

А. Е. Качурин¹✉, Т. Н. Хацевич¹

Разработка термостабильных малогабаритных ИК объективов с увеличенными полями зрения

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: quartermaster1984@mail.ru

Аннотация. Актуальность поиска схемных решений инфракрасных (ИК) объективов обусловлена основными направлениями совершенствования тепловизионных камер: минимизацией массогабаритных параметров при высоком качестве формируемого изображения; повышением угловых полей в пространстве предметов до широкоугольных и сверхширокоугольных значений; обеспечение возможности работы в широком диапазоне температур эксплуатации, повышением технологичности. Целью статьи является представление результатов ранее начатых исследований по применимости используемого схемного решения для разработки группы объективов с повышенными угловыми полями. Исследование проводилось методами компьютерного проектирования оптических систем. Показано, что атермальные оптические системы ИК объективов могут быть созданы при использовании всего двух материалов – селенида цинка и халькогенидного стекла и обеспечить при этом отсутствие терморасфокусировки при креплении линз промежуточными кольцами в корпусе из алюминиевого сплава. Представлена группа из трех объективов с фокусными расстояниями 50, 20 и 10 мм и угловыми полями от 10 до 50 градусов по диагонали кадра.

Ключевые слова: малогабаритные объективы, атермализованные объективы, атермальные объективы, пассивная атермализация

A. E. Kachurin¹✉, T. N. Khatsevich¹

Development of thermostable small-size IR lenses with enlarged fields of view

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: quartermaster1984@mail.ru

Abstract. The relevance of searching for circuit solutions of infrared (IR) lenses is conditioned by the main directions of improvement of thermal imaging cameras: minimization of mass and dimensional parameters at high quality of the formed image; increase of angular fields in the space of objects up to wide-angle and super-wide-angle values; providing the possibility of operation in a wide range of operating temperatures, increasing manufacturability. The purpose of the article is to present the results of the previously started research on the applicability of the used circuit solution for the development of a group of lenses with increased angular fields. The research was carried out by methods of computer-aided design of optical systems. It is shown that athermal optical systems of IR lenses can be created using only two materials - zinc selenide and chalcogenide glass - and ensure the absence of thermo-rasfocusing when lenses are attached by intermediate rings in an aluminum alloy housing. A group of three lenses with focal lengths of 50, 20 and 10 mm and angular fields from 10 to 50 degrees on the diagonal of the frame is presented.

Keywords: small-sized lenses, athermalized lenses, athermal lenses, passive athermalization

Введение

В связи с бурным развитием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в последние годы резко возросла потребность в малогабаритных камерах для визуализации наблюдаемой картины при любых погодных условиях. Преимущества, присущие наблюдению изображения объектов в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра, способствовали тому, что определенная часть БПЛА снабжается тепловизионными камерами. Возможность обеспечить в них малые массогабаритные размеры, высокое качество изображений, соответствующее возможностям современных матричных приемников ИК излучений, эффективность работы в широком диапазоне температур эксплуатации в первую очередь определяется свойствами и характеристиками ИК объективов. К числу основных направлений совершенствования современных ИК объективов для тепловизионных камер можно отнести следующие: минимизация массогабаритных параметров при высоком качестве формируемого изображения; создание объективов с повышенными угловыми полями в пространстве предметов, в том числе широкоугольных и сверхширокоугольных; обеспечение атермализации ИК объективов, повышение технологичности [1 – 5]. Вышеуказанные требования применительно к ИК объективам для тепловизионных камер БПЛА выступают как комплексные.

Целью статьи является представление результатов ранее начатых исследований [6], а именно: исследование применимости схемного решения [7] для разработки группы объективов с повышенными угловыми полями. Исследование проводилось методами компьютерного проектирования оптических систем.

Методы и материалы

Принцип обеспечения термостабильности объективов заключается в том, что в конструкции объектива обеспечивается соответствие термооптических aberrаций положения объектива и смещения плоскости чувствительной площадки матричного приемника излучений, вызванных температурными деформациями механических деталей его крепления. При равенстве термооптической aberrации положения объектива смещению плоскости чувствительной площадки матричного приемника излучений терморасфокусировка отсутствует. Если это равенство обеспечивается без введения дополнительных подвижек объектива, его отдельных линз или приемника излучений, то термостабильность является пассивной: такие схемы называют атермальными (термостабильными). Если для восстановления качества изображения используются дополнительные подвижные элементы в конструкции объектива, то говорят об активной термокомпенсации.

Для обеспечения пассивной термостабильности объективов применяют два основных метода: метод прямой пассивной атермальности и использование термокомпенсаторов. Иногда метод использования термокомпенсаторов выделяют в отдельный метод. Поскольку метод использования термокомпенсаторов достигается за счет увеличения продольных или поперечных размеров оправ объек-

ективов [например, 4], то с целью уменьшения массогабаритных показателей ИК объективов предпочтительным будет являться метод прямой пассивной атермальности. Именно такой метод расчета и используется в настоящем исследовании. Принципиальное схемное решение базируется на трехлинзовой схеме, первые две линзы которой образуют афокальную систему, а третья – выполняет фокусирующую роль (рис. 1).

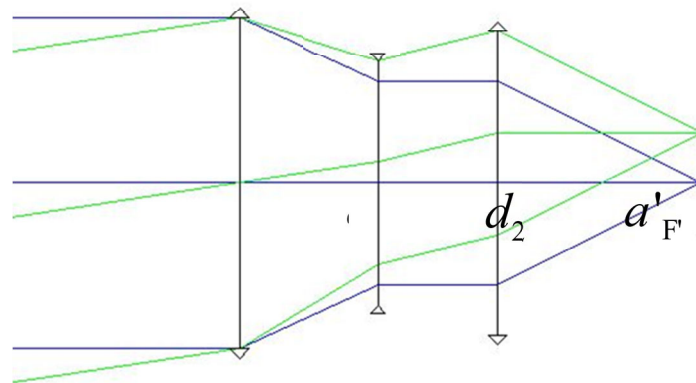


Рис. 1. Схемное решение объектива в тонких компонентах

На рис.1 использованы следующие обозначения: φ_1 , φ_2 и φ_3 – относительные оптические силы линз; d_1 , d_2 – расстояния между линзами; h_1 , h_2 , h_3 – высоты первого параксиального луча на линзах; $a'_{F'}$ – задний фокальный отрезок объектива.

Для повышения технологичности предполагалось, что положительные линзы в схеме выполнены из одного материала. Используются традиционные условия нормировки: оптическая сила объектива $\varphi = 1$; высота первого параксиального луча на первой линзе $h_1 = 1$. В [7] найдено, что для одновременного обеспечения требований ахроматизации, пассивной атермализации, телецентричности хода главных лучей в пространстве изображений в схеме должны соблюдаться следующие соотношения:

$$\varphi_2 = -\gamma\varphi_1; \quad \varphi_3 = \gamma; \quad h_2 = h_3 = \frac{1}{\gamma}; \quad d_1 = \frac{(\gamma - 1)}{\varphi_1\gamma}; \quad d_2 = \frac{(\varphi_1\gamma - \gamma + 1)}{\varphi_1\gamma^2}; \quad a'_{F'} = \frac{1}{\gamma}; \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{v_1}{v_2} - \frac{1}{\varphi_1}; \quad \alpha_K = \frac{V_2 - V_1 v_1/v_2}{v_1/v_2 - 1}, \quad (2)$$

где γ – угловое увеличение блока линз 1, 2; α_k – температурный коэффициент линейного расширения материала корпуса и промежуточных колец в объективе; ν_1, ν_2 – коэффициенты средней дисперсии материалов линз; V_1, V_2 – термооптические постоянные материалов линз.

Требование по снижению массы и себестоимости объективов тепловизионных камер ориентирует разработчиков активно применять в конструкциях алюминиевые сплавы. Поэтому в основе разработки атермализованных объективов был положен поиск комбинаций материалов, оптических сил линз, входящих в объектив, при условии, что промежуточные кольца и оправы объективов выполнены из алюминиевых сплавов.

Анализ математической модели (1), (2) показал, что среди материалов, прозрачных в ИК области спектра, можно найти пару материалов, которая может быть использована для пассивной атермализации трехлинзового объектива в корпусе из алюминиевого сплава. Характеристики таких материалов приведены в табл. 1 [6, 8].

Таблица 1

Оптические материалы для создания атермальной схемы

Материал	$N_{(10 \text{ мкм})}$	$\nu_{\text{ср}}$	$dn/dT (*10^{-6} \text{ 1/градус})$	$A (*10^{-6} \text{ 1/градус})$	$V (*10^{-6} \text{ 1/градус})$
ZnSe	2,4064	57,471	61,0	7,6	35,772
IRG26	2,7781	159,948	32,2	20,8	-2,691

В таблице использованы следующие обозначения: $n_{(10 \text{ мкм})}$ – показатель преломления для длины волны 10 мкм; $\nu_{\text{ср}}$ – коэффициент средней дисперсии материала для диапазона длин волн от 8 до 12 мкм; dn/dT – температурное приращение показателя преломления; α – коэффициент линейного расширения материала; V – термооптическая постоянная материала.

Используя найденную пару материалов – селенид цинка и халькогенидное стекло, методами компьютерного моделирования были проведены расчеты трех ИК объективов: ОБ50/1,1; ОБ20/1,1; ОБ10/1,2. Обозначения объективов построены по схеме «фокусное расстояние / диафрагменное число». Все объективы были ориентированы на применение в спектральном диапазоне от 8 до 12 мкм совместно с неохлаждаемым матричным приемником излучений формата 640x480, размер пикселя 12 мкм. При компьютерном моделировании определялось наименьшее количество асферических поверхностей, при котором коэффициент передачи контраста на частотно-контрастной характеристике (ЧКХ) на частоте Найквиста в центре поля зрения составлял не менее 0,8 от ЧКХ безаберра-

ционного объектива (критерий по Гопкинсу) во всем диапазоне температур эксплуатации.

Результаты и обсуждения

Сводная информация о характеристиках трех разработанных оптических систем ИК объективов приведена в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики разработанных ИК объективов

	ОБ50/1,1	ОБ20/1,1	ОБ10/1,2
Количество линз	3	3	4
Материал линзы 1	IRG26	IRG26	IRG26
Материал линзы 2	ZnSe	ZnSe	ZnSe
Материал линзы 3	IRG26	IRG26	IRG26
Материал линзы 4	-	-	IRG26
Количество асферических поверхностей	2	3	4
$\alpha_k, \cdot 10^{-6} \text{ градус}^{-1}$	22	22	22
$\lambda_f, \text{ нм}$	8-12	8-12	8-12
$f, \text{ мм}$	49,997	20	10,1
Количество пикселей приемника излучений (размер пикселя, мкм)	640x480(12)	640x480(12)	640x480(12)
Диафрагменное число К	1,1	1,1	1,2
Поле зрения по горизонтали и вертикали, градус	7,3x8,4	21,72x16,38	41,4x31,6
Поле зрения по диагонали кадра, градус	11,6	27,0	50,6
Задний фокальный отрезок $S'_F, \text{ мм}$	4,83	11,97	5,1
Дисторсия, %	0,02	-1,17	-1,94
ЧКХ для 20 мм^{-1}	0,66	0,61	0,67
ЧКХ для 30 мм^{-1}	0,52	0,45	0,52
ЧКХ для 40 мм^{-1}	0,38	0,32	0,38
Габаритные размеры: диаметр х длина, мм	$\varnothing 50 \times 71,1$	$\varnothing 20 \times 32,3$	$\varnothing 15 \times 20,9$
Масса оптических деталей, г	90	9	6

Из табл. 2 следует, что с уменьшением фокусного расстояния увеличивается угловое поле в пространстве предметов, количество требуемых асферических поверхностей, уменьшаются массогабаритные размеры объектива. Во всех объективах использована одна пара оптических материала – халькогенидное стекло и селенид цинка при выполнении корпусных деталей и промежуточных колец из алюминиевого сплава.

Использование указанной пары материалов в оптических системах ИК объективов, характеристики которых приведены в табл. 3, подтверждает применимость схемного решения [7] для разработки группы объективов с повышенными угловыми полями, вплоть до границы между нормальными и широкоугольными объективами.

Если в объективе ОБ50/1,1 для коррекции аберраций широких пучков лучей применены две асферических линзы, то в объективах ОБ20/1,1 и ОБ10/1,2 все линзы являются асферическими. При разработке ОБ10/1,2 потребовалось усилить фокусирующий третий компонент введением дополнительной линзы с сохранением в объективе двух марок материалов. Оптическая функция дополнительной линзы связана с необходимостью коррекции полевых аберраций в короткофокусном объективе. Варианты с биасферическими линзами не рассматривались в силу их не технологичности. В целом, отмечается, что для обеспечения высокого качества изображения в ИК объективах с пассивной атермализацией при высоких требованиях по массогабаритным параметрам и коэффициенту пропускания (и соответственно малом числе линз) требуется использования асферических поверхностей.

Таким образом, результаты разработки подтверждают эффективность использования халькогенидных материалов для разработки пассивно атермализованных малогабаритных ИК объективов и коррелируют с выводами других источников [4, 5, 9].

Аналогично тому, как в некоторых каталогах объективов, например в [10], представляется оценка возможности объективов в составе оптико-электронного канала (прибора) для решения основных зрительных задач, в табл.3 представлены диаграммы, соответствующие трем зрительным задачам в соответствии с критерием Джонсона [11] для разработанных объективов. В качестве зрительных задач выбраны: обнаружение, распознавание, идентификация объектов с вероятностью 50 % и 95 %. Диаграммы составлены для двух объектов – ростовая фигура человека и автомобиль. Очевидно, что при использовании одного и того же размера приемника излучений по мере увеличения углового поля и уменьшения фокусного расстояния объектива дальность по Джонсону будет уменьшаться. Если условия применения тепловизионных камер предполагают наблюдение за объектами, находящимися на малых расстояниях, то повышение углового поля будет способствовать возможности наблюдения в пределах большей части пространства и повышению скорости обнаружения объективов. Таким образом, необходимость при разработке тепловизионных камер поиска баланса между противоречивыми требованиями по массогабаритным характеристикам и дальностью действия предполагает возможность для разработчиков иметь для выбора некоторую серию объективов.

Таблица 3

Дальность по Джонсону для разработанных объективов

Объектив	Объект	Дальность по Джонсону												
ОБ50/1,1	Ростовая фигура человека	<table><tr><th>Этап</th><th>вероятность 95%</th><th>вероятность 50%</th></tr><tr><td>идентификация</td><td>165</td><td>329</td></tr><tr><td>распознавание</td><td>565</td><td>1129</td></tr><tr><td>обнаружение</td><td>1976</td><td>3953</td></tr></table>	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%	идентификация	165	329	распознавание	565	1129	обнаружение	1976	3953
	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%											
идентификация	165	329												
распознавание	565	1129												
обнаружение	1976	3953												
	Автомобиль	<table><tr><th>Этап</th><th>вероятность 95%</th><th>вероятность 50%</th></tr><tr><td>идентификация</td><td>416</td><td>833</td></tr><tr><td>распознавание</td><td>1427</td><td>2855</td></tr><tr><td>обнаружение</td><td>4996</td><td>9991</td></tr></table>	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%	идентификация	416	833	распознавание	1427	2855	обнаружение	4996	9991
	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%											
идентификация	416	833												
распознавание	1427	2855												
обнаружение	4996	9991												
ОБ20/1,1	Ростовая фигура человека	<table><tr><th>Этап</th><th>вероятность 95%</th><th>вероятность 50%</th></tr><tr><td>идентификация</td><td>66</td><td>132</td></tr><tr><td>распознавание</td><td>226</td><td>452</td></tr><tr><td>обнаружение</td><td>791</td><td>1581</td></tr></table>	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%	идентификация	66	132	распознавание	226	452	обнаружение	791	1581
	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%											
идентификация	66	132												
распознавание	226	452												
обнаружение	791	1581												
	Автомобиль	<table><tr><th>Этап</th><th>вероятность 95%</th><th>вероятность 50%</th></tr><tr><td>идентификация</td><td>167</td><td>333</td></tr><tr><td>распознавание</td><td>571</td><td>1142</td></tr><tr><td>обнаружение</td><td>1998</td><td>3997</td></tr></table>	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%	идентификация	167	333	распознавание	571	1142	обнаружение	1998	3997
	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%											
идентификация	167	333												
распознавание	571	1142												
обнаружение	1998	3997												
ОБ10/1,2	Ростовая фигура человека	<table><tr><th>Этап</th><th>вероятность 95%</th><th>вероятность 50%</th></tr><tr><td>идентификация</td><td>33</td><td>66</td></tr><tr><td>распознавание</td><td>113</td><td>226</td></tr><tr><td>обнаружение</td><td>395</td><td>791</td></tr></table>	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%	идентификация	33	66	распознавание	113	226	обнаружение	395	791
	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%											
идентификация	33	66												
распознавание	113	226												
обнаружение	395	791												
	Автомобиль	<table><tr><th>Этап</th><th>вероятность 95%</th><th>вероятность 50%</th></tr><tr><td>идентификация</td><td>83</td><td>167</td></tr><tr><td>распознавание</td><td>285</td><td>571</td></tr><tr><td>обнаружение</td><td>999</td><td>1998</td></tr></table>	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%	идентификация	83	167	распознавание	285	571	обнаружение	999	1998
	Этап	вероятность 95%	вероятность 50%											
идентификация	83	167												
распознавание	285	571												
обнаружение	999	1998												

Заключение

Результаты разработки группы из трех ИК объективов с пассивной атермализацией подтверждают применимость подхода, предложенного в [7], для разработки объективов с угловыми полями, вплоть до границы между нормальными и широкоугольными объективами.

Разработана группа малогабаритных пассивно атермализованных ИК объективов, ориентированных для сопряжения с приемника излучений формата 640x480, с шагом пикселя 0,012 мм. Малые массогабаритные показатели объективов наряду с высоким качеством изображения, близким к дифракционному, а также возможность его сохранения при работе в диапазоне рабочих температур эксплуатации от минус 50 °С до 50 °С позволяет включить разработанные объективы в состав элементной базы для применения в тепловизионных камерах БПЛА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков В. Г. Современные тенденции в разработках инновационных тепловизионных объективов и проблемные вопросы их промышленного производства / В. Г. Волков, А. Е. Моисеев, Ю. С. Митрофанова, Б. Н. Сенник – // Фотоника : научн. техн. журнал. – 2018. – №1. – С. 94-105.
2. Елисеева А.А., Хацевич Т.Н. Выявление тенденций в оптических характеристиках объективов для инфракрасного приборостроения по результатам исследования патентной активности на территории Российской Федерации // ПРИБОРЫ. – 2025. – №3. – С. 26–35.
3. Дружкин Е. В., Хацевич, Т. Н. Малогабаритные тепловизионные приборы // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80. – № 6. – С. 20–27.
4. Медведев А. В. Атермализация объективов прицельно-наблюдательных комплексов как средство обеспечения жизнедеятельности объектов БТВТ / А. В. Медведев, А. В. Гринкевич, С. Н. Князева – // Фотоника : научн. техн. журнал. – 2016. – №2. – С. 94-108.
5. Шишкин И. П. Атермализованные телевизионные объективы / И. П. Шишкин, А. П. Шкадаревич // Фотоника : научн. техн. журнал. – 2022. – №1. – С. 38-43.
6. Качурин А. Е. Малогабаритные термостабильные объективы / А. Е. Качурин, Т. Н. Хацевич - // ГЕО Сибирь, Магистерская сессия «Первые шаги в науке». – 2024. – 535.317 – С. 1-7.
7. Khatsevich T., Druzhkin E. Passive athermalization of optical systems for thermal devices// Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 119160J (15 December 2021); doi: 10.1117/12.2601732.
8. Хацевич Т. Н. Компьютерные методы проектирования оптических систем : учебник / Т. Н. Хацевич. – Новосибирск : СГУГиТ, 2022 – 156 с.
9. Атермальные оптические системы [Электронный ресурс] / Информационный портал Оптическое расчётное бюро : официальный сайт. – 2012. – URL: <https://orb-nsk.ru/Athermal> (дата обращения 24.04.25).
10. Ophir Catalog 2024. Thermal Imaging and Swir Lens Catalog [Электронный ресурс] / URL: www.ophiropt.com/infrared (дата обращения 24.01.2025).
11. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М. Логос, 2004. – 444 с.

© А. Е. Качурин, Т. Н. Хацевич, 2025