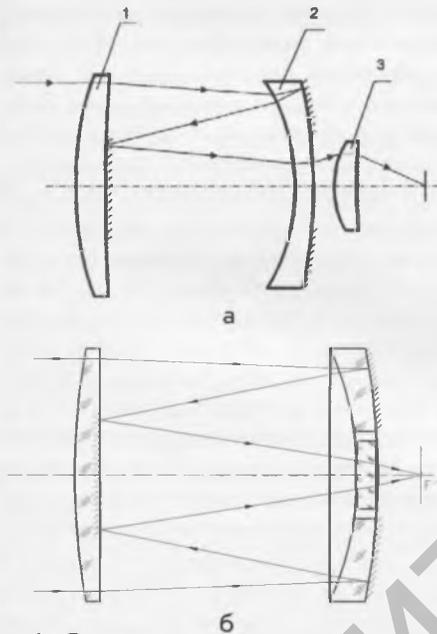


Рис. 1. Система, использующая корректор Манжена: зеркально-линзовый объектив с вынесенным ПК (а); компактная схема (б)

Моделирование и параметрический синтез

Основной этап – создание базовой модели: учитываются ее оптические характеристики, назначение, коррекционные возможности и конструктивные условия построения (габаритные ограничения, необходимость расположения действительной плоскости выходного зрачка перед поверхностью изображения; получение промежуточного изображения и др.); при этом целесообразно использовать такие новые стадии моделирования, как классификация систем, формализация процесса структурного синтеза и параметрический синтез [9].

Универсальная модель абберационного параметрического алгоритма для расчета базовой системы в тонких компонентах содержит элементы теории аббераций 3-го порядка, отдельным этапом которого возможна оптимизация, при которой вводятся определенные функциональные зависимости между значениями аббераций и изменениями конструктивных параметров. Коррекционные возможности для заданных оптических

характеристик определяют при постановке задачи их исследования.

Учитывая, что объектив предназначен для измерительных целей, кроме коррекции сферической абберации ΔS_{III}^{r0} и комы K_{III} , необходима коррекция астигматизма z'_m и z'_s ; в анастигматах преобразованные абберационные коэффициенты B_0, K_0, C_0 [10], описывающие сферическую абберацию, кому, астигматизм 3-го порядка, близки к нулю.

Особенности базовой модели: эквивалентная фокальная плоскость совпадает с вершиной главного зеркала (ГЗ), апертурной диафрагмой (АД) является оправа контроотражателя – ВЗ, поверхность которого плоская (рис. 2, а).

Переход от базовой системы к реальной конструкции выполняется с учетом определения пределов допусков на конструктивные и технологические параметры, а также возможности защиты поверхности приемника изображения от постороннего света и различных бликов, когда оценивают производственную адаптацию модели к промышленному использованию.

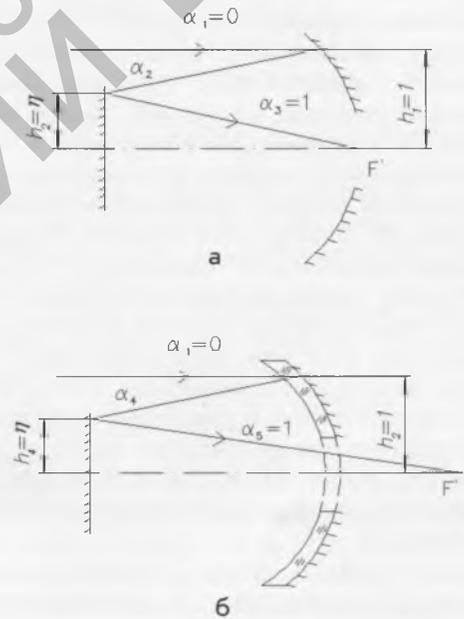


Рис. 2. Этапы моделирования: двухзеркальная базовая модель (а); система с корректором Манжена (б)

Алгоритм проектного расчета состоит из следующих этапов:

- введение условий нормировки (координат 1-го и 2-го нулевых лучей): $\alpha_1=0; h_1=1; \beta_1=1; \alpha_3=1$; при относительно эквивалентном фокусном расстоянии $f'_\Sigma = 1$;
- расчет оптических сил $\Phi_{ГЗ} = -\Phi_\Sigma; \Phi_{ВЗ} = 0$ и фокусных расстояний $f'_{ГЗ} = f'_\Sigma$;
- расчет параметрических характеристик (радиусов кривизны и высоты луча на втором зеркале h_2 , определяющем центральное экранирование) с использованием уравнения нулевого луча $\frac{n'_k \alpha'_k - n_k \alpha_k}{h_k} = \frac{n'_k \beta'_k - n_k \beta_k}{H_k} = \frac{(n'_k - n_k)}{r_k}$;

– расчет монохроматических aberrаций 3-го порядка, подлежащих компенсации, для выбора структуры корректоров зеркально-линзового объектива. Поскольку ВЗ плоское, то суммы Зейделя [10]:

$$S_I^{\infty} = h_1 \cdot P_1; S_{II}^{\infty} = h_1 \cdot P_1 \left(\frac{\delta \beta_1}{\delta \alpha_1} \right); S_{III}^{\infty} = h_1 \cdot P_1 \left(\frac{\Delta \beta}{\Delta \alpha} \right)^2$$

Хроматические aberrации в зеркальной системе равны нулю.

Для моделирования системы с корректором Манжена (рисунок 2,б) предлагается методика, опирающаяся на формулы, в которые входят f_0' – фокусное расстояние системы, n – показатель преломления стекла мениска, d_1 – толщина мениска, A – относительное отверстие системы:

– фокусное расстояние мениска:

$$f_m' = f_0' \left(-\frac{1}{2} + \frac{2}{n-1} \sqrt{\frac{-n(n+1)}{d_1} f_0' - \frac{1}{3} \frac{A f_0'}{d_1}} \right)$$

– радиусы кривизны: $r_1 = \frac{1}{2} \frac{n^2-1}{n^2} d_1 \mp \frac{n-1}{n} \sqrt{-f_m' d_1}$,

$r_2 = r_1 - \frac{n^2-1}{n^2} d_1$ (знаки + и – соответствуют двум возможным типам).

Вместо афокального ахроматического двухлинзового компенсатора, устанавливаемого в зеркально-линзовых объективах такого типа, для коррекции сферической aberrации и комы, в рассматриваемой модели использована одиночная линза, на плоской поверхности которой расположено ВЗ. Линзу, как и зеркало Манжена, необходимо выполнить из кварцевого стекла в связи с жесткими температурными условиями эксплуатации ИКС. Система компенсатора отлична от афокальной, но в ней удается исправить сферическую aberrацию, хроматизм положения (неполная компенсация) и увеличения, добавив к ней двухлинзовую предфокальную систему, которая исправляет астигматизм и дисторсию (рис. 3).

Оптимизация параметров зеркально-линзового объектива

Первая линза в схеме универсальной aberrационной модели (рис. 3) положительна, что хорошо сочетается с корректором Манжена: устраняется сферическая aberrация и частично хроматизм положения; полная компенсация осуществляется с помощью расфокусированного афокального ПК, изменяющего ход лучей в объективе. Окончательные параметры всех фокальных компенсаторов получают с помощью

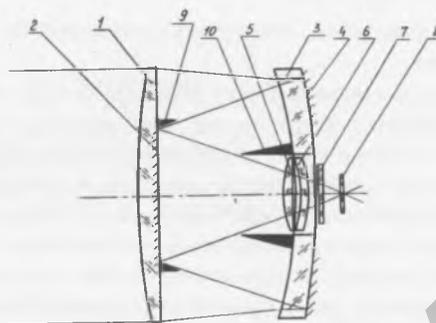


Рис. 3. Универсальная aberrационная модель зеркально-линзового светосильного объектива

программ автоматизированной коррекции aberrаций, когда проводят оптимизацию системы, при этом выполняется анализ качества изображения оптики (расчет волновых aberrаций, частотно-контрастных характеристик МТФ, точечных диаграмм, функций рассеяния и т.д.). Предварительно были рассчитаны значения сумм Зейделя и геометрические aberrации 3-го порядка всех базовых моделей для грамотного составления оптимизаторов в программных средах Opal и Zemax.

Оригинальной особенностью является то, что компьютерная оптимизация формы линз компенсатора может быть выполнена при использовании базовой модели из плоскопараллельной пластины [7]. В предложенной методике нужно учитывать расстояние между первой линзой и корректором Манжена, величина которого должна быть порядка $(0,2-0,6) f_0'$. Расположение линзы компенсатора сзади линзы Манжена упрощает конструкцию объектива, а выполнение всех линз из одного материала технологически и экономически оправданно.

Отметим, что при необходимости выноса блока фотоприемника за пределы системы используют двухкомпонентную оборачивающую систему, в которой размещают сменную апертурную диафрагму для канала захвата.

Параллельный ход лучей обеспечивает наилучшие результаты и облегчает сам алгоритм расчета [11]; минимальную длину оптической системы определяют схемы телеобъективов для 1-го и 2-го компонентов.

Регистрируемое излучение лазерного ИК-ответчика можно отнести к точечному изображению на бесконечно удаленной дистанции, когда наиболее приемлемым методом оценки качества изображения является расчет концентрации энергии в пределах кружков диаметрами 1, 2 и 3 пиксела,

Таблица 1

Расчетные значения концентрации энергии в кружке диаметра δ , %

Величина изображения y' , мм	Канал сопровождения		
	δ , мм		
	0,010	0,020	0,030
0	76,8	89,7	93,7
1,2	74,5	89,7	94,8
2,4	48,3	85,2	93,0

в пределах которых должно быть сосредоточено более 90% принятой пеленгатором энергии.

В таблице 1 приведены расчетные данные концентрации энергии, полученные при минимально возможном количестве применяемых марок стекол, технологичной форме линз, устойчивой в изготовлении и сборке [8].

В результате абберационного расчета удалось достигнуть хорошего исправления аббераций по всему полю зрения. К примеру, в центре изображения поперечная сферическая абберация не превышает 0,007мм при размере ячейки приемника изображения (КМОП(CMOS) – матрица с размером пиксела 0,0099×0,0099 мм). Во внеосевой точке изображения, благодаря использованию линзы Пиаци-Смита, удалось исправить астигматические составляющие, которые на половине поля не превышают значений $z'_m=30$ мкм и $z'_s=30$ мкм. За счет такого исправления аббераций и была получена высокая концентрация энергии.

Была проведена технологическая адаптация зеркально-линзовых модулей с корректорами Манжена, включающая трудоемкость и стоимость изготовления, которая во многом зависит от допусков на изготовление и сборку оптических деталей и компонентов. Оценочным критерием была принята допустимая кома в точке на оси, возникающая вследствие децентрировки оптических поверхностей и определяемая по критерию Марешала $K = \frac{1,8\lambda}{\sin^3\sigma'}$, где λ – основная длина волны, мкм; $\sin\sigma'$ – задняя апертура.

Заключение

1. Базовой моделью для создания светосильного зеркально-линзового объектива целесообразно считать зеркально-линзовую композицию с корректором Манжена, имеющую в параллельном ходе перед зеркалом положительную выпукло-плоскую линзу, на плоской поверхности которой в центре нанесено вторичное зеркало, а в сходящемся пучке лучей перед фокальной плоскостью установлен компенсатор полевых аббераций.
2. Переход от базовой системы к реальной конструкции выполняется с учетом определения пределов допусков на конструктивные и технологические параметры, а также возможности защиты поверхности приемника изображения от постороннего света и различных бликов; когда оценивают производственную адаптацию модели к промышленному использованию, причем проводят оптимизацию системы по программам автоматизированной коррекции аббераций и анализ качества изображения оптики (расчет МТФ, точечных диаграмм, функций рассеяния).
3. Использование двухлинзовой предфокальной системы в качестве компенсатора позволяет устранить астигматизм и дисторсию зеркально-линзового светосильного объектива.
4. Базовые модули с корректорами Манжена рассчитаны в диапазоне фокусных расстояний

$f' = 160-300$ мм, при относительном отверстии $D/f' = 1:2$, поле зрения $2\omega=4^\circ$; обладают минимальным неизопланатизмом и сферической абберацией, а также допустимыми значениями волновой абберации и астигматической разности в спектральном диапазоне $\lambda = 380...1530$ нм. Объективы ахроматизованы при заданной спектральной эффективности.

5. Разработанные зеркально-линзовые объективы обеспечивают задачу повышения концентрации энергии в пределах требуемых кружков рассеяния при минимально возможном количестве применяемых марок стекол, технологичной форме линз, устойчивой в изготовлении и сборке. Увеличение концентрации энергии в изображении повышает точность определения координат летательного объекта и точность его наведения.

Список использованной литературы

1. Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы 3-го поколения. – М.: Логос, 2011. – 242 с.
2. Тарасов В.В. Тенденции развития инфракрасных систем / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков // Специальная техника. – 2004. – №1 – С. 24–37.
3. Лившиц И.Л. Выбор исходной системы для расчета объективов / И.Л. Лившиц, А.В. Сальников, Unchung Cho // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 11. – С. 74–78.
4. Патент 29 29 678, G02B17/08. Erwin Wiedemann, 1981.
5. Патент 2093869 РФ, МПК G02B17/08. Светосильный зеркально-линзовый объектив/ Казаков В.И. – №96101367/28; Заявлено 23.01.96; Опубл. 20.10.97, www.fips.ru.
6. Патент 2091835 РФ, МПК G02B17/08. Зеркально-линзовый объектив для ближней ИК области спектра излучения/ Казаков В.И., Бездидько С.Н., Бодров С.В. – №96101379/28; Заявлено 23.01.96; Опубл. 27.09.97, www.fips.ru.
7. Артюхина Н.К. Оптимизация параметров компенсатора зеркально-линзового объектива/ Н.К. Артюхина, С.Н. Ботян // Новые направления развития приборостроения: матер. 3-й МСНТК, Минск. 21–23 апр. 2010г. / БНТУ – Мн., 2010. – С. 189.
8. Артюхина Н.К. Зеркально-линзовые светосильные объективы с корректором Манжена / Н.К. Артюхина, Е.А. Приходько // «Приборостроение 2010»: матер. 3-й МНТК, Минск, 11–13 нояб. 2010г. / БНТУ – Мн., 2010. – С.26-27.
9. Артюхина Н.К. Оптехника двухзеркальных анастигматов / Н.К. Артюхина // Вести НАН. Серия физ.-техн. наук. – 2012. – № 1. – С. 105–111.
10. Артюхина Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография // Н.К. Артюхина / БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.
11. Артюхина Н.К. Техническая оптика: учеб-метод. пособие: с грифом УМО РБ / Н.К. Артюхина; Мин-во образования РБ, БНТУ – Мн., 2009. – 43 с.

Нина Константиновна Артюхина, доктор технических наук, доцент приборостроительного факультета, профессор кафедры «Лазерная техника и технология» БНТУ *Дата поступления 17.09.2013 г.*