

П. С. Кривошеев¹, Т. Н. Хацевич^{1}*

Разработка широкоугольных инфракрасных объективов

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: khatsevich@rambler.ru

Аннотация. Актуальность темы определяется потребностями оптико-электронного приборостроения в расширении отечественной элементной базы широкоугольных инфракрасных объективов для матричных приемников излучений мегапиксельного формата. Целью работы является представление результатов разработки трех светосильных широкоугольных инфракрасных объективов с угловыми полями от 60 до 90 °. Работа построена на использовании методов технической оптики и компьютерного моделирования оптических систем. Схемное решение инфракрасного светосильного широкоугольного объектива включает квазиафокальную двухкомпонентную систему с угловым увеличением менее 1 крата и силовой компонент. Первая отрицательная линза объектива выполняется из германия, остальные – из халькогенидного стекла. Относительная оптическая сила силового компонента лежит в диапазоне от 0,40 до 0,45. При указанных угловых полях в объективе обеспечивается телецентрический ход главных лучей в пространстве изображений и высокое качество изображений при сопряжении с мегапиксельными приемниками LWIR диапазона спектра.

Ключевые слова: тепловизионная система, широкоугольный ИК-объектив, телецентрический ход лучей

P. S. Krivosheev¹, T. N. Khatsevich^{1}*

Design of Wide-Angle Infrared Objective Lens

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: khatsevich@rambler.ru

Abstract. The relevance of the research is defined by the need of optical electronic design field in Russia in expanding the range of elements of wide-angle objective lens for full-format matrix radiation receivers. The aim of study is to present the results of design of three high-aperture wide-angle infrared lenses with angular fields from 60 to 90 °. The study is based on the use of technical optics methods and computer modeling of optical systems. The design of the infrared high-aperture wide-angle lens includes a quasi-focal two-component system with an angular magnification of less than 1x and a power component. The first negative lens of the objective is made of germanium, the rest lenses are made of chalcogenide glass. The relative optical power of the power component lies in the range from 0.40 to 0.45. For angular fields from 60 to 90 ° the lens provides a telecentric path of the main rays in the image space and high image quality when paired with full-format receivers of LWIR spectrum range.

Keywords: infrared imaging system, wide-angle infrared lens, telecentric ray path

Введение

Актуальность разработки инфракрасных объективов для тепловизионных систем подтверждается многочисленными публикациями по тематике тепловизионной аппаратуры, расширением номенклатуры объективов для тепловизион-

ных приборов и систем, представленных на сайтах и в каталогах предприятий-производителей [1–4]. Однако широкоугольные объективы для обзорных тепловизионных систем представлены в ограниченном количестве. Разработка и появление на рынке неохлаждаемых мегапиксельных матричных приемников излучений спектрального диапазона от 8 до 14 мкм (LWIR диапазон) [5] является стимулом для поиска технологичных схемных решений широкоугольных инфракрасных объективов, поскольку совместно с такими приемниками большие значения угловых полей могут быть достигнуты при приемлемом масштабе изображения и диаметре входного зрачка, что позволяет решать задачи обнаружения и распознавания мелких объектов в широком угловом поле обзора.

Целью работы является представление результатов разработки светосильных широкоугольных инфракрасных объективов с угловыми полями от 60 до 90 °. Работа построена на использовании методов технической оптики и компьютерного моделирования оптических систем.

Методы и материалы

В широкоугольных оптических системах рекомендуется обеспечивать не ортоскопический, а линейный закон построения изображений [6], называемый часто F-Theta законом. Поэтому требуемое значение фокусного расстояния объектива, соответствующее заданному угловому полю, при равных линейных размерах чувствительной площадки приемника излучений, получается несколько больше, чем в ортоскопических объективах. Так, превышение фокусного расстояния для углового поля по диагонали кадра, равного 60 °, составляет 10 %, равного 90 ° – около 30 %. При равных относительных отверстиях объективов соответственно возрастают диаметры входных зрачков в 1,1 и 1,3 раза. Согласно [7], дальность решения зрительных задач пропорциональна квадрату относительного отверстия и фокусному расстоянию объектива. Таким образом, применение в широкоугольной тепловизионной системе F-Theta объектива при прочих равных условиях способствует повышению дальности обнаружения и распознавания объектов, или повышает вероятность обнаружения более мелких объектов.

Разработка широкоугольных светосильных объективов осуществлялась в соответствии с принципиальной схемой, использованной ранее для разработки сверхширокоугольных светосильных объективов видимого диапазона спектра [8]. В состав принципиальной схемы включается двухкомпонентная афокальная система галилеевского типа, обращенная отрицательным компонентом 1 к пространству предметов и имеющая угловое увеличение менее 1 крата или близкое к нему, и расположенный за ней силовой компонент 3 (рис. 1). Расстояние между компонентами 2 и 3 принимается близким к фокусному расстоянию компонента 3, что способствует обеспечению телецентрического хода главных лучей наклонных пучков лучей в пространстве изображений.

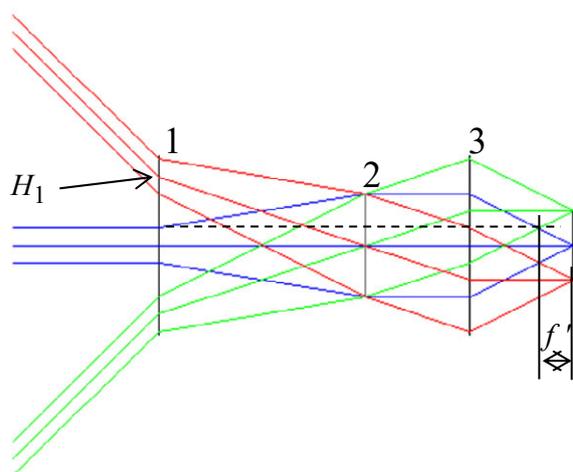


Рис. 1. Принципиальная схема для разработки широкоугольного объектива

Исследование условия устранения хроматизма увеличения в принципиальной схеме, показанной на рис. 1, позволило выявить, что на хроматизм увеличения оказывают влияние оптические силы компонентов 1 – 3 и коэффициенты средней дисперсии материалов компонентов 1 и 3. Коэффициент средней дисперсии компонента 2 оказывает влияние на хроматизм положения. Если принять, что в принципиальной схеме компоненты 1 – 3 являются однолинзовыми, то для коррекции хроматизма увеличения должно соблюдаться условие:

$$v_1 / v_3 = H_1 / f', \quad (1)$$

где v_1 , v_3 – коэффициенты средней дисперсии материалов компонентов 1 и 3 соответственно; H_1 – высота второго параксиального луча на компоненте 1; f' – фокусное расстояние объектива.

При угловом увеличении афокальной системы, состоящей из компонентов 1, 2, менее 1 отношение v_1/v_3 получается больше 1. Иными словами, отрицательный компонент 1 должен быть изготовлен из материала, имеющего коэффициент средней дисперсии в рабочем спектральном диапазоне больше, чем коэффициент средней дисперсии материала положительного коэффициента 3.

Полученное соотношение объясняет, почему при расчете оптических систем широкоугольных объективов в диапазоне спектра от 8 до 14 мкм с помощью методов компьютерного проектирования для первого отрицательного компонента объектива в результате оптимизации методом перебора материалов выбирается германий, имеющий наибольший коэффициент средней дисперсии среди материалов, прозрачных в LWIR диапазоне спектра. В качестве материала остальных компонентов объектива могут быть использованы халькогенидные стекла, седенид цинка или германий.

Результаты моделирования оптических систем широкоугольных объективов, приведенные в следующем разделе, подтверждают, что проектирование компонентов 1 – 3 в виде двух или трех линз при наличии двух асферических поверхностей в системе является достаточным для приемлемого уровня коррекции аберраций.

Результаты

Результаты разработки трех оптических систем объективов с угловыми полями 70, 80 и 90 ° приведены в табл. 1. Объективы ориентированы на сопряжение с перспективной мегапиксельной матрицей формата 1920×1080 (пиксель 15×15 мкм). Оптические оси объективов показаны вертикальными. Все объективы являются телецентрическими, имеют относительное отверстие 1 : 1,2. В них соблюдается закон построения, близкий к линейному. Оптические системы содержат по две асферических преломляющих поверхности. В качестве примера на рис. 2 приведена оптическая схема объектива 80FTT1,2/1920×1080×15.

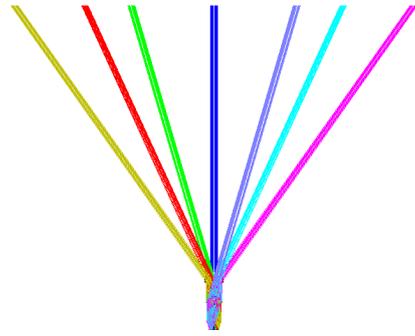
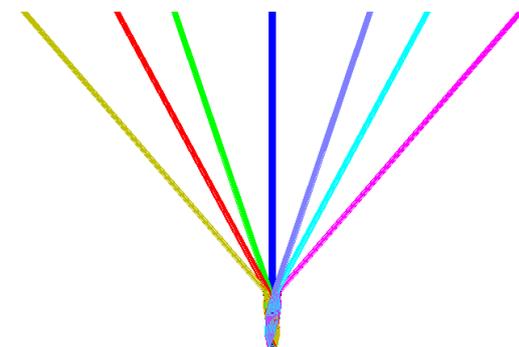
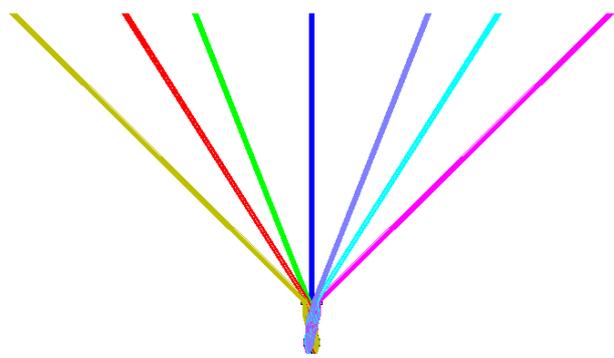
Объектив, схема которого приведена на рис. 2 а, имеет фокусное расстояние 24 мм и обеспечивает угловое поле 70×39 ° (80 ° по диагонали). Предусмотрено выполнение линз объектива из двух материалов: германия и халькогенидного стекла, при этом первая отрицательная линза – из германия. Это обеспечивает относительный хроматизм увеличения в пределах всего поля не более 0,015 %. Распределение энергии в изображении осевой точки в пределах квадратной площадки со стороной 15 мкм, приведенное на рис. 2 б, иллюстрирует согласование качества изображения, формируемое объективом, с характеристиками приемника излучений формата 1920×1080 с размером пикселя 15х15 мкм. Сечения частотно-контрастной характеристики (ЧКХ), приведенное на рис. 2 в, демонстрирует постоянство качества изображения по полю. Отступление от F-Theta закона (рис. 2 г) не превышает 2 %.

Качество изображения в объективах 70FTT1,2/1920×1080×15 и 90FTT1,2/1920×1080×15 (табл. 1) близко к 80FTT1,2/1920×1080×15.

Структурный анализ разработанных оптических систем показал, что компоненты 1 и 2 (рис. 1) выполняются из двух линз, а компонент 3 – из двух или трех, при этом относительная оптическая сила компонента 3 находится в диапазоне от 0,40 до 0,45, а компоненты 1 и 2 в ходе оптимизации и балансировки аберраций оптической системы трансформируются из афокальной в оптическую систему с малой положительной оптической силой.

Таблица 1

Характеристики оптических систем объективов

Условное обозначение	Иллюстрация углового поля по диагонали кадра	$\frac{D}{L}$	n/a	Масса, г
70FTT1,2/1920×1080×15		$\frac{62}{183}$	6/2	480
80FTT1,2/1920×1080×15		$\frac{67}{197}$	7/2	670
90FTT1,2/1920×1080×15		$\frac{67}{191}$	7/2	620
<p>Примечание: условное обозначение объектива: первые цифры – угловое поле по диагонали кадра; FT – F-Theta закон построения изображения; T – телецентрический; формат кадра x размер пикселя, мкм; $\frac{D}{L}$ – в числителе наибольший диаметр линз объектива, в знаменателе – длина вдоль оптической оси, мм; n/a количество линз в объективе / из них асферических.</p>				

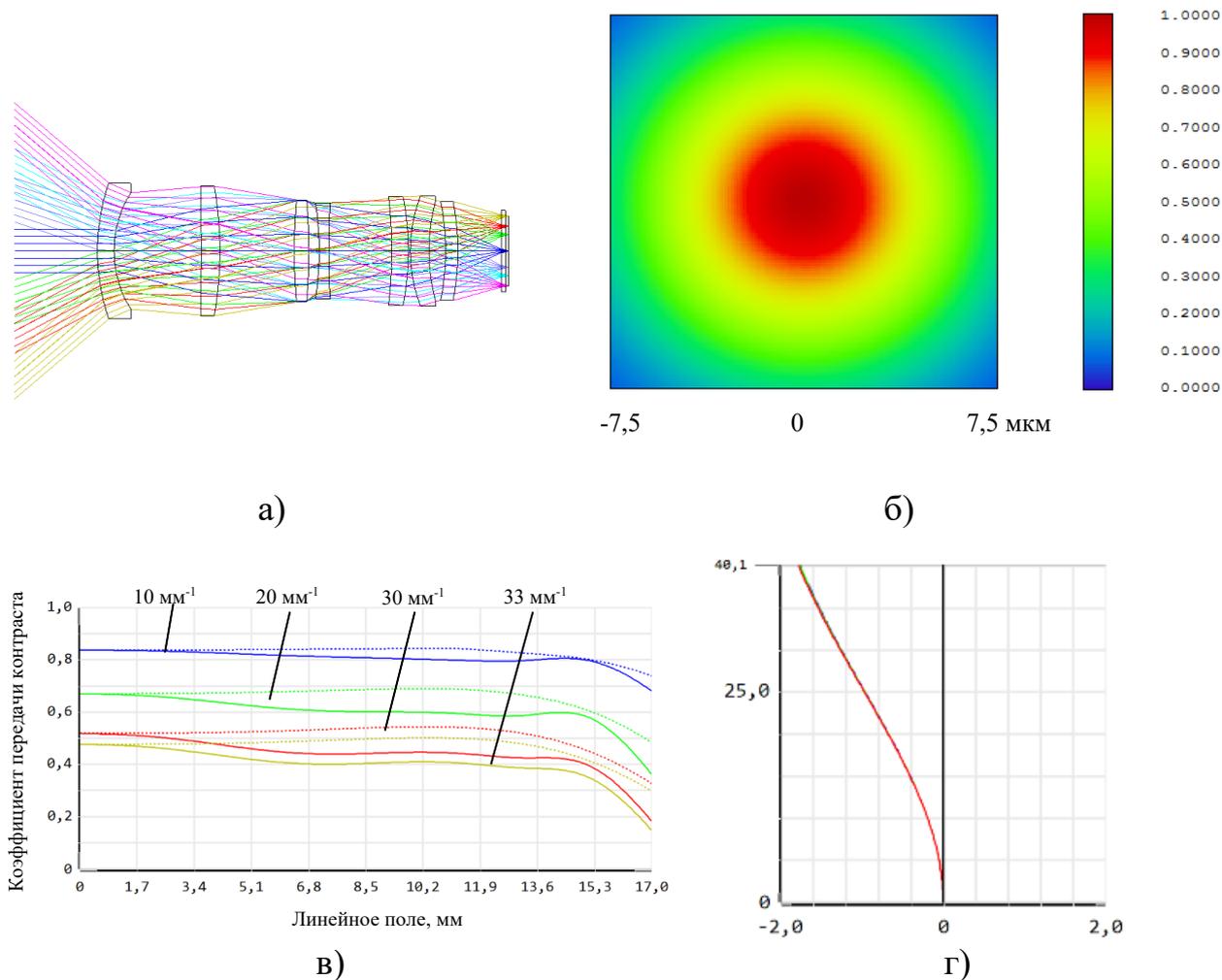


Рис. 2. Объектив 80FTT1,2/1920×1080×15: а) оптическая схема с ходом лучей; б) распределение энергии в изображении точки в квадрате со стороной 15 мкм; в) сечения ЧКХ по полю изображения; г) дисторсия F-Theta

Обсуждение

Если сравнить разработанные объективы с объективами известного производителя инфракрасной оптики [9], то при равных фокусных расстояниях в них реализуются в два раза большие угловые поля, соответствующие наибольшей стороне чувствительной площадки приемника излучений, но разработанные объективы проигрывают аналогам по массо-габаритным характеристикам. Однако для их применения в тепловизионных системах, устанавливаемых на стационарных площадках или подвижных носителях, последнее не является препятствием. Сравнение с известной оптической схемой широкоугольного инфракрасного объектива [10] показывает, что разработанные объективы сопоставимы с указанным объективом по такому показателю, как относительная длина объектива.

Заключение

Схемное решение инфракрасного светосильного широкоугольного объектива, содержащее двухкомпонентную систему с угловым увеличением в зрачках

менее 1 крата, и силовой компонент, отличающееся тем, что первая отрицательная линза системы выполняется из материала с наибольшим коэффициентом средней дисперсии, а относительная оптическая сила силового компонента лежит в диапазоне от 0,40 до 0,45, позволяет при угловых полях от 60 до 90 ° обеспечить телецентрический ход главных лучей в пространстве изображений и высокое качество изображений при сопряжении с перспективными мегапиксельными приемниками LWIR диапазона спектра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. Сеник // Фотоника, 2018, № 1. – С. 94–105.
2. Кульчицкий Н. А. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Часть II. / Н. А. Кульчицкий, А. В. Наумов, В. В. Старцев. // Фотоника, 2020, т. 14; № 4. С. 320–330.
3. Астрон. Тепловизионные системы. Неохлаждаемые тепловизионные системы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://astrohn.ru/thermal-imaging-systems/uncooled-thermal-imaging-systems/> (дата обращения: 22.05.2023).
4. Pranav Wani, Kashif Usmani, Gokul Krishnan, Timothy O'Connor, Bahram Javidi. Lowlight object recognition by deep learning with passive three-dimensional integral imaging in visible and long wave infrared wavelengths // Optics Express, 17 Jan. 2022, Vol. 30, No. 2. – P. 1205–1218.
5. DLE1920 a-Si detector [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.dalithermal.com/productinfo/749159.html> (дата обращения: 22.05.2023).
6. Русинов М.М. Техническая оптика. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 488 с.
7. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Фесько Ю.А., Поликанин А.Н. Дальность действия тепловизионных систем. Ч.I. Методика расчета // Автометрия, 2014, Т.50, № 4. – С. 96–101.
8. Абрамкина Д.Е., Хацевич Т.Н. Оптические системы особоширокоугольных объективов для цифровых камер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 6 : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 1. – С.3-10.
9. Thermal Imaging Lenses Catalog. LWIR/MWIR.Ophir 2023. pdf [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ophiropt.com/infrared>, для зарегистрированных пользователей/ (дата обращения: 02.03.2023).
10. Пат. RU 2385475 Российская Федерация. Светосильный широкоугольный объектив для инфракрасной области спектра (варианты) / Хацевич Т.Н., Терешин Е.А.; патентообладатель: Институт физики полупроводников СО РАН. – № 2008132637/28; заявл. 07.08.2008; опубл. 27.03.2010, бюл. № 9. – 12 с.

© П. С. Кривошеев, Т. Н. Хацевич, 2023