

СТРУКТУРА ОБЪЕКТИВА ТЕПЛОВИЗИОННОГО ПРИБОРА С ОХЛАЖДАЕМЫМ ПРИЕМНИКОМ

Алексей Сергеевич Греченевский

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант, тел. (983)308-02-24, e-mail: grechenevskiy_alexey94@mail.ru

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Предложена классификация структурных схем объективов тепловизионных приборов с охлаждаемыми приемниками излучения по признаку «положение входного зрачка». Приводятся результаты моделирования схемы с входным зрачком на первом компоненте, показаны пути уменьшения осевой длины объектива.

Ключевые слова: оптическая система, объектив, тепловизионный прибор, охлаждаемый матричный приемник.

OPTICAL LENS DESIGN FOR THERMAL IMAGING DEVICE WITH THE COOLED DETECTOR

Alexey S. Grechenevskiy

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, phone: (983)308-02-24, e-mail: grechenevskiy_alexey94@mail.ru

Tatyana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

The classification of lens design for cooled thermal imaging devices based on position of the entrance pupil is proposed. The results of the development of the optical system with the entrance pupil on the first component are presented. The methods for reducing the axial length of the lens are shown.

Key words: optical system, lens, thermal imaging device, cooled thermal detector.

Введение

Тепловизионная аппаратура является наиболее интенсивно развивающимся типом приборов современного оптико-электронного приборостроения. В качестве подтверждения этому в источнике [1] указывается, что тепловизионные приборы и системы и их элементы занимают значительную долю представляемых моделей на российских и международных форумах, конференциях, выставках фотоники и оптико-электронного приборостроения. Исследования

и новые разработки по тепловизионной технике и технологии проводятся в 25 странах мира. Номенклатура тепловизионной аппаратуры включает сотни наименований, она относится к изделиям двойного назначения (военного и гражданского).

Наблюдаемый в течение последних десятилетий рост разработок тепловизионных приборов на основе неохлаждаемых микроболометрических приемников излучения привел к тому, что технические характеристики приборов приблизились к предельным возможностям существующих приемников и оптики [2].

В источнике[3] отмечается, что прогнозируемое в ближайшие годы совершенствование охлаждаемых матричных фотоприемных устройств приведет к увеличению на рынке тепловизионных приборов и изделий на их основе. Конкурентоспособность вновь разработанного прибора или системы определяется многими факторами, среди которых, с технической точки зрения, определяющим является оптимальное соответствие характеристик и параметров приемника, электроники и оптической системой изделия.

Вместе с тем наблюдается развитие оптических технологий, например, технологий формообразования, дифракционных оптических элементов, технологий оптических материалов и покрытий, которые необходимо учитывать на этапе проектирования оптических систем объективов.

Поскольку целый ряд показателей и характеристик тепловизионного прибора напрямую обуславливается оптикой прибора, то разработка новых оптических систем объективов для тепловизионных приборов, использующих охлаждаемые матричные приемники излучения, остается актуальной задачей.

Предметом исследования являются оптические системы объективов для тепловизионных приборов, использующих охлаждаемые матричные приемники излучения.

Целью исследования является структурный анализ схемных решений, реализованных в оптических системах тепловизионных приборов, в которых применяются охлаждаемые приемники инфракрасного излучения, и обоснованный выбор схемного решения для дальнейшей разработки объектива, производство которого обеспечило бы конкурентные преимущества производителю.

В исследовании использованы общие методы научного исследования: классификация, сравнение, анализ, а также специальные методы оптотехники: методы геометрической оптики и теории оптических приборов.

Структурный анализ оптических схем тепловизионных объективов

Определение структуры оптической схемы (структурный анализ) является первым этапом схмотехнического проектирования оптической ветви оптико-электронного прибора и ставит своей целью определение количества элементов в оптической системе и оптимальное значение их параметров.

Для проведения структурного анализа по литературным и патентным источникам составлена выборка из трех десятков оптических системы для тепло-

визионных приборов, в которых применены охлаждаемые приемники излучения, чувствительные в MWIR (Middle Wave Infrared, средневолновый диапазон, от 3 до 5 мкм) или LWIR (Long Wave Infrared, длинноволновый диапазон, от 8 до 14 мкм) диапазонах спектра. Основным характерным признаком, объединяющим объективы в выборке, является наличие вынесенного выходного зрачка в оптической системе. Физически роль выходного зрачка и, соответственно апертурной диафрагмы, выполняет отверстие в детали, которое размещено за защитным стеклом внутри корпуса фотоприемного устройства и, так же, как и весь приемник, подвергается охлаждению до рабочей температуры приемника. Это отверстие называют «охлаждаемой» или «холодной» диафрагмой. Оптическая система объектива становится несимметричной относительно апертурной диафрагмы, что накладывает дополнительные требования к коррекции полевых аберраций.

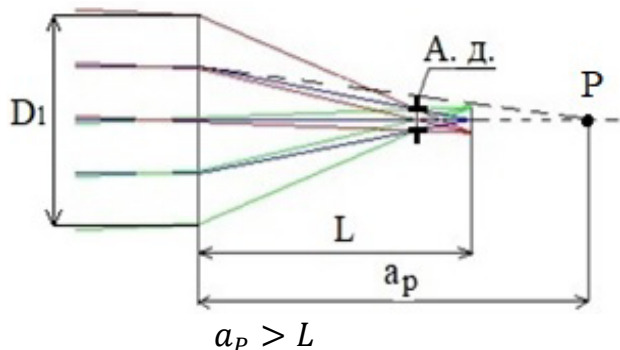
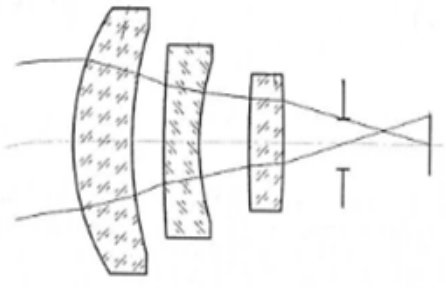
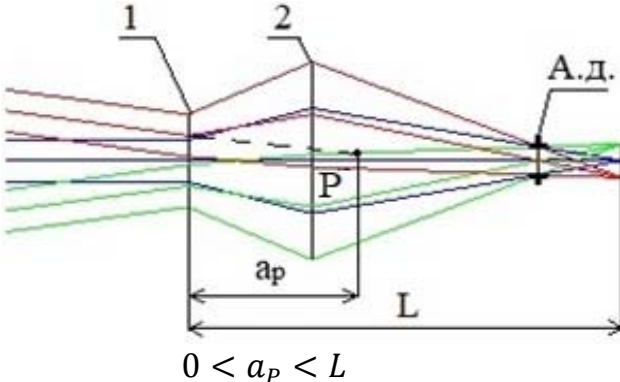
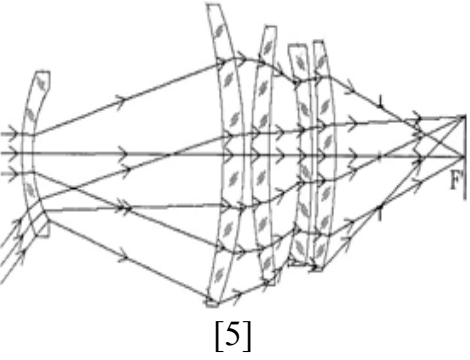
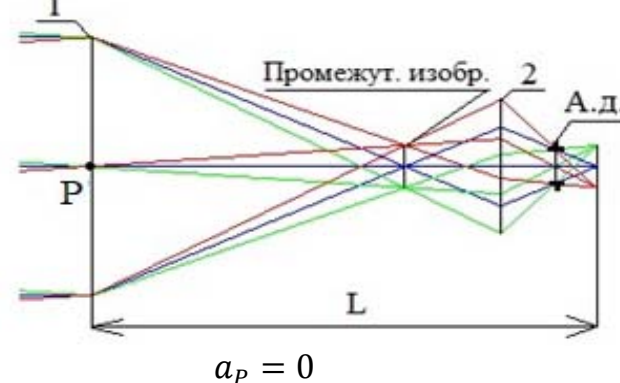
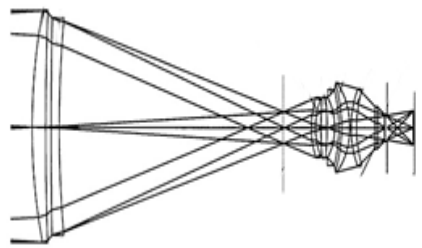
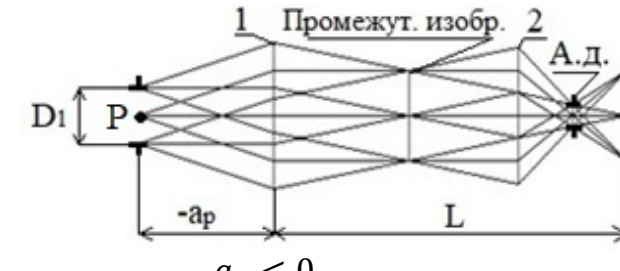
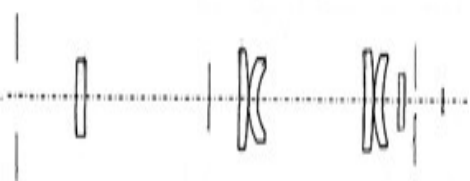
Объективы в выборке можно разделить на два класса: объективы с фиксированными фокусными расстояниями и объективы со сменными фокусными расстояниями (с дискретной сменой поля зрения и фокусного расстояния и панкратические). В статье проводится структурный анализ объективов с фиксированными фокусными расстояниями.

Классификационным основанием (признаком) для структурного анализа выбрано положение входного зрачка объектива.

По этому признаку оптические схемы объективов разделены на четыре типа и представлены в таблице. Для каждого типа оптических схем приведено по одному примеру оптических схем с указанием источника информации.

Структурная схема типа «а» характеризуется тем, что $a_p > L$. Схема является однокомпонентной. Холодная диафрагма (А.д.) расположена на расстоянии p' перед задней фокальной плоскостью компонента. Входной зрачок является мнимым и смещен вдоль оси на расстояние a_p относительно компонента, при этом a_p превышает фокусное расстояние компонента и, соответственно, длину объектива. На схеме точка Р – центр входного зрачка. Диаметр компонента D_1 превышает диаметр входного зрачка $D_1 > D_p$. Ограничение диаметра компонента приводит к виньетированию наклонных пучков лучей и снижению облученности изображения внеосевых точек в системе.

Структурная схема типа «б» характеризуется тем, что $0 < a_p < L$. Схема состоит из двух компонентов, первый из которых отрицательный. Схема может рассматриваться как инвертированный телеобъектив. Холодная диафрагма расположена на расстоянии p' перед задней фокальной плоскостью объектива. Входной зрачок является мнимым, смещен вдоль оси на расстояние a_p относительно компонента 1. Диаметры компонентов превышают диаметр входного зрачка: $D_2 > D_1 > D_p$. Ограничение диаметров компонентов приводит к виньетированию наклонных пучков лучей и снижению облученности изображения внеосевых точек в системе.

Структурная схема объектива	Пример оптической схемы
<p>a)</p>  <p>$a_p > L$</p>	 <p>[4]</p>
<p>б)</p>  <p>$0 < a_p < L$</p>	 <p>[5]</p>
<p>в)</p>  <p>$a_p = 0$</p>	 <p>[6]</p>
<p>г)</p>  <p>$a_p < 0$</p>	 <p>[7]</p>

Структурная схема типа «в» характеризуется тем, что $a_p = 0$. Схема состоит из двух положительных компонентов, имеет плоскость действительного промежуточного изображения. Холодная диафрагма расположена на расстоя-

нии p' перед задней фокальной плоскостью объектива. Параметры компонентов таковы, что входной зрачок является действительным и совпадает с положением компонента 1. Диаметр компонента 1 равен диаметру входного зрачка: $D_1 = D_p$.

Структурная схема типа «г» состоит из двух положительных компонентов, имеет плоскость действительного промежуточного изображения. Холодная диафрагма расположена на расстоянии p' перед задней фокальной плоскостью объектива. Параметры компонентов таковы, что входной зрачок является действительным и вынесен в пространство предметов: $a_p < 0$. Диаметр компонента 1 превышает диаметр входного зрачка.

Выделение нескольких вариантов структуры построения оптической схемы объектив обусловлено и коррелирует с многообразием их применений.

Объективы, к которым предъявляются требования по минимизации осевой длины без ограничений по диаметрам элементов, могут быть созданы по структурной схеме «а» [4].

В основу проектирования короткофокусных широкоугольных объективов может быть положена схема «б» [5].

Для применений, в которых требуется иметь минимально возможный диаметр объектива (не более диаметра входного зрачка) – например, с целью уменьшения массы компонента 1 или из-за необходимости установки объектива в отверстие ограниченного размера, объектив проектируется по схеме в). Группа таких объективов наиболее многочисленна, например, [6–9]. В некоторых схемах вводится дополнительный компонент, размещаемый вблизи плоскости промежуточного изображения и выполняющий функцию коллектива. По схеме типа «в» может моделироваться оптическая система с узким полем зрения (наибольшего фокусного расстояния) в объективах с дискретной сменой характеристик [10–12].

Для согласования зрачков в многокомпонентных системах, в которых перед объективом устанавливается еще одна оптическая система или сканирующие элементы, требуется обеспечить в объективе вынесенный входной зрачок [7].

Для определения оптимальных параметров компонентов выбранной для проектирования схемы рекомендуется воспользоваться алгоритмом проектирования тепловизионных многокомпонентных оптических систем [13]. Для освоения указанного алгоритма магистрантом было выполнено моделирование вариантов оптической схемы объектива по типу «в» для конкретных значений, а именно: фокусное расстояние 300 мм, относительное отверстие 1 : 2. Формат приемника 600 × 600, шаг пикселя 15 мкм, положение холодной диафрагмы 20 мм.

На рисунке графически демонстрируются результаты параксиального моделирования оптической схемы в зависимости от значений линейного увеличения β_2 компонента 2.

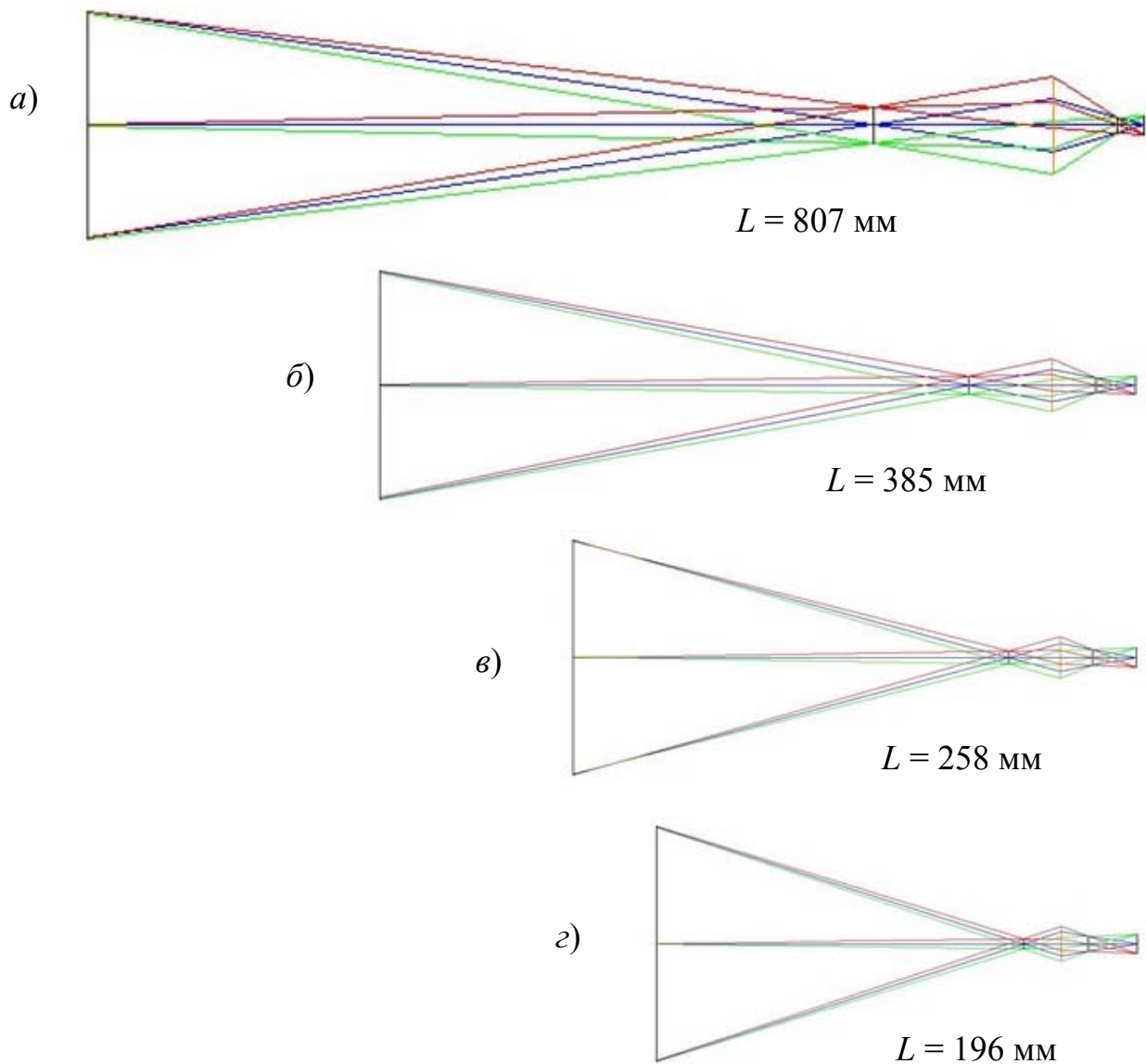


Иллюстрация зависимости осевой длины объектива, построенного по структурной схеме типа «в», при различных значениях линейного увеличения β_2 компонента 2:

а) 0,5 крат; б) 1 крат; в) 1,5 крат; г) 2 крат

Схемы представлены в одном масштабе, имеют одинаковые фокусные расстояния, диаметры входного зрачка, относительные отверстия всей схемы и размер p' и наглядно демонстрируют, что с увеличением по модулю значения β_2 уменьшаются фокусные расстояния компонентов 1 и 2, длина всей системы и возрастают относительные отверстия компонентов.

Заключение

Характерным признаком объективов для тепловизионных приборов, построенных на охлаждаемых матричных приемниках излучения, является нали-

чие вынесенного выходного зрачка (апертурной диафрагмы) в оптической системе. На основании структурного анализа объективов с фиксированным фокусным расстоянием выделено четыре типа схемных решений таких объективов. Предложена классификация схемных решений по признаку «положение входного зрачка объектива».

Проведено предварительное моделирование одного из схемных решений с положением входного зрачка на первом компоненте схемы для конкретного значения фокусного расстояния. Его результаты показывают, что уменьшение габаритных размеров объектива может быть достигнуто при увеличении по модулю линейного увеличения второго компонента схемы и возрастании относительных отверстий компонентов. Для поиска оптимума должны быть привлечены дополнительные критерии, основанные, в частности, на аберрационных возможностях оптических элементов с асферическими поверхностями.

В дальнейшем планируется провести расширенное исследование схемных решений с обоснованием выбора варианта для разработки оптической системы объектива.

Авторы выражают благодарность ООО «Оптическое Расчетное Бюро», г. Новосибирск, за предоставленную возможность проведения расчетов в пакете Zemax Professional.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Современное состояние и перспективы развития зарубежных тепловизионных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 3. – С. 1–13.
2. Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н. Реализация общетехнических и специальных требований при разработке малогабаритных тепловизионных приборов наблюдения и прицелов // Приборы. – 2018. – № 1. – С. 43–50.
3. Тарасов В. В., Торшина И. П., Якушенков Ю. Г. Современные проблемы оплотехники : учеб. пособие. – М. : МИИГАиК, 2014. – 82 с.
4. Гаршин А. С. Особенности расчета трехлинзовых инфракрасных объективов, работающих с охлаждаемыми приемниками // Оптический журнал. – 2016. – С. 38–43.
5. Лебедев О. А., Сабинин В. Е., Солк С. В. Пат. 2434256 Российская Федерация, МПК G02B 13/14 (2006.01), G02B 9/60 (2006.01). Светосильный широкоугольный линзовый объектив для инфракрасной области спектра; патентообладатели Федеральное государственное унитарное предприятие Научно – исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем (ФГУП НИИКИ ОЭП); заявл. 12.08.2010.
6. Хацевич Т. Н., Терешин Е. А. Пат. 2419113 Российская Федерация, МПК G02B 13/14 (2006.01), G02B 9/64 (2006.01). Оптическая система с вынесенной апертурной диафрагмой для среднего ИК диапазона спектра; патентообладатели Хацевич Т. Н., Терешин Е. А.; заявл. 06.08.2009.
7. Терешин Е. А., Хацевич Т. Н., Ковтуненко Е. В. Пат. 2379723 Российская Федерация, МПК G02B 13/14 (2006.01), G02B 9/60 (2006.01). Светосильный объектив с вынесенными зрачками для ИК области спектра; патентообладатель Институт физики полупроводников СО РАН; заявл. 25.08.2008.
8. Балоев В. А., Иванов В. П., Рагинов С. В., Скочилова И. А. Пат. 2522463 Российская Федерация, МПК G02B 13/14 (2006.01), G02B 13/16 (2006.01). Оптическая система теплови-

зионного объектива; патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение» Государственный институт прикладной оптики (ОАО «НПО ГИПО»); заявл. 03.04.2014.

9. Ульянова Е. О. Оптические системы для тепловизионных приборов на основе матричных фотоприемных устройств спектрального диапазона 8–12 мкм // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 6. – С. 14–19.

10. Anthony John Kirkham. US. 7136235, Int. Cl. G02B 9/00. Optical apparatus; assignee Thales Optics Ltd., date of patent 14.11.2006.

11. Anthony John Kirkham. US. 6424460, Int. Cl. G02B 15/14. Dual field-of-view objects system for the infrared; assignee Pilkington PE Limited, date of patent 23.07.2002.

12. Max Amon. US. 6423969, Int. Cl. G08B 13/14. Dual infrared band objective lens; assignee Lockheed Martin Corporation, date of patent 23.07.2002.

13. Терешин Е. А., Хацевич Т. Н. Алгоритм эффективного проектирования многокомпонентных систем для инфракрасного спектрального диапазона // VIII Международная конференция «Прикладная оптика-2008», 20–24 октября 2008 г., Санкт-Петербург. – СПб., 2008. – С. 69–73.

© А. С. Гречневский, Т. Н. Хацевич, 2019