

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-07-89-98

УДК 520.35

## Расчет миниатюрного реверсивного телеобъектива тепловизионного диапазона

Владислав Игоревич Батшев<sup>1✉</sup>, Александр Владимирович Крюков<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>1, 2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup>batshev.vi@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

<sup>2</sup>kryukov\_av@bmstu.ru <https://orcid.org/0009-0007-1807-2386>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Методика расчета оптической системы миниатюрного тепловизионного объектива, предназначенного для использования в составе компактного мультиспектрального устройства с одномоментной регистрацией нескольких спектральных изображений на единый матричный приемник излучения. **Цель работы.** Разработка принципиальной схемы построения оптической системы миниатюрного объектива тепловизионного диапазона (8–14 мкм), а также методики ее расчета. **Метод.** Предлагаемое решение основано на комбинации композиционного метода синтеза оптических систем с алгебраическим методом, основанным на теории аббераций третьих порядков. Объектив строится по схеме реверсивного телеобъектива и состоит из базового двухлинзового склеенного компонента и коррекционного элемента в виде двух менисков, исправляющих астигматизм и кривизну поверхности изображения. **Основные результаты.** Предложены схема построения миниатюрного тепловизионного реверсивного телеобъектива и методика синтеза его оптической системы, основанная на теории аббераций третьих порядков. Проведены габаритный и абберационный расчеты, выполнена оценка качества формируемого объективом изображения. Объектив демонстрирует степень коррекции, близкую к дифракционной, при нормальной светосиле и высоком угловом поле. При этом его итоговая оптическая система не подвергалась автоматизированной коррекции. **Практическая значимость.** Предложенный объектив может использоваться для различных приложений, в частности в составе мультиспектральной тепловизионной системы, способной решать задачи по сбору пространственно-спектральных данных, что может быть полезным для дистанционного зондирования, экомониторинга и в других приложениях. Малые габариты объектива обуславливают возможность использования его в составе компактного устройства, устанавливаемого на подвижный носитель.

**Ключевые слова:** мультиспектральная камера, синтез тепловизионного объектива, длинноволновый инфракрасный диапазон, объектив длинноволнового инфракрасного диапазона

**Благодарность:** работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010).

**Ссылка для цитирования:** Батшев В.И., Крюков А.В. Расчет миниатюрного реверсивного телеобъектива тепловизионного диапазона // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 7. С. 89–98. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-89-98>

Коды OCIS: 110.4234, 110.0110, 110.6820, 120.4820

# Design of a compact long-wavelength infrared inverse telephoto lens

VLADISLAV I. BATSHEV<sup>1</sup>✉, ALEXANDER V. KRYUKOV<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1, 2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1</sup>batshev.vi@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

<sup>2</sup>kryukov\_av@bmstu.ru <https://orcid.org/0009-0007-1807-2386>

## Abstract

**Subject of study.** The design of an optical system of a compact long-wavelength infrared multispectral device lens. **The aim of study** is to design an optical system of a miniature thermal imaging lens of long-wavelength infrared range (8–14  $\mu\text{m}$ ) and its synthesis methodology. **Method.** The proposed solution is based on a combination of compositional and algebraic methods for optical systems synthesis. The lens layout corresponds to inverse telephoto lens and consists of a basic double-cemented lens component and a correction component of two meniscus lens that correct astigmatism and field curvature. **Main results.** The paper demonstrates the layout and synthesis methodology for a miniature thermal imaging inverse telephoto lens, its design and aberration synthesis. **Practical significance.** The proposed lens design can be used to create a multispectral thermal imaging system capable to collect spatial-spectral data, which can be useful for environmental monitoring and other applications. Small dimensions of the lens make it possible to use it as part of a compact device mounted on a mobile vehicle.

**Keywords:** multispectral camera, thermal imaging lens synthesis, long-wavelength infrared range, long wave infrared range lens

**Acknowledgment:** the work was carried out within the framework of the State Assignment of the STC UI RAS (project FFNS-2022-0010).

**For citation:** Batshev V.I., Kryukov A.V. Design of a compact long-wavelength infrared inverse telephoto lens [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 7. P. 89–98. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-89-98>

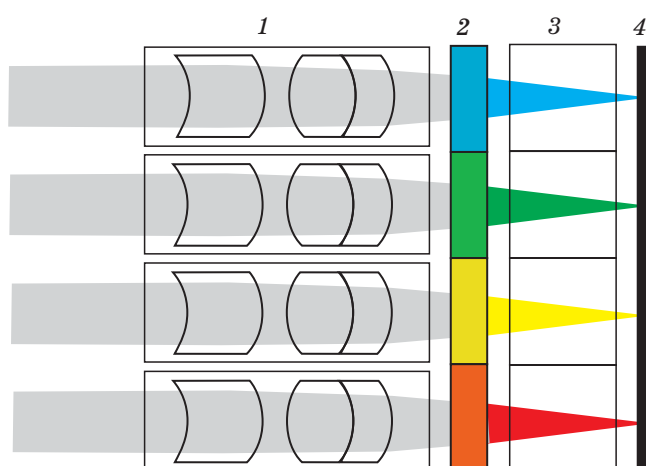
**OCIS codes:** 110.4234, 110.0110, 110.6820, 120.4820

## ВВЕДЕНИЕ

Мультиспектральные методы анализа различных объектов используются во многих отраслях народного хозяйства. Например, в медицине [1], в пищевой промышленности [2], в сельском хозяйстве [3, 4] и в других приложениях. При этом существуют несколько методов получения мультиспектральных изображений, среди которых выделим метод одномоментной регистрации [5] как наиболее перспективный для применения на подвижных носителях, в частности на беспилотных летательных аппаратах. В работе [6] приводятся возможные схемы построения устройств для одномоментной мультиспектральной съемки, среди которых наиболее компактной представляется схема мультиапертурного объектива, представленная на рис. 1. На один матричный приемник излучения проецируется ряд

изображений, сформированных несколькими идентичными миниатюрными объективами в индивидуальных оправках и прошедших через узкополосные светофильтры, пропускающие различные участки спектра. Во избежание перекрытия изображений соседних каналов в объективе используется бленда. В статье [7] представлены результаты расчета и исследования экспериментального образца изготовленной мультиспектральной камеры, работающей в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах.

В настоящей работе представлен расчет объектива для спектрального диапазона 8–14 мкм, на основе которого планируется создание аналогичной по принципу построения тепловизионной мультиспектральной камеры. Такое устройство может одновременно выполнять несколько функций: формировать



**Рис. 1.** Схема мультиапертурного объектива. 1 — объектив, 2 — узкополосный светофильтр, 3 — бленда, 4 — МПИ

**Fig. 1.** Layout of a multi-aperture lens. (1) Objective lens, (2) narrowband spectral filter, (3) blend, (4) image sensor

тепловизионные изображения объектов, строить пространственные распределения их температуры методом спектральной пирометрии, не требующим знания излучательной способности объектов [8], а также обнаруживать некоторые вещества (в частности газы, например метан) по спектральным линиям поглощения [9].

Стандартные методики расчета миниатюрных объективов применимы для видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов, но по ряду причин не вполне подходят для тепловизионного объектива. Во-первых, из-за необходимости применения светосильных систем для минимизации дифракционных явлений, которые сказываются существенно сильнее, чем в видимом диапазоне спектра. Во-вторых, в тепловизионном диапазоне применяют другие оптические материалы, меньшей номенклатуры и с другими параметрами: показатели преломления некоторых веществ в несколько раз выше, чем у оптических стекол, что делает невозможным пользоваться некоторыми упрощенными зависимостями, принятыми при абберационном расчете систем видимого диапазона (в частности, при вычислении четвертой суммы Зейделя).

В этой связи, целью работы является разработка принципиальной схемы построения миниатюрного объектива тепловизионного диапазона (8–14 мкм) и методики его расчета.

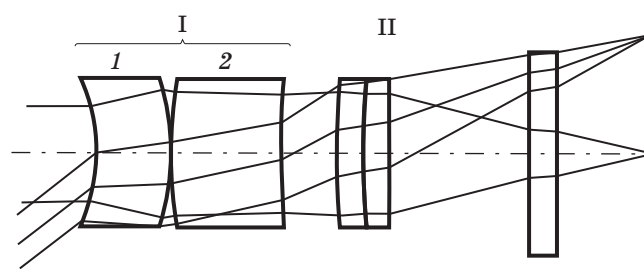
## ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Предлагаемая оптическая схема объектива приведена на рис. 2. Она состоит из двух компонентов. Компонент II является силовым, обеспечивающим основные оптические характеристики системы. Фронтальный компонент I состоит из двух менисков: первый мениск компенсирует кривизну поверхности изображения силового компонента, а второй мениск практически не влияет на оптическую силу объектива и компенсирует астигматизм. Вместе компоненты I и II образуют реверсивный телеобъектив.

Обоснование использования именно таких компонентов, а также методика расчета предложенной системы, основанная на комбинации алгебраического и композиционного методов, представлена в следующем разделе.

Расчет объектива приведен для четырехканальной мультиспектральной системы, формирующей изображения на многоэлементном приемнике излучения (МПИ) с разрешением  $1280 \times 1024$  пиксела и размером пиксела  $12 \times 12$  мкм. Для того чтобы радиус кружка Эйри не превышал удвоенного размера пиксела, относительное отверстие системы назначим равным  $D/f' = 1:2$ .

Максимальный размер участка МПИ, проходящегося на один спектральный канал, составляет  $7,7 \times 6,1$  мм<sup>2</sup> (диагональ 9,8 мм). При этом по конструктивным соображениям световые размеры линз объектива назначены не более  $D_{\max} = 5,2$  мм. С учетом некоторых зазоров между изображениями соседних



**Рис. 2.** Оптическая схема реверсивного телеобъектива с ходом лучей. Мениск 1 компенсирует кривизну поверхности изображения силового компонента, мениск 2 компенсирует астигматизм

**Fig. 2.** Inverse telephoto lens layout. (1) Meniscus compensates for the curvature of the image surface of the power component, (2) meniscus compensates for astigmatism

каналов выберем размер изображения равным  $6,6 \times 5,0$  мм (диагональ  $2y' = 8,3$  мм). Это меньше диагонали участка МПИ, но все же больше светового диаметра линз, поэтому на краю изображения при высокой светосиле системы для точки вне оси неизбежно виньетирование. По этой причине нет смысла существенно увеличивать относительное отверстие и диагональ изображения.

Фокусное расстояние системы положим  $f' = 7,5$  мм. При этом угловое поле составит примерно  $60^\circ$  (из-за дисторсии даже несколько больше), что вполне достаточно для такого класса систем.

### РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СПЕКТРАЛЬНОГО КАНАЛА

Рассмотрим синтез оптической схемы спектрального канала, реализованный на основе комбинации алгебраического метода и композиционного метода с разделением компонентов схемы на базовые и коррекционные [10, 11]. Примеры модернизации алгебраического метода для миниатюрных систем, в которых толщина линз становится коррекционным параметром, приведены в работах [12, 13].

В качестве простейшего базового компонента использован двухлинзовый склеенный объектив, построенный на основе германия и селенида цинка, прозрачных в заданной области спектра. Его оптическая схема с ходом лучей представлена на рис. 3а. Фокусное расстояние объектива 7,5 мм. Конструктивные

параметры базового объектива рассчитаны алгебраическим методом из условия минимизации сферической аберрации и хроматизма положения, остаточные значения которых составляют  $\Delta s' = -0,24$  мм (при длине волны излучения  $\lambda_0 = 10$  мкм) и  $\Delta s'_{\lambda_1 \lambda_2} = -0,037$  мм (при  $\lambda_1 = 8$  мкм,  $\lambda_2 = 14$  мкм) соответственно. Это позволяет обеспечить кружок рассеяния для точки на оси, не выходящий за пределы кружка Эйри, диаметр которого при относительном отверстии 1:2 составляет  $\delta' = 50$  мкм.

При заданном фокусном расстоянии и размере изображения угловое поле составляет  $60^\circ$ , что приводит к неудовлетворительной коррекции аберраций наклонных пучков лучей и, прежде всего, к значительной кривизне поверхности изображения  $z'_c = -1,8$  мм и астигматизму  $\Delta z'_a = 1,4$  мм на краю поля (при суммах Зейделя в классической нормировке  $S_{III} = 0,978$ ,  $S_{IV} = 0,252$ ). Для их компенсации требуется введение в оптическую схему коррекционного элемента. Вид астигматических кривых представлен на рис. 3б.

Одним из возможных вариантов такого элемента является линза Смита – отрицательная по оптической силе линза, размещенная вблизи поверхности изображения. По классификации профессора Русинова линза может быть образована близфокальной и плоской поверхностями [11]. Однако реализация данного решения в схеме спектрального канала затруднительна из-за наличия вблизи плоскости изображения раstra из светофильтров,

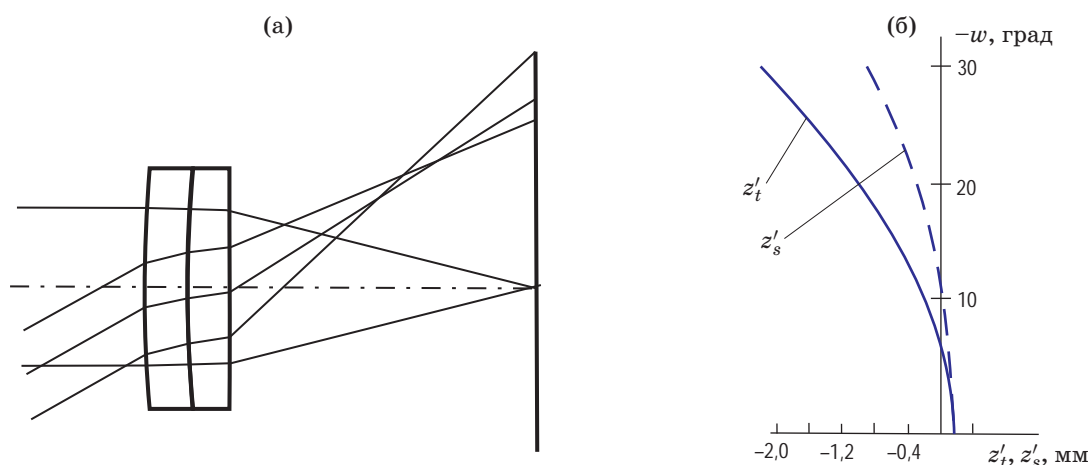


Рис. 3. Базовый компонент. Компоновка оптической схемы с ходом лучей (а) и астигматические кривые (б)  
 Fig. 3. Basic component. (a) Layout, (b) tangential and sagittal curvature

представляющего собой отдельный конструктивный блок.

Второй вариант решения – размещение отрицательного коррекционного компонента левее базового – превращает оптическую схему канала в реверсивный телеобъектив, задний фокальный отрезок  $s'_F$  которого превышает фокусное расстояние. Коэффициент реверсивного телеобъектива может быть найден как  $k_t = s'_F/f'$ . Такая компоновка схемы имеет несколько преимуществ. Увеличение заднего фокального отрезка повышает удобство размещения блока светофильтров и способствует уменьшению угла с оптической осью главного луча, идущего в край изображения, делая его ход ближе к телецентрическому.

Для расчета оптической силы  $\varphi_I$  коррекционного компонента можно воспользоваться известной формулой для схемы реверсивного телеобъектива [14, 15]

$$\varphi_{II} = (1 - \varphi_I)/k_t, \quad (1)$$

где  $\varphi_I$  и  $\varphi_{II}$  — приведенные оптические силы первого и второго компонентов, рассчитанные при выполнении условия масштаба

$$\varphi_I + \varphi_{II} - d\varphi_I\varphi_{II} = 1, \quad (2)$$

где  $d$  — приведенное расстояние между задней главной плоскостью первого и передней главной плоскостью второго компонентов.

С учетом формул (1) и (2) габаритный расчет схемы может быть проведен с использованием следующих соотношений:

$$\varphi_{II} = f'/f''_{II}, \quad (3)$$

$$\varphi_I = 1 - k_t\varphi_{II}, \quad (4)$$

$$d = (1 - k_t)/\varphi_I, \quad (5)$$

$$f'_I = f'/\varphi_I, \quad (6)$$

где  $f'$ ,  $f''_I$ ,  $f''_{II}$  — фокусные расстояния реверсивного телеобъектива, его первого и второго компонентов соответственно.

С целью сохранить фокусное расстояние исходной схемы примем  $f''_{II} = 7,50$  мм,  $f' = 7,20$  мм, тогда с учетом формул (3)–(6) значения составят  $\varphi_{II} = 0,96$ ,  $\varphi_I = -0,296$ ,  $d = 1,182$  (или 8,51) мм,  $f'_I = -24,32$  мм.

Перейдем к синтезу коррекционного элемента, компенсирующего кривизну поверхности изображения, вносимую базовым компонентом.

Для оптической системы, состоящей из бесконечно тонких компонентов, справедливо соотношение [14]

$$S_{IV} = \sum \pi_i \varphi_i, \quad (7)$$

где  $S_{IV}$  — четвертая сумма Зейделя,  $\pi_i$  и  $\varphi_i$  — абберационный параметр и оптическая сила  $i$ -го компонента.

Проведем оценку корректности представления компонентов бесконечно тонкими для рассматриваемого случая проектирования. Оптическая сила коррекционного компонента I в виде одиночной линзы, расположенной в воздухе, может быть рассчитана как

$$\varphi_I = (n_I - 1)(1/r_1 - 1/r_2) + d_I(n_I - 1)^2/(n_I r_1 r_2), \quad (8)$$

где  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $d_I$  и  $n_I$  — конструктивные параметры линзы.

Формула (7) справедлива, если второе слагаемое в формуле (8) равно нулю или существенно меньше первого слагаемого. Таким образом, корректность использования формулы (7) нарушается в случаях, если

- линза представляет собой мениск, т.е.  $r_1 \approx r_2$ ,
- осевая толщина линзы значительна  $d_I > 0,1f'$ ,
- показатель преломления  $n_I$  линзы имеет большое значение.

Отметим, что второе слагаемое в формуле (8) для линз с одинаковыми конструктивными параметрами, выполненных из стекла К8 и германия, будет различаться в 13,5 раз.

Таким образом, при синтезе параметров коррекционного компонента целесообразно использовать формулу для расчета четвертой суммы Зейделя, учитывающую вклад каждой поверхности оптической системы [10],

$$S_{IV} = -\sum 1/r_i(1/n'_i - 1/n_i), \quad (9)$$

где  $r_i$  — радиус кривизны  $i$ -ой поверхности,  $n_i$  и  $n'_i$  — показатели преломления сред до и после  $i$ -ой поверхности.

В случае коррекционного компонента в виде одиночной линзы, расположенной в воздухе, формула (9) примет вид

$$S_{IV,(I)} = (n_I - 1)(1/r_1 - 1/r_2)/n_I. \quad (10)$$

Решение системы уравнений (8) и (10) приводит к квадратному уравнению относительно радиуса  $r_1$  коррекционного компонента вида

$$n_I(\varphi_I - n_I S_{IV,(I)})r_1^2 + d_I n_I (n_I - 1) S_{IV,(I)} r_1 - d_I (n_I - 1)^2 = 0, \quad (11)$$

где  $S_{IV,(I)}$  — численное значение четвертой суммы синтезируемой линзы для компенсации вклада  $S_{IV,(II)}$ , вносимого базовым компонентом, т.е.  $S_{IV,(I)} = -S_{IV,(II)}$ .

Радиус  $r_2$  коррекционного компонента может быть найден как

$$r_2 = d_I (n_I - 1)^2 / r_1 n_I (\varphi_I - n_I S_{IV,(I)}). \quad (12)$$

Необходимо отметить, что значение четвертой суммы  $S_{IV,k}$  должно быть задано в условиях классической нормировки вспомогательных лучей. Представлению сумм Зейделя в различных программах расчета оптических систем, таких как ZEMAX, OPAL и OSLO, и переходе от одной нормировки к другой посвящена работа [16].

В случае  $d_I = 0,361$  (приведенное значение, соответствующее реальной толщине 2,6 мм)  $n_I = 4,00438$  (германий),  $S_{IV,(I)} = -S_{IV,(II)} = -0,252$  и рассчитанной ранее  $\varphi_I = -0,296$  решение уравнения (11) с учетом формулы (12) позволяет синтезировать два варианта линзы. Она представляет собой мениск с радиусами  $r_1 = 9,186$  мм,  $r_2 = 6,427$  мм или его зеркальное отображение с  $r_1 = -6,427$  мм,  $r_2 = -9,186$  мм. Второй вариант решения является предпочтительным с точки зрения минимизации продольной длины схемы, так как задняя главная плоскость такого мениска расположена на расстоянии  $s'_{H'(I)} = -7,38$  мм от второй поверхности, что при рассчитанном ранее расстоянии между главными плоскостями компонентов 8,51 мм позволяет расположить мениск достаточно близко к базовому компоненту (рис. 4а).

Введение коррекционного компонента позволило увеличить задний фокальный отрезок и уменьшить значение средней кривизны до  $z'_c = -1,0$  мм, астигматизма до  $\Delta z'_a = 1,1$  мм на краю поля. Сферическая aberrация и хроматизм положения при этом несколько выросли и составили соответственно  $\Delta s' = -0,25$  мм и  $\Delta s'_{1\lambda 2} = -0,057$  мм. Суммы Зейделя в классической нормировке  $S_I = 1,435$ ,  $S_{II} = -0,430$ ,  $S_{III} = 0,512$ ,  $S_{IV} = 0,009$ . Вид астигматических кривых приведен на рис. 4б. Очевидно, что дальнейшая работа должна быть направ-

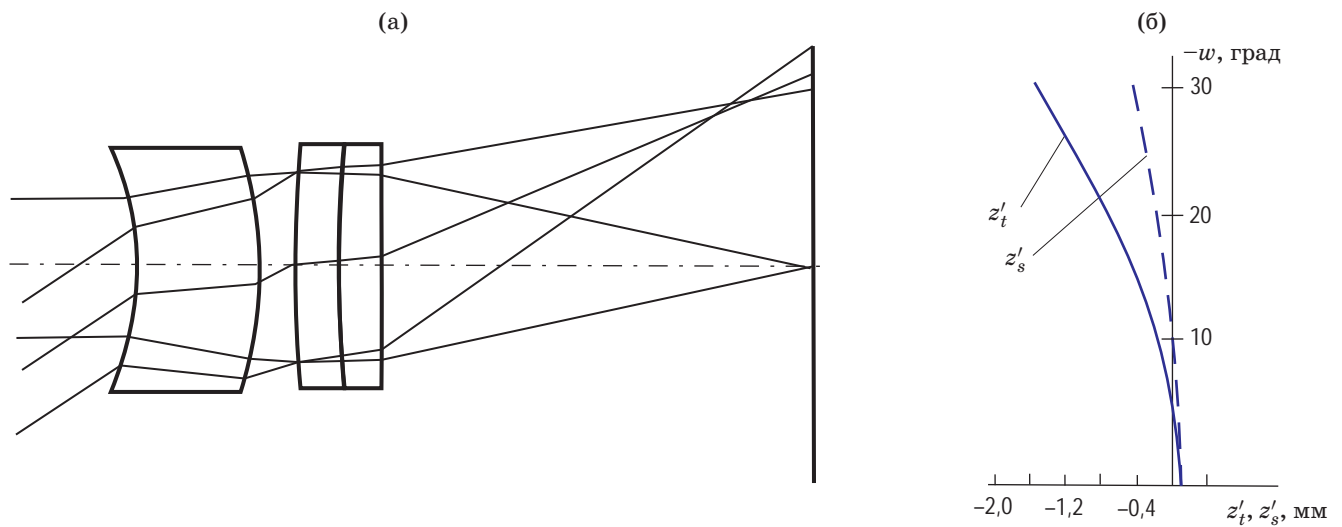
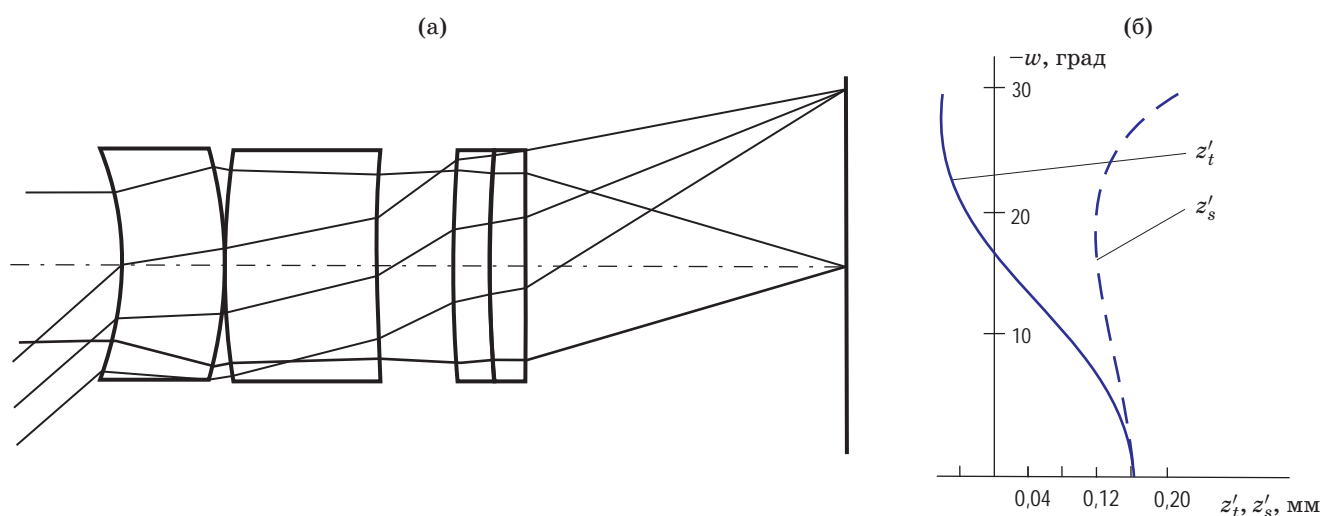


Рис. 4. Базовый и коррекционный компоненты. Компоновка оптической схемы с ходом лучей (а) и астигматические кривые (б)

Fig. 4. Basic and correction components. (a) Layout, (b) tangential and sagittal curvature



**Рис. 5.** Базовый и модернизированный коррекционный компоненты. Компоновка оптической схемы с ходом лучей (а) и астигматические кривые (б)

**Fig. 5.** Basic and modified correction components. (a) Layout, (б) tangential and sagittal curvature

лена на уменьшение третьей суммы Зейделя, также влияющей на вид астигматических кривых.

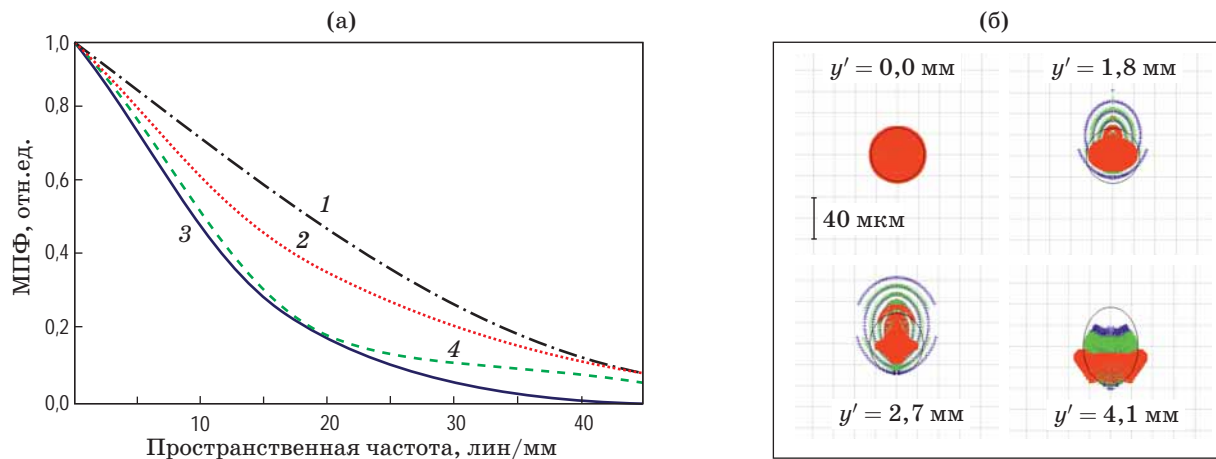
Для решения данной задачи корректирующий компонент I был дополнен линзой из селенида цинка в виде мениска с одинаковыми радиусами кривизны  $r_3 = r_4 = 17$  мм и толщиной  $d_{1-2} = d_3 = 1$  мм. При таких конструктивных параметрах фокусное расстояние линзы на длине волны  $\lambda_0 = 10$  мкм составляет  $f'_{1-2} = 351,6$  мм, т.е. она практически не влияет на оптическую силу всей системы. Более того, как видно из формул (9) и (10), линза с одинаковыми значениями радиусов не вносит изменений в четвертую сумму системы.

Изменение толщины такой линзы будет мало влиять на высоту первого вспомогательного луча, но будет менять значения высоты второго вспомогательного луча. Таким образом, толщина  $d_3$  является параметром для изменения комы, астигматизма и дисторсии. Рассчитано, что оптимальной является толщина 4,5 мм, при которой значения средней кривизны и астигматизма уменьшены до  $z'_c = 0,1$  мм и  $\Delta z'_a = 0,3$  мм на краю поля соответственно. Сферическая аберрация и хроматизм положения при этом несколько выросли и составили соответственно  $\Delta s' = -0,30$  мм и  $\Delta s'_{\lambda_1 \lambda_2} = -0,086$  мм. Суммы Зейделя в классической нормировке  $S_I = 1,369$ ,  $S_{II} = -0,109$ ,

$S_{III} = 0,161$ ,  $S_{IV} = 0,011$ . Компоновка оптической схемы с ходом лучей и вид астигматических кривых представлены на рис. 5.

Окончательный вариант оптической схемы тепловизионного объектива с моделированием светофильтра в виде плоскопараллельной пластины представлен на рис. 2.

Альтернативный путь получения оптической схемы тепловизионного объектива с помощью оптимизации системы в одной из коммерческих программ расчета сопряжен с трудностью выбора исходной оптической схемы с минимальным для удовлетворения требованиям технического задания количеством компонентов. Предложенная методика расчета позволяет получить окончательное решение даже без использования методов автоматизированной коррекции и управлять результатами каждого шага синтеза. Однако оптимизацию целесообразно использовать на некоторых промежуточных стадиях для упрощения и ускорения расчета, например, для определения толщины мениска, корректирующего астигматизм. Оптимизация рассчитанной описанным методом системы реверсивного телеобъектива может быть применена, например, для повышения относительного отверстия или уменьшения длины системы.



**Рис. 6.** Оценка качества изображения тепловизионного объектива. Модуляционная передаточная функция (а), где кривая 1 соответствует дифракционно-ограниченной оптической системе, кривая 2 характеризует качество в центре поля ( $y' = 0$  мм), кривые 3 и 4 — на крае поля ( $y' = 4,3$  мм) при меридиональной и сагиттальной ориентациях тест-объекта. Кривые в зоне поля близки к кривой 2 и на рисунке не показаны. Вид пятен рассеяния (б), черными контурами обозначены кружки Эйри

**Fig. 6.** Thermal imaging lens image quality evaluation. (a) Modulation transfer function, where graph (1) corresponds to a diffraction limited optical system, graph (2) shows the image quality at the center of the image ( $y' = 0$  mm), graphs (3) and (4) are sagittal and tangential components of the modulation transfer function at the maximum field ( $y' = 4.3$  mm). The graphs for the field zone are close to graph (2) and are not shown. (b) Spot diagrams, the black line indicates Airy disc

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 6 представлены данные для оценки качества изображения миниатюрного тепловизионного объектива, построенного по схеме реверсивного телеобъектива: графики полихроматической модуляционной передаточной функции (МПФ) и вид пятен рассеяния. Моделирование проведено в спектральном диапазоне от 8 до 14 мкм.

Критическая пространственная частота, частота Найквиста, для используемого приемника излучения с размером пиксела 12 мкм составляет  $42 \text{ мм}^{-1}$ .

Видно, что коэффициент передачи контраста для дифракционно-ограниченной оптической системы на критической частоте составляет 0,1, качество изображения в центре и зоне поля близко к дифракционному с умеренным снижением на крае поля.

Размер дифракционного кружка, контур которого приведен на рис. 6б в виде окружности или эллипса, составляет 50 мкм. Среднеквадратические размеры пятна рассеяния в любой точке изображения не превышают размеров дифракционного кружка. Таким

образом, учитывая, что размер изображения  $6,6 \times 5,0$  мм, пространственное разрешение изображения составляет приблизительно  $130 \times 100$  элементов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы предложена схема компоновки и методика расчета оптической системы миниатюрного тепловизионного объектива. По этой методике рассчитана система объектива, предназначенного для использования в мультиспектральной камере с одномоментной регистрацией четырех спектральных изображений в спектральном диапазоне 8–14 мкм. Угловое поле камеры составляет  $60^\circ$ , а пространственное разрешение каждого изображения —  $130 \times 100$  элементов.

Такая мультиспектральная система может найти применение для дистанционного зондирования, экомониторинга и других приложений, а благодаря своей компактности, отсутствию сканирования и малому времени регистрации спектральных изображений может применяться на подвижных носителях.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Johnson W.R., Wilson D.W., Fink W., et al. Snapshot hyperspectral imaging in ophthalmology // *J. Biomed. Opt.* 2007. V. 12. № 1. P. 014036. <http://dx.doi.org/10.1117/1.2434950>
2. Qin J., Chao K., Kim M.S., Lu R., Burks T.F. Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality // *J. Food Eng.* 2013. V. 118. № 2. P. 157–171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.001>
3. Laamrani A., Berg A.A., Voroney P., et al. Ensemble identification of spectral bands related to soil organic carbon levels over an agricultural field in Southern Ontario, Canada // *Remote Sens.* 2019. V. 11. № 11. P. 1298. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11111298>
4. Schucknecht A., Reinermann S., Kiese R. Estimating aboveground biomass and nitrogen concentration in grasslands with multispectral and hyperspectral satellite data // *Optica Sensing Congress 2023 (AIS, FTS, HISE, Sensors, ES)*. Munich, Germany. 30 July – 03 August, 2023. P. HM1C.2.
5. Hagen N.A., Kudenov M.W. Review of snapshot spectral imaging technologies // *Opt. Eng.* 2013. V. 52. № 9. P. 090901. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.9.090901>
6. Батшев В.И., Крюков А.В., Новиков Д.А. Варианты построения мультиапертурного объектива для формирования нескольких спектральных изображений // Тез. докл. XVI междунар. науч.-техн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации (ARMIMP-2023)». Суздаль, Россия. 09–12 октября 2023. С. 239–243. <http://doi.org/10.25210/armimp-2023-TNIJBO>
7. Батшев В.И., Крюков А.В., Мачихин А.С. и др. Оптическая система мульти-спектральной видеокамеры // *Оптический журнал*. 2023. Т. 90. № 11. С. 113–123. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-113-123>
8. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия (обзор) // *Приборы и техника эксперимента*. 2009. № 4. С. 5–28.
9. Gålfalk M., Olofsson G., Crill P., et al. Making methane visible // *Nat. Clim. Chang.* 2016. V. 6. № 4. P. 426–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2877>
10. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем: уч. пособ. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
11. Русинов М.М. Композиция оптических систем: уч. пособ. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
12. Ровенская Т.С., Крюков А.В. Методика расчета оптических схем широко-угольных реверсивных телеобъективов несимметричной конструкции // *Вестник МГТУ: Приборостроение*. 2000. Т. 40. № 3. С. 109–116.
13. Батшев В.И., Крюков А.В. Расчет миниатюрных оптических систем несимметричного типа // Тез. докл. X междунар. науч.-техн. конф. «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации (ARMIMP-2017)». Суздаль, Россия. 01–04 октября 2017. С. 195–197.
14. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем: уч. пособ., 4-е изд. СПб.: Лань, 2022. 448 с.
15. Запрыгаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем: уч. пособ. М.: Логос, 2000. 584 с.
16. Сущков А.Л. О нормировках начальных параметров первого и второго вспомогательных лучей при расчете коэффициентов aberrаций Зейделя в программах OPAL, OSLO, Zemax // *Контенант*. 2018. Т. 17. № 3. С. 123–128.

## REFERENCES

1. Johnson W.R., Wilson D.W., Fink W., et al. Snapshot hyperspectral imaging in ophthalmology // *J. Biomed. Opt.* 2007. V. 12. № 1. P. 014036. <http://dx.doi.org/10.1117/1.2434950>
2. Qin J., Chao K., Kim M.S., Lu R., Burks T.F. Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality // *J. Food Eng.* 2013. V. 118. № 2. P. 157–171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.001>
3. Laamrani A., Berg A.A., Voroney P., et al. Ensemble identification of spectral bands related to soil organic carbon levels over an agricultural field in Southern Ontario, Canada // *Remote Sens.* 2019. V. 11. № 11. P. 1298. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11111298>
4. Schucknecht A., Reinermann S., Kiese R. Estimating aboveground biomass and nitrogen concentration in grasslands with multispectral and hyperspectral satellite data // *Optica Sensing Congress 2023 (AIS, FTS, HISE, Sensors, ES)*. Munich, Germany. 30 July – 03 August, 2023. P. HM1C.2.
5. Hagen N.A., Kudenov M.W. Review of snapshot spectral imaging technologies // *Opt. Eng.* 2013. V. 52. № 9. P. 090901. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.9.090901>
6. Batshev V.I., Krioukov A.V., Novikov D.A. Options for constructing a multi-aperture lens for forming multiple spectral images [in Russian] // XVI Internat. Conf. "Acoustooptic and radar methods for information measurements and processing (ARMIMP-2023)". Suzdal, Russia. October 09–12 P. 239–243. <https://doi.org/10.25210/armimp-2023-TNIJBO>
7. Batshev V.I., Krioukov A.V., Machikhin A.S., et al. Multispectral video camera optical system // *J. Opt. Technol.* 2023. V. 90. № 11. <http://doi.org/10.1364/JOT.90.000000>
8. Magunov A.N. Spectral pyrometry (review) // *Instruments and Experimental Techniques*. 2009. V. 52. № 4. P. 451–472.
9. Gålfalk M., Olofsson G., Crill P., et al. Making methane visible // *Nat. Clim. Chang.* 2016. V. 6. № 4. P. 426–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2877>
10. Slusarev G.G. Methods for calculating optical systems: Tutorial [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1969. 672 p.
11. Rusinov M.M. Optical systems composition: Tutorial [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1989. 383 p.
12. Rovenskaya T.S., Krioukov A.V. Method of calculation of optical schemes of wide-angle reversible telephoto lenses of asymmetric design [in Russian] // *Vestnik BMSTU*. 2000. V. 3. № 40. P. 109.
13. Batshev V.I., Krioukov A.V. Calculation of miniature optical systems of asymmetrical type // X Internat. Conf. "Acoustooptic and radar methods for information measurements and processing (ARMIMP-2017)". Suzdal, Russia. October 01–04, 2017. P. 195–197.
14. Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. Theory of optical systems: Tutorial [in Russian]. St. Petersburg: "Lan" Publ., 2002. 448 p.
15. Zaprygayeva L.A., Sveshnikova I.S. Calculation and design of optical systems: Tutorial [in Russian]. Moscow: "Logos" Publ., 2000. 584 p.
16. Sushkov A.L. On normalization of the initial parameters of the first and second auxiliary rays when calculating the Seidel aberration coefficients in the OPAL, OSLO, Zemax [in Russian] // *Contentant*. 2018. V. 17. № 3. P. 123–128.

**АВТОРЫ**

**Владислав Игоревич Батшев** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; [batshev.vi@ntcup.ru](mailto:batshev.vi@ntcup.ru)

**Александр Владимирович Крюков** — кандидат технических наук, научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 57213686784; <https://orcid.org/0009-0007-1807-2386>; [kryukov\\_av@bmstu.ru](mailto:kryukov_av@bmstu.ru)

*Статья поступила в редакцию 16.01.2024  
Одобрена после рецензирования 19.03.2024  
Принята к печати 30.05.2024*

**AUTHORS**

**Vladislav I. Batshev** — PhD (Engineering), Senior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; [batshev.vi@ntcup.ru](mailto:batshev.vi@ntcup.ru)

**Alexander V. Kryukov** — PhD (Engineering), Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 57213686784; <https://orcid.org/0009-0007-1807-2386>; [kryukov\\_av@bmstu.ru](mailto:kryukov_av@bmstu.ru)

*The article was submitted to the editorial office 16.01.2024  
Approved after review 19.03.2024  
Accepted for publication 30.05.2024*