

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 535.317; 681.7

Н. К. АРТЮХИНА

МЕТОД РАСЧЕТА ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ  
С КОМПЕНСАТОРОМ МАНЖЕНА*(Представлено академиком Н. С. Казаком)*

Белорусский национальный технический университет, Минск

Поступило 12.02.2014

**Введение.** В настоящее время значительное внимание уделяется созданию оптико-электронных приборов, работающих в ИК и УФ спектральном диапазоне. Для таких приборов наряду с разработкой высокоразрешающих оптических элементов одновременно предъявляются жесткие требования по ограничению их массо-габаритных характеристик, а также технологии и стоимости изготовления [1; 2]. Среди объективов оптических систем с минимальными продольными габаритами широкое распространение получили зеркальные и зеркально-линзовые системы. Композиции последних отличаются методами исправления сферической аберрации, вносимой сферическим зеркалом и способами построения линзовых компенсаторов полевых аберраций. Зеркально-линзовые системы достаточно компактны (коэффициент телесокращения порядка 0,25–0,3), обладают высокой светосилой, хорошим коэффициентом светопропускания ( $\tau \approx 0,9$ ).

Основными недостатками зеркальных и зеркально-линзовых систем, ограничивающими их применение, являются центральное экранирование, вызывающее перераспределение освещенности в дифракционном изображении точки, а также сложность изготовления, контроля и юстировки при использовании асферических поверхностей зеркал. Оригинальные светосильные системы, использующие корректор-зеркало Манжена, отличаются компактностью и исправленными монохроматическими аберрациями при отсутствии хроматизма без применения асферики. Зеркало Манжена представляет собой линзовый мениск со сферическими поверхностями, на выпуклой поверхности которого нанесено зеркальное покрытие. В зеркальную (катоптрическую) композицию могут быть включены дополнительные линзовые компенсаторы.

В литературе дается описание нескольких вариантов схем, среди которых наиболее известен план-объектив Л. Канцека с угловым полем  $2\omega = 10^\circ$ , имеющий простую конструкцию, но сложные оптические стекла (SF55, LaF23, FK23) [3]. Известны также светосильные системы: объектив [4] с относительным отверстием  $D/f' = 1:1,2$ , имеющий большое виньетирование для углового поля зрения  $2\omega = 6^\circ$ , а также зеркально-линзовая система [5] с увеличенным угловым полем  $2\omega = 10^\circ$  при высоком относительном отверстии 1 : 1. Описанные в литературе схемы не дают полного представления о возможностях зеркально-линзовых (катадиоптрических) объективов с корректором Манжена, использование которых позволит создавать новые композиции [6; 7].

Цель работы – развитие расчетно-методической базы для новых катадиоптрических композиций с корректором Манжена при наличии полевого компенсатора.

Современные методики расчета зеркально-линзовых систем пригодны для описания как алгебраических, так и композиционных решений, основанных на синтезе базовых и коррекционных компонентов. Они пригодны для осуществления аберрационного анализа и служат источником новых катадиоптрических композиций. Задача синтеза (композиции) наиболее сложна при разработке новых схем оптики, так как в общем виде аналитическая связь между входными координатами лучей и поперечными аберрациями может быть записана лишь с использованием аберраций третьего порядка [8].

**Описание композиции и параметрический алгоритм.** Зеркально-линзовый объектив (рис. 1) состоит из расположенной перед корректором Манжена (2) положительной выпукло-плоской линзы (1), на плоской поверхности которой в центре наносится вторичное зеркало (ВЗ). При этом перед фокальной плоскостью объектива размещается полевой компенсатор (ПК) (3). Данная схема перспективна для применения как для канала сопровождения, так и приемного канала лазерного дальномера [7]. Компактная конструкция обеспечивает минимальные продольные и поперечные габариты; зона центрального экранирования (нерабочая часть двух каналов) позволяет размещать дополнительные оптические элементы.

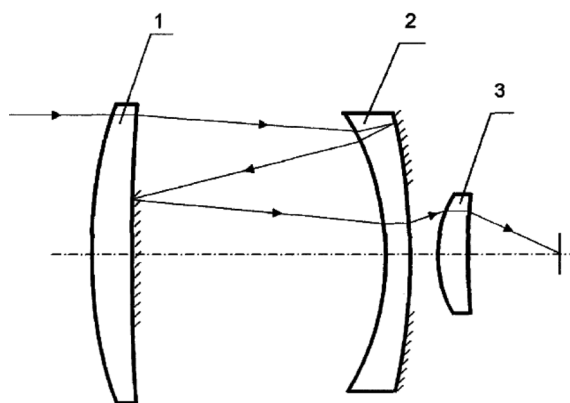


Рис. 1. Зеркально-линзовый объектив с вынесенным ПК, использующий корректор Манжена

Основным этапом параметрического расчета является создание базовой схемы, для которой учитываются ее оптические характеристики, назначение, коррекционные возможности, конструктивные условия построения (габаритные ограничения, необходимость расположения действительной плоскости выходного зрачка перед поверхностью изображения; получение промежуточного изображения и др.). При этом в новом методе расчета предлагается использовать такие стадии проектирования, 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 данного алгоритма является оптимизация, при которой вводятся определенные функциональные зависимости между значениями аббераций и изменениями конструктивных параметров. Коррекционные возможности для заданных оптических характеристик необходимо определять при постановке задачи их исследования.

Поскольку рассматриваемые зеркально-линзовые композиции предназначены для целей измерения, то кроме коррекции сферической абберации  $\Delta S_{III}^{\infty}$  и комы  $K_{III}$ , необходима также коррекция астигматизма  $z'_m$  и  $z'_s$ . В анастигматах преобразованные абберационные коэффициенты  $B_0, K_0, C_0$  [8], описывающие сферическую абберацию, кому и астигматизм 3-го порядка, близки к нулю.

Особенности базовой композиции:

эквивалентная фокальная плоскость совпадает с вершиной главного зеркала;

апертурной диафрагмой является оправа контротражателя – вторичного плоского зеркала (рис. 2, а).

Переход от базовой системы к реальной конструкции выполняется с учетом определения пределов допусков на конструктивные и технологические параметры, а также возможности за-

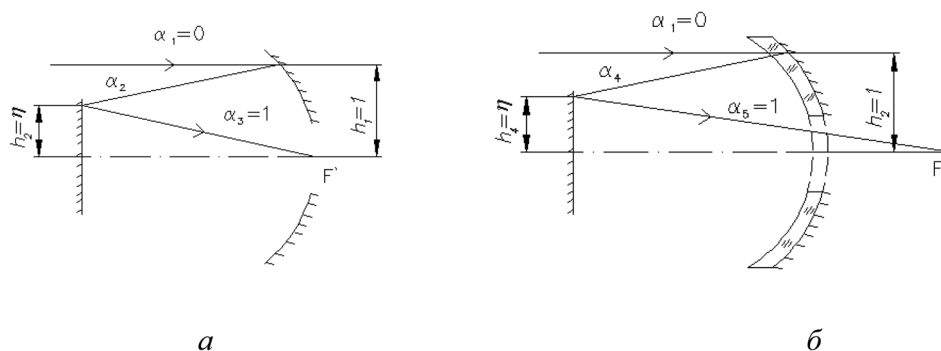


Рис. 2. Этапы моделирования: двухзеркальная базовая модель (а); система с корректором Манжена (б)

щиты поверхности приемника изображения от постороннего света и различных бликов, когда оценивают производственную адаптацию модели к промышленному использованию.

Предлагаемый алгоритм проектного расчета состоит из следующих этапов:

введение условий нормировки (координат 1-го и 2-го нулевых лучей) [8]:  $\alpha_1 = 0$ ;  $h_1 = 1$ ;  $\beta_1 = 1$ ;  $\alpha_3 = 1$ ; при относительном эквивалентном фокусном расстоянии  $f'_{\Sigma} = 1$ ;

расчет оптических сил  $\varphi_{ГЗ} = -\varphi_{\Sigma}$ ;  $\varphi_{ВЗ} = 0$  и фокусных расстояний  $f'_{ГЗ} = f'_{\Sigma}$ ;

расчет параметрических характеристик (радиусов кривизны и высоты луча на втором зеркале  $h_2$ , определяющего 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 [9]:  $S_I^{\infty} = h_1 P_1$ ;  $S_{II}^{\infty} = h_1 P_1 \left( \frac{\delta \beta_1}{\delta \alpha_1} \right)$ ;  $S_{III}^{\infty} = h_1 P_1 \left( \frac{\Delta \beta}{\Delta \alpha} \right)^2$ .

При этом хроматические aberrации в зеркальной системе равны нулю.

Далее для параметрического расчета системы с корректором Манжера (рис. 2, б) предлагается методика, основанная на следующих формулах, в которые входят  $f'_0$  – фокусное расстояние системы,  $n$  – показатель преломления стекла мениска,  $d_1$  – толщина мениска,  $A$  – относительное отверстие системы:

$$\text{фокусное расстояние мениска: } f'_m = f'_0 \left( -\frac{1}{2} + \frac{2}{n-1} \sqrt{\frac{-n(n+1)}{d_1} f'_0 - \frac{1}{3} \frac{A f'_0}{d_1}} \right),$$

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, обычно устанавливаемого в зеркально-линзовых объективах такого рода, для коррекции сферической aberrации и coma в рассматриваемой композиции использована одиночная линза, на плоской поверхности которой расположено вторичное зеркало. Линзу, как и зеркало Манжера, необходимо изготавливать из кварцевого стекла, что связано с жесткими температурными условиями эксплуатации инфракрасной системы. Хотя используемая система компенсатора отлична от афокальной, однако удается исправить сферическую aberrацию, хроматизм положения (неполная компенсация) и хроматизм увеличения путем добавления к ней двухлинзовой предфокальной системы, которая также корригирует астигматизм и дисторсию.

**Оптимизация параметров зеркально-линзовой композиции.** Первая линза в схеме универсальной aberrационной модели (рис. 3) положительна, что хорошо сочетается с корректором Манжера. В такой конструкции устранены сферическая aberrация и частично хроматизм положения; полная компенсация осуществляется с помощью расфокусированного афокального ПК,

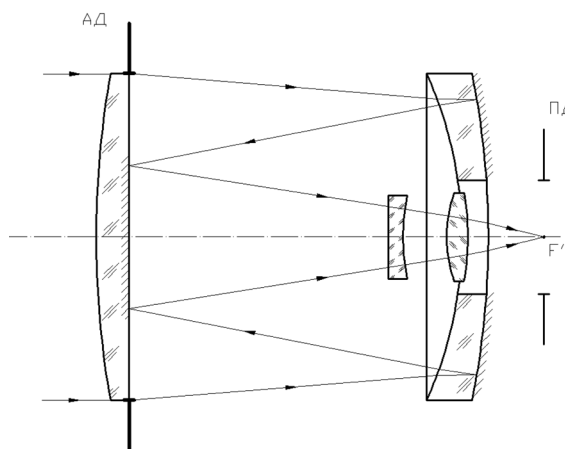


Рис. 3. Универсальная aberrационная модель зеркально-линзового светосильного объектива

изменяющего ход лучей в объективе. Кривизна изображения корригируется введением в композицию линзы Пиацци–Смита. Окончательные параметры всех фокальных компенсаторов получают с помощью программ автоматизированной коррекции aberrаций при проведении оптимизации оптической системы. При этом выполняется анализ качества изображения (расчет волновых aberrаций, частотно-контрастных характеристик МТФ, точечных диаграмм, функций рассеяния и т. д.). Для грамотного составления оптимизаторов в программных средах Orap и Zemax предварительно были рассчитаны значения сумм Зейделя и геометрические aberrации 3-го порядка всех базовых композиций.

Оригинальной особенностью параметрического расчета является то, что компьютерная оптимизация формы линз компенсатора выполняется с использованием базового модуля из плоскопараллельной пластины [6]. В предложенной методике учитывается расстояние между первой линзой и корректором Манжена, величина которого должна быть порядка  $(0,2-0,6) f'_0$ . Расположение линзы компенсатора позади линзы Манжена приводит к упрощению конструкции объектива, а изготовление всех линз из одного материала технологически и экономически оправдано.

Отметим, что при необходимости размещения дополнительной оптики (к примеру, блока фотоприемника) за пределами композиции целесообразно использовать двухкомпонентную оборачивающую систему, в которой размещают сменную апертурную диафрагму. При этом создание параллельного хода лучей обеспечивает наилучшие результаты и упрощает алгоритм расчета [10].

Регистрируемое лазерное излучение ИК-системы можно отнести к точечному изображению на бесконечно удаленном расстоянии, когда наиболее приемлемым методом оценки качества изображения является расчет концентрации энергии в пятнах размерами 1, 2 и 3 пиксела, в пределах которых должно быть сосредоточено более 90 % принятой энергии. Высокая концентрация энергии была получена за счет отличного исправления аберраций: в центре изображения поперечная сферическая аберрация не превышает 0,007 мм при размере ячейки приемника изображения (КМОП(СМОС) – матрица 1/2" с размером пиксела  $0,0099 \times 0,0099$  мм). При этом во внеосевой точке изображения астигматические составляющие для половины поля не превышают значений  $z'_m = 30$  мкм и  $z'_s = 30$  мкм. Была осуществлена технологическая адаптация зеркально-линзовых модулей с корректорами Манжена, включающая трудоемкость и стоимость изготовления, которая во многом зависит от допусков на изготовление и сборку отдельных оптических деталей и компонентов. В качестве оценочного критерия была принята допустимая кома в точке на оси системы, возникающая вследствие децентрировки оптических поверхностей и определяемая согласно критерия Марешала  $K = \frac{1,8\lambda}{\sin \sigma'}$ , где  $\lambda$  – основная рабочая длина волны в микрометрах;  $\sin \sigma'$  – задняя апертура моделируемой композиции.

**Вывод.** Предложен метод расчета зеркально-линзового объектива с корректором Манжена. Для устранения сферической аберрации и комы композиция содержит положительную выпукло-плоскую линзу, на плоской поверхности которой в центре нанесено вторичное зеркало. Показано, что использование двухлинзовой предфокальной системы в качестве компенсатора позволяет устранить астигматизм и дисторсию зеркально-линзового объектива, тем самым увеличивая поле зрения при сохранении высокой светосилы. Для устранения кривизны изображения предложено использовать линзу Пиацци–Смита. Установлено, что базовые композиции с зеркалом Манжена, рассчитанные в диапазоне фокусных расстояний  $f' = 160-300$  мм при относительном отверстии  $D/f' = 1 : 2$  и поле зрения  $2\omega = 4^\circ$ , обладают минимальными значениями неизопланатизма и сферической аберрации, а также допустимыми значениями волновой аберрации и астигматической разности в спектральном диапазоне  $\lambda = 380-1530$  нм. Объективы ахроматизированы при заданной спектральной эффективности. На основе разработанной методики расчета предложен способ повышения концентрации энергии в пределах требуемых значений размеров пятен рассеяния при минимально возможном количестве применяемых марок стекол и технологичной форме линз. Возможность получения изображения с увеличенной концентрацией энергии позволяет повысить точность определения координат летательного объекта и точность его наведения.

## Литература

1. Тарасов В. В., Торшина И. П., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы 3-го поколения. М., 2011. – 242 с.
2. Лившиц И. Л. и др. // Опт. журн. 2007. Т. 74, № 11. С. 74–78.
3. Патент 29 29 678, G02B17/08. Erwin Wiedemann, 1981.
4. Светосильный зеркально-линзовый объектив: Патент 2093869 РФ / В. И. Казаков. МПК G02B17/08. № 96101367/28; Заявл. 23.01.96; Опубл. 20.10.97 // www.fips.ru.
5. Зеркально-линзовый объектив для ближней ИК области спектра излучения: Патент 2091835 РФ / В. И. Казаков, С. Н. Бездидько, С. В. Бодров. МПК G02B17/08. № 96101379/28; Заявл. 23.01.96; Опубл. 27.09.97 // www.fips.ru.

6. *Артюхина Н. К., Ботян С. Н.* // Новые направления развития приборостроения: материалы 3-й МСНТК, Минск, 21–23 апр. 2010 г. Минск, 2010. С. 189.
7. *Артюхина Н. К., Приходько Е. А.* // Приборостроение 2010: материалы 3-й МНТК, Минск, 11–13 нояб. 2010 г. Минск, 2010. С. 26–27.
8. *Артюхина Н. К.* Теория, методы проектирования и расчет оптики зеркальных систем. Минск, 2009.
9. *Артюхина Н. К.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2012. № 1. С. 105–111.
10. *Артюхина Н. К.* Техническая оптика. Минск, 2009. – 43 с.

*N. K. ARTIOUKHINA*

art49@mail.ru

## **METHOD OF CALCULATION OF MIRROR-LENS OBJECTIVES WITH MANZHEN'S MIRROR**

### **Summary**

The method of calculation of a mirror-lens objective with Manzhen's mirror is presented. Parameters of a catoptric composition with lens compensators are established. It is noted that the design possibilities are expanded by new computer methods. The design parameters of the mirror-lens high-aperture anastigmat are calculated.