

А. С. Гречневский^{1,2}, Т. Н. Хацевич¹*

Схемное решение оптической системы инфракрасного зум-объектива

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

² ООО «Конструкторское бюро «Луггар», г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: grechenevskiy_alexey94@mail.ru

Аннотация. В условиях введенных санкций, политической ситуации и ограниченности во времени на производство военной техники необходимы коррективы в методике разработок новых образцов вооружения и оптико-электронных систем для их оснащения. Актуальной становится модернизация существующих и прошедших технологическую обработку в части изготовления оптических систем. В качестве предмета исследования рассматриваются оптические системы инфракрасных (ИК) объективов с вынесенным выходным зрачком. Цель статьи: продемонстрировать, каким образом можно развить методику выбора схемного решения, отработанную для тепловизионных объективов с фиксированным фокусным расстоянием, на тепловизионные объективы с переменным фокусным расстоянием. Исследование проводится с использованием методов геометрической оптики и компьютерных методов дизайна оптических систем. Подтверждена гипотеза, заключающаяся в том, что введение в оптическую схему афокальной системы, состоящей из двух вплотную стоящих компонентов с равными по абсолютной величине фокусными расстояниями, позволяет путем перемещения компонентов афокальной системы вдоль оптической оси обеспечить непрерывную смену фокусного расстояния в объективе. При таком способе смены фокусного расстояния осуществляется быстрый поиск принципиального решения оптической схемы панкратического объектива и определение требований к ее компонентам.

Ключевые слова: оптическая система, ИК зум-объектив, тепловизионный прибор, охлаждаемое фотоприемное устройство

A. S. Grechenevskiy^{1,2}, T. N. Khatsevich¹*

The Schematic Solution of the Infrared Zoom Lens

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² «Luggar» LLC, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: grechenevskiy_alexey94@mail.ru

Abstract. In conditions of the imposed sanctions, the political situation and limited time for production of military equipment, adjustments are needed in the methodology for the development of new weapons and optoelectronic systems for their equipment. The modernization of existing and technological development in terms of the manufacture of optical systems becomes relevant. The subject of research is optical systems for thermal imaging devices, which use cooled matrix radiation receivers. The purpose of the article: to demonstrate how you can develop the methodology for choosing a circuit solution, developed for thermal imaging lenses with a fixed focal length, for thermal imaging lenses with a variable focal distance. The hypothesis is confirmed that the introduction of an afocal system consisting of two adjacent components with focal lengths equal in

absolute magnitude into the optical scheme allows, by moving the components of the afocal system along the optical axis, to ensure a continuous change of the focal length in the lens. With this method of changing the focal length, a quick search is carried out for a fundamental solution to the optical scheme of the pancratic lens and the definition of requirements for its components.

Keywords: optical system, IR zoom-lens, thermal imaging device, cooled thermal detector

Введение

В условиях введенных санкций, политической ситуации и ограниченности времени на производство военной техники необходимы коррективы в методику разработок новых образцов вооружения и оптико-электронных систем для их оснащения [1, 2]. Актуальной становится модернизация существующих и прошедших технологическую отработку в части изготовления оптических систем.

Цель статьи: продемонстрировать, каким образом можно развить методику выбора схемного решения, отработанную для тепловизионных объективов с фиксированным фокусным расстоянием, на тепловизионные объективы с переменным фокусным расстоянием. В качестве предмета исследования выбраны оптические системы инфракрасных объективов с вынесенным выходным зрачком. Исследование проводится с использованием методов геометрической оптики и компьютерных методов дизайна оптических систем.

Методы и материалы

На основании анализа, проведенного в источнике [3], в котором представлены характеристики современных панкратических объективов длинноволнового (8 – 14 мкм) инфракрасного диапазона (LWIR), в рамках данной статьи, выполнен анализ зум-объективов средневолнового (8 – 5 мкм) ИК диапазона (MWIR) на базе охлаждаемых фотоприемных устройств (ФПУ), выпускаемых ведущими мировыми лидерами в данной области, такими как «Ophir Optronics Solutions LTD» [4], «Temtek Optics LTD» [5] и «RP OPTICAL LAB» [6]. Следует отметить, что практически все приведенные объективы работают с приемниками формата 640x480 или 1024x768, при размере пиксела 17 мкм, в диапазоне температур от –30 до +60°C [7].

Результат количественного сравнения выпускаемой продукции зум-объективов LWIR и MWIR диапазонов, а также объективов с дискретной сменой увеличения представлен на рис. 1.

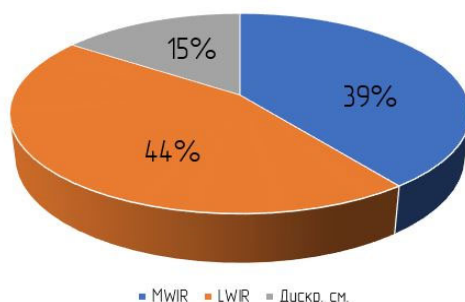


Рис. 1. Анализ современного рынка ИК объективов

Анализ технических характеристик панкратических MWIR объективов на базе охлаждаемых ФПУ, показывает, что в настоящее время:

- количество объективов с дискретной сменой характеристик мало (не более 15 % от общего числа);
- диапазон перепада фокусных расстояний (zoom) составляет от 3 до 27 крат;
- длина панкратических объективов находится в диапазоне от 0,17 до 0,75 от наибольшего фокусного расстояния;
- наружные диаметры оправ панкратических объективов превышают диаметры входных зрачков при наибольшем фокусном расстоянии в 1,1 – 1,5 раз;
- диапазон диафрагменных чисел зум-объективов составляет от 2 до 5,5;
- массы ИК зум-объективов варьируются от 220 г до 14 кг.

Основываясь на информацию из источника [8], инфракрасные зум-объективы MWIR диапазона, работающие совместно с охлаждаемыми ФПУ, имеют характерную особенность, а именно – апертурная диафрагма (выходной зрачок) оптической системы вынесена относительно последнего компонента на определенное фиксированное расстояние. Структурный анализ, проводимый для однофокусных объективов от ведущих производителей, а также, патентный поиск актуальных на настоящее время разработок позволили сгруппировать и выделить четыре основные типа схемных решений для оптических систем объективов.

Авторами предложена классификация схемных решений оптических систем, сравнение производится по признаку «положение входного зрачка объектива» [8]. Наибольший интерес для разработок представляет схема, в которой входной зрачок объектива размещается на первом компоненте объектива. При таком схемном решении обеспечиваются наименьшие размеры компонентов объектива (рис. 2).

В рамках параксиальной оптики создана математическая модель двухкомпонентной схемы объектива, работающего совместно с охлаждаемым ФПУ. Данная оптическая схема предполагает, что входной зрачок является первым компонентом системы.

Результатом проделанной работы в источнике [8] является научно-техническое обоснование оптимальности разработанной оптической системы, работающей совместно с охлаждаемым ФПУ.

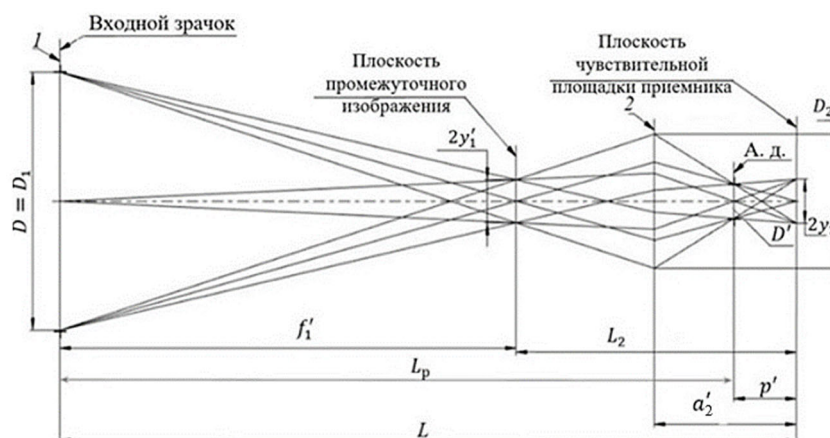


Рис. 2. Схемное решение оптической системы

Оптическая схема на рис. 2 содержит обозначения основных параметров, используемые в аналитических соотношениях, а именно: L – расстояние вдоль оптической оси от плоскости промежуточного изображения до чувствительной площадки приемника; L_p – расстояние между плоскостями входного и выходного зрачков объектива; a_2' – расстояние от компонента 2 до чувствительной площадки приемника; f_1', f_2' – фокусные расстояния компонентов 1, 2 соответственно; $2y_1'$ – размер (по диагонали) изображения, построенного компонентом 1 в плоскости промежуточного изображения; $2y_2'$ – диагональ чувствительной площадки приемника; β_2 – линейное увеличение компонента 2; β_p – линейное увеличение в зрачках объектива; D – диаметр выходного зрачка объектива; при этом, положение входного зрачка объектива совпадает с компонентом 1, положение выходного зрачка объектива совпадает с охлаждаемой диафрагмой приемника, изображение, построенное компонентом 2, проецируется на чувствительную площадку приемника.

В частности, в формулах (1) – (3), представленных далее, рассчитываются ключевые параметры системы для дальнейшего сравнения с результатами, полученными в ходе расчетов методом компьютерного моделирования в программе Zemax [9].

$$f_2' = \frac{\beta_2 \cdot (f_1' - p') \cdot \beta_p}{\beta_p \cdot (\beta_2 - 1)^2 - \beta_2 \cdot (\beta_p - 1)^2}, \quad (1)$$

$$L = \frac{(\beta_p - 1)^2 \cdot L_0 \cdot \beta_2}{(\beta_2 - 1)^2 \cdot \beta_p}, \quad (2)$$

$$D_2 = 2 \cdot (a_2' \cdot \operatorname{tg} \gamma - y_2'). \quad (3)$$

В настоящей статье проверяется гипотеза, заключающаяся в том, что введение в оптическую схему, рассчитанную по методике [8] для фиксированного фокусного расстояния, афокальной системы, состоящей из двух вплотную стоящих компонентов с равными по абсолютной величине фокусными расстояниями, позволяет путем перемещения компонентов афокальной системы вдоль оптической оси обеспечить непрерывную смену фокусного расстояния в объективе, без увеличения габаритной длины вдоль оптической оси. При таком способе смены фокусного расстояния осуществляется быстрый поиск принципиального решения оптической схемы панкратического объектива и определение требований к ее компонентам [10].

Компьютерный эксперимент выполнялся на основе исходной оптической схемы со следующими параметрами: $f_1' = 250$ мм, $f_2' = 22,5$ мм, $L = 340$ мм, $f_{\text{ОБ}}' = -250$ мм. В схему вводился афокальный компонент 3, состоящий из двух вплотную расположенных компонентов 3(1) и 3(2) с противоположными по знаку оптическими силами. Далее, методами компьютерного проектирования, в параксиальном приближении определялись требуемые подвижки компонентов вдоль оптической оси, позволяющие обеспечить изменение фокусного расстояния от исходного до наименьшего. Наименьшее значение фокусного расстояния определялось в положении, когда один из компонентов 3(1) или 3(2) вплотную приближался к компонентам исходной схемы. При этом оптические силы компонентов 1 и 2 и длина оптической системы оставались неизменными (как в исходной схеме). Результаты моделирования иллюстрируются рис. 3, на котором приведен процесс изменения фокусного расстояния объектива при перемещении компонентов 3(1) и 3(2) вдоль оптической оси, при этом компонент 3(1) имеет отрицательную оптическую силу, а компонент 3(2) – положительную.

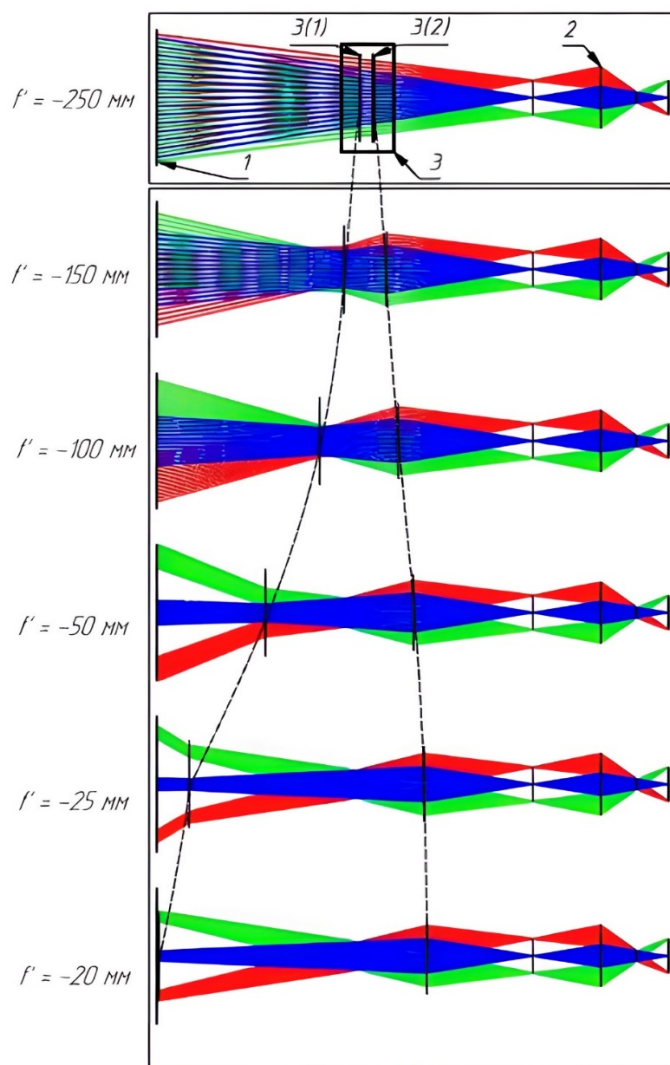


Рис.3. Демонстрация линейного перемещения компонентов 3(1) и 3(2)

Ход лучей осевого и наклонных пучков лучей, показанный для шести конфигураций, представленных на рис. 3, демонстрирует отсутствие необходимости увеличивать диаметры линз свыше диаметра входного зрачка. Таким образом, продольные и поперечные габаритные размеры схемы остаются равными таковым в исходной схеме.

Результаты и обсуждение

В компьютерном эксперименте достигнуто 12,5-кратное изменение фокусного расстояния объектива: от 250 до 20 мм. Относительные отверстия компонентов 3(1) и 3(2), требуемые для достижения указанного перепада фокусных расстояний, составили значение, близкое к 1:1. Для сравнения: в исходном варианте относительные силы компонентов 1 и 2 составляли соответственно 1:2,8 и 1:0,5. Поскольку исходная схема была реализована в системе с конечными толщинами и апертурами [6], то и компоненты 3(1) и 3(2) при указанных относительных отверстиях могут быть преобразованы в линзовые компоненты при разработке оптической системы панкратического объектива.

Заключение

Не претендуя на обоснование предельно достижимого перепада фокусных расстояний, констатируется, что предложенный способ поиска схемных решений при разработке панкратических инфракрасных объективов для тепловизионных приборов на основе охлаждаемых матричных приемников излучений позволяет получить решения, приемлемые для инженерной реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горыня, А. Рынок тепловизоров: пандемия стимулировала развитие технологий / А. Горыня, Д. Шатунов, М. Кабенин, А. Виталисов, П. Демидов и др. – Текст: непосредственный // Системы безопасности. – 2020. – №2 (152). – С. 102–113.
2. Волков В. Г. Современные тенденции в разработках инновационных тепловизионных объективов и проблемные вопросы их промышленного производства / В. Г. Волков, Е. А. Моисеев, Ю. С. Митрофанова, Б. Н. Сенник. – Текст: непосредственный // Фотоника. – 2018. – №1. – С. 94–105.
3. Хацевич Т. Н., Ижбульдин Д. А., Греченевский А.С. Разработка панкратического LWIR объектива // Приборы. – 2022. – №7 (265). – С. 21–27.
4. Ophiropt.com: MWIR / Continuous Zoom: сайт. – URL: https://www.ophiropt.com/infrared/products_categories/zoom/?fam=6/ (дата обращения 10.04.2023). – Текст: электронный.
5. Temmek.com: MWIR – Lenses for uncooled detectors: сайт. – URL: <https://www.temmek.com/project-div/MWIR-Lenses-for-uncooled-detectors/> (дата обращения 10.04.2023). – Текст: электронный.
6. Rp-optical-lab.com: MWIR continuous zoom lens: сайт. – URL: http://rp-optical-lab.com/products_type/lenses/ (дата обращения 10.04.2023). – Текст : электронный.
7. Кулакова, Н. А. Современные тенденции создания оптических систем для инфракрасной области спектра / Н. А. Кулакова, А. Р. Насыров, И. М. Несмелова. – Текст: непосредственный // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 5. – С. 36–44.
8. Хацевич Т. Н., Греченевский А. С. Исследование схем объективов с вынесенным входным зрачком для тепловизионных приборов // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, №2. – С. 259–275.

9. ZEMAX Optical Design Program. User's Guide. Tucson, Arizona, USA: Zemax Development Corporation, 2009. – 732.

10. Пахомов, И. И. Панкратические системы / И. И. Пахомов. – Москва: Машино-строение. – 1976. – 160 с. – Текст: непосредственный.

© А. С. Гречневский, Т. Н. Хацевич, 2023