

Афокальный рефракционно-дифракционный корректор для расширения рабочих спектрального и температурного диапазонов тепловизионной оптики

Г. И. Грейсух¹, И. А. Левин², С. В. Казин¹

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

² ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева», Красногорск, Россия

В настоящем докладе представлена методика получения исходных параметров афокального корректора, который наряду с устранением терморасфокусировки позволяет расширить рабочий спектральный диапазон. Эффективность методики продемонстрирована на примере расчёта рефракционно-дифракционного афокального термокомпенсатора. Приведены оптические характеристики системы «афокальный корректор – объектив», рассчитанной на работу в среднем и длинноволновом диапазонах инфракрасного спектра в широком интервале рабочих температур.

Ключевые слова: Афокальный корректор, Атермализация, Продольный хроматизм, Тепловизионная система, Микроболометр.

Цитирование: Грейсух, Г. И. Афокальный рефракционно-дифракционный корректор для расширения рабочих спектрального и температурного диапазонов тепловизионной оптики / Г. И. Грейсух, И. А. Левин, С. В. Казин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 35–40.

Введение

Одной из основных целей модернизации оптико-электронных приборов является, как правило, расширение их функциональных возможностей. Известны методы воздействия на характеристики оптической системы с помощью афокального корректора [1, 2], которые дают возможность сохранить как оптическую часть, так и в большей степени механическую конструкцию модернизируемого объектива.

Применительно к тепловизионным системам афокальные корректоры могут быть использованы для достижения пассивной атермализации оптическим методом как альтернатива разработке механической конструкции термокомпенсатора. Однако большей функциональности модернизируемого объектива можно добиться, если совместить устранение терморасфокусировки с расширением рабочего спектрального диапазона, например, обеспечив функционирование оптической системы с неохлаждаемым микроболометром, чувствительным одновременно в среднем и длинноволновом инфракрасном (ИК) диапазоне.

В настоящем докладе представлена методика расчёта рефракционно-дифракционного афокального корректора терморасфокусировки, позволяющего расширить рабочий спектральный диапазон ИК-объектива при сохранении исходной оптической схемы и механической конструкции модернизируемой системы.

Методика расчёта афокального корректора

Известно, что с целью уменьшения порогового значения температурной чувствительности все тепловизионные системы, работающие с микроболометрами, проектируются как сверхсветосильные, а следовательно, апланатичные. Исходя из того, что оптическая сила афокального корректора на расчётной длине волны заданного спектрального диапазона и при номинальном значении термодинамической температуры t_1 должна быть равной нулю, а угловое увеличение – единице, условие пассивной оптической атермализации в сочетании с возможностью хроматической коррекции и сохранения апланатичности можно представить в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^J \varphi_j^{(t_1)} = 0 \\ s'_{F'(corrector+lens)}^{(t_2)} = s'_{F'(lens)}^{(t_1)} (1 + \alpha_{mount}(t_2 - t_1)) \\ \sum_{j=1}^J h_1^2 \frac{\varphi_j^{(t_1)}}{v_j} = -S_{Ich}^{(t_1)} \\ \Phi_{(corrector+lens)}^{(t_1)} = \frac{\sin u_{j+1}}{h_1} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где h_1 – высота падения первого (апертурного) параксиального луча на первый оптический элемент афокального корректора; φ_j – оптическая сила j -го элемента афокального корректора; $s'_{F'(lens)}$, $s'_{F'(corrector+lens)}$ – задние фокальные отрезки объектива и системы «афокальный корректор – объектив»; α_{mount} – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала корпусных деталей объектива; v_j – коэффициент дисперсии j -го оптического элемента афокального корректора; S_{Ich} – первая хроматическая сумма объектива, вычисленная для заданного рабочего спектрального диапазона; $\Phi_{(corrector+lens)}$ и $\sin u_{j+1}$ – оптическая сила и числовая апертура системы «афокальный корректор – объектив» соответственно. Верхний индекс указывает на номинальную (t_1) или фактическую (t_2) термодинамическую температуру, при которой измерена или рассчитана характеристика. При этом все входящие в систему уравнений (1) оптические силы элементов и фокальные отрезки должны быть приведены на расчётной длине волны, а коэффициенты дисперсии вычислены для этой и крайних длин волн заданного рабочего спектрального диапазона. Для выполнения условия атермализации требуется, чтобы оптическая сила афокального корректора в диапазоне температур (t_2-t_1) изменилась на величину, равную

$$\Delta\varphi_{(corrector)} = \frac{s'_{F'(lens)}^{(t_2)} - s'_{F'(lens)}^{(t_1)} (1 + \alpha_{mount}(t_2 - t_1))}{b}, \quad (2)$$

$$b = \left[d - s'_{F'(lens)}^{(t_1)} \left(1 + s_{F'(lens)}^{(t_1)} \Phi_{(lens)}^{(t_1)} \right) \right] s'_{F'(lens)}^{(t_2)} + \frac{1 + s_{F'(lens)}^{(t_2)} s'_{F'(lens)}^{(t_2)} \Phi_{(lens)}^{(t_2) 2}}{\Phi_{(lens)}^{(t_2) 2}} - s'_{F'(lens)}^{(t_1)} [1 + \alpha_{mount}(t_2 - t_1)] \left[d - s'_{F'(lens)}^{(t_1)} \left(1 + s_{F'(lens)}^{(t_1)} \Phi_{(lens)}^{(t_1)} \right) + s_{F'(lens)}^{(t_2)} \right], \quad (3)$$

где $s_{F'(lens)}$ – передний фокальный отрезок объектива; $\Phi_{(lens)}$ – оптическая сила объектива; d – расстояние от афокального корректора до объектива, представленных в виде однокомпонентных систем их главными плоскостями в бесконечно тонком приближении.

С другой стороны, изменение оптической силы афокального корректора можно представить в виде

$$\Delta\varphi_{(corrector)} = \sum_{j=1}^J (\varphi_j^{(t_2)} - \varphi_j^{(t_1)}). \quad (4)$$

Получение исходных параметров афокального корректора для последующей оптимизации в составе с объективом включают следующие этапы:

1) Определение значений передних и задних фокальных отрезков, а также оптических сил объектива при температурах t_2 и t_1 исходя из известных конструктивных параметров оптической схемы.

2) Определение значения первой хроматической суммы объектива в заданном рабочем спектральном диапазоне исходя из известных конструктивных параметров оптической схемы.

3) Определение величины требуемого изменения заднего фокального отрезка системы «афокальный корректор — объектив» исходя из известных параметров механической конструкции объектива.

4) Выбор значения величины d исходя из габаритных возможностей размещения афокального корректора.

5) Вычисление оптических сил линз афокального корректора путём решения системы уравнений (1) с учётом выбора оптических материалов.

6) Оптимизация полученных параметров афокального корректора на основе расчета хода лучей через полную систему, включающую корректор и модернизируемый объектив.

Результаты

В качестве модернизируемого объектива выберем представленную в [3] оптическую схему (см. рис. 1) с фокусным расстоянием $f'=74,85$ мм, угловым полем зрения $2\omega=10,4^\circ$ и диафрагменным числом 1,25, рассчитанную на работу с микроболометром, чувствительным в спектральном диапазоне $\Delta\lambda=7-14$ мкм. Формат матричного фотоприёмника составляет 640×480 , а размер пикселя 17 мкм. С целью сохранения величины линейного поля зрения выберем двухдиапазонный микроболометр Bird 640 Ceramic Packaging BB Wide-Band [4], чувствительный в спектральном диапазоне $\Delta\lambda=3-14$ мкм, с аналогичными форматом и размером пикселя. Интервал рабочих температур ограничим значениями от -40°C до 60°C , а спектральный диапазон от $\lambda_{\min}=3,4$ мкм до $\lambda_{\max}=11,4$ мкм с внутренними границами поддиапазонов $\lambda_1=5,2$ мкм и $\lambda_2=7,5$ мкм соответственно.

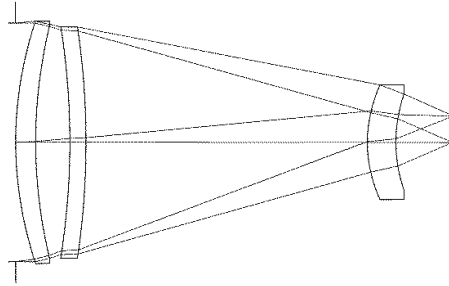


Рис. 1. Оптическая схема модернизируемого объектива

В результате решения системы уравнений (1) и с учётом подбора оптических материалов были получены следующие значения оптических сил линз афокального корректора: $\varphi_1=10,814$ дптр (материал — халькогенидное стекло марки HWS5), $\varphi_2=-10,976$ дптр (материал — монокристаллический германий), $\varphi_3=0,162$ дптр (дифракционный оптический элемент на подложке из монокристаллического германия).

Последующая оптимизация в программе оптического проектирования ZEMAX [5] конструктивных параметров афокального корректора при переходе к конечным толщинам элементов позволила получить оптическую схему, представленную на Рис. 2.

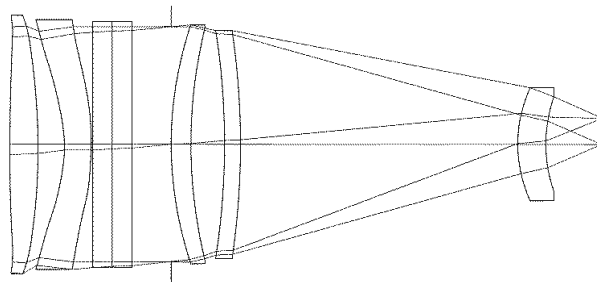


Рис. 2. Оптическая схема системы «афокальный корректор — объектив»

Для обеспечения дифракционной эффективности не ниже 85% во всем рабочем спектральном диапазоне и для всех углов поля зрения микроструктура дифракционного оптического элемента должна быть двухслойной (SrF_2/Ge) с двумя несовпадающими внутренними рельефами [6].

В таблице 1 приведено сравнение характеристик оптических схем исходного объектива и объектива с афокальным корректором.

Таблица 1. Оптические характеристики исходного объектива и объектива с афокальным корректором

Характеристика	Исходный объектив			Система «афокальный корректор – объектив»		
Угловое поле зрения	10,66°					
Фокусное расстояние	74,85 мм					
Диафрагменное число	1,25					
Рабочий спектральный диапазон	7–14 мкм			3,4–5,2 мкм 7,5–11,4 мкм		
Терморасфокусировка в интервале температур от –40°С до 60°С	0,838 мм			0,033 мм		
Разрешение по полю зрения при контрасте $T=0,2$	$t = -40^{\circ}\text{C}$	$t = 20^{\circ}\text{C}$	$t = 60^{\circ}\text{C}$	$t = -40^{\circ}\text{C}$	$t = 20^{\circ}\text{C}$	$t = 60^{\circ}\text{C}$
	2 мм ⁻¹	41 мм ⁻¹	3 мм ⁻¹	49 мм ⁻¹ 56 мм ⁻¹	45 мм ⁻¹ 57 мм ⁻¹	39 мм ⁻¹ 57 мм ⁻¹
Продольный хроматизм	47 мкм			87 мкм		
Модуль дисторсии по полю изображения	0,3%			0,2%		

Из данных таблицы 1 следует, что афокальный рефракционно-дифракционный корректор наряду с устранением терморасфокусировки позволил расширить рабочий спектральный диапазон. При этом увеличение значения остаточного хроматизма приходится на средневолновую ИК-область, что несколько снижает качество изображения, но не отражается на разрешающей способности тепловизионной системы, которая в данном случае остаётся ограничена размером пикселя выбранного двухдиапазонного приёмника излучения.

Заключение

Применение афокального корректора в виде отдельной сборочной единицы позволяет, с одной стороны, сохранить функциональность исходной оптической системы, а с другой – расширить возможности модернизируемого прибора. В случае ИК-объективов данный метод воздействия на оптические характеристики может быть использован для устранения терморасфокусировки, а также увеличения рабочего спектрального диапазона.

Предложенная методика расчёта афокального термокомпенсатора позволяет исходя из известных значений фокальных отрезков, оптической силы и первой хроматической суммы ИК-объектива определить оптические силы и материалы линз корректора, который в заданных спектральном и температурном диапазонах обеспечивает требование соблюдения условия апланатичности, устранение продольного хроматизма и необходимое изменение заднего фокального отрезка системы «афокальный корректор – объектив».

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

Список источников

- [1] Русинов М. М. Композиция оптических систем // Л.: Машиностроение, 1989; 383 с.
- [2] Слюсарев Г. Г. Методы расчёта оптических систем // Л.: Машиностроение, 1969; 672 с.
- [3] Медведев А. В., Гринкевич А. В., Князева С. Н. Атермализация объективов прицельно-наблюдательных комплексов как средство обеспечения жизнедеятельности объектов БТВТ // Фотоника; 2016; Том 56; № 2: с. 94-109.
- [4] SemiConductor Devices [Электронный ресурс]. URL: https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/Bird640-17-ceramic_brochure_v3_PRINT.pdf
- [5] Zemax [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zemax.com/pages/opticstudio/>
- [6] Greisukh G. I., Levin I. A., Ezhov E. G. Design of Ultra-High-Aperture Dual-Range Athermal Infrared Objectives // Photonics. – MDPI, 2022. – Т. 9. – №. 10. – С. 742.

Afocal refractive-diffractive corrector for expanding the working spectral and temperature ranges of thermal imaging optics

G. I. Greisukh¹, I. A. Levin², S. V. Kazin¹

¹ Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

² PJSC «Krasnogorsky Zavod», Krasnogorsk, Russia

We present a technique of calculation of the initial design parameters for designing afocal corrector. The afocal corrector eliminates thermal defocusing and expands the working spectral range. The efficiency of the proposed technique are demonstrated using example of the design of the refractive-diffractive afocal corrector, and the obtained optical performance is discussed.

Keywords: Afocal corrector, Athermalization, Longitudinal chromatism, Thermal imaging system, Microbolometer.