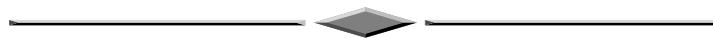


ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621.384.3:681.7.067.2

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-178-186

Разработка двухдиапазонных инфракрасных объективов с дискретной сменой фокусного расстояния

Е. В. Шмелев^{1,2✉}, Т. Н. Хацевич^{1,2}

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

² ООО «Оптическое Расчетное Бюро», г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: shmelev@luggar.biz

Аннотация. Разработка объективов с конкурентными характеристиками представляется актуальной задачей для расширения номенклатуры отечественной элементной базы оптико-электронных приборов и комплексов. Развитие технологий микроэлектроники в производстве двухдиапазонных инфракрасных приемников излучений требует создания новой группы инфракрасных двухдиапазонных объективов. Основная проблема статьи связана с необходимостью разработки таких объективов. Целью статьи является представить результаты моделирования хроматизма положения в двухдиапазонном объективе с дискретной сменой фокусного расстояния, используя методы геометрической оптики, теории хроматизма и компьютерного проектирования оптических систем. Предлагается схемное решение двухдиапазонного MWIR/LWIR объектива с дискретной сменой фокусного расстояния, для которого создана математическая модель, описывающая хроматизм положения объектива в каждом положении подвижного компонента схемы и для двух диапазонов спектра. На основе анализа математической модели найдены решения, содержащие наборы материалов, оптические силы входящих в стартовую систему линз и расстояния между компонентами. Методами численного компьютерного моделирования показано, что найденные решения могут служить стартовыми системами для разработки двухдиапазонных объективов, обеспечивающих стабильное положение плоскости изображений в диапазонах 3–5 и 8–12 мкм и двухступенчатую смену фокусного расстояния, ориентированных на сопряжение с неохлаждаемыми двухдиапазонными приемниками излучений. Результаты иллюстрируются расчетом двухдиапазонного объектива с фокусным расстоянием 100/40 мм и относительным отверстием 1 : 1,2.

Ключевые слова: инфракрасный, дискретная смена фокусного расстояния, DWIR

Для цитирования:

Шмелев Е. В., Хацевич Т. Н. Разработка двухдиапазонных инфракрасных объективов с дискретной сменой фокусного расстояния // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 6. – С. 178–186. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-178-186

Введение

Наблюдение атмосферных явлений и объектов, находящихся в атмосфере на больших дальностях, ограничивается контрастной чувствительностью зрительного анализатора человека в видимом диапазоне спектра. Значения контраста между объектом и фоном или между отдельными элементами наблюдаемой картины, обусловленные поглощающей, отражающей и излучательной способностями объектов и фонов, являющимися функциями длины волны, изменяются в зависимости от спектрального диапазона, в котором регистрируется изображение. Контраст, определяемый как отношение разности яркостей объекта и фона к их сумме, в зависимости от характера наблюдаемой сцены в инфракрасном диапазоне, может оказаться выше, чем в видимом диапазоне спектра. В этом случае регистрация инфракрасных изображений объектов в атмосфере или атмосферных явлений с помощью тепловизионных оптико-электронных приборов и комплексов позволяет повысить объем информации, получаемой об объектах исследования. В приборном аспекте наиболее освоены два участка инфракрасного диапазона спектра, часто обозначаемые как MWIR (3–5 мкм) и LWIR (8–12 мкм). Различными производителями создано большое количество тепловизионных приборов, отличающихся оптическими системами, приемниками излучений, модулями электронной обработки изображений и представления информации для визуального наблюдения, а также другими характеристиками и конструктивным исполнением – от носимых малогабаритных приборов до стационарных оптико-электронных комплексов [1, 2]. К одному из основных трендов развития тепловизионной аппаратуры в настоящее время относится создание двухспектральных тепловизионных приборов, работающих одновременно в MWIR и LWIR диапазонах спектра с использованием одного двухдиапазонного приемника излучений (для обозначения таких приемников и систем используются аббревиатуры MWIR/LWIR или DWIR). В [3] отмечается, что «высокая информативность и достигаемая при этом компактность приборов – дви-

жущие силы развития этого направления». Согласно прогнозам, содержащимся в статье [3], в следующем десятилетии DWIR приемники излучений станут коммерчески доступными изделиями инфракрасной фотоники.

К числу прикладных вопросов применения оптических систем для выпуска тепловизионной аппаратуры с использованием DWIR приемников излучений относится разработка двухдиапазонных инфракрасных объективов как с фиксированным фокусным расстоянием, так и с дискретной и (или) непрерывной сменой фокусного расстояния.

В [4] описана оптическая система с трехступенчатой сменой фокусного расстояния: 50, 100 и 150 мм с относительным отверстием 1 : 3, сопрягаемая с охлаждаемым приемником MWIR/LWIR. Система содержит 12 линз, включая спеченные элементы, при этом число материалов, из которых выполнены линзы системы, равно семи, включая шесть марок халькогенидных стекол и сульфид цинка, число асферических поверхностей – пять. Инфракрасная двухдиапазонная оптическая система [5], как и предыдущая, содержит только традиционные оптические поверхности – сферические и асферические, имеет относительное отверстие 1 : 3 и обеспечивает панкратическую смену фокусного расстояния с перепадом 3,4 крата (38–130 мм). В оптическую систему входят восемь линз из трех традиционно используемых в инфракрасной оптике материалов Ge, ZnSe и BaF₂. В системе предусмотрена афокальная зеркальная насадка, при введении которой в ход лучей предусмотрено двухкратное уменьшение относительного отверстия (диаметра холодной диафрагмы) приемника излучений. Результаты разработанных оптических систем, описанных в [4, 5], демонстрируют, что задача создания объективов для DWIR приемников излучений при относительных отверстиях 1 : 3 и менее может быть решена с использованием традиционных поверхностей в оптических системах, при этом в указанных источниках не приводятся обоснования оптимальности выбора используемых материалов.

При расчете оптических систем DWIR объективов важным вопросом является степень коррекции хроматизма положения, оп-

ределяющего смещение плоскости изображения при смене рабочего спектрального диапазоне. В [6] ограниченная дифракцией область смещений плоскости изображений определяется как $4\lambda K^2$, где K – диафрагменное число системы. В [7] предлагается допустимое значение хроматизма положения ограничивать дифракционным пределом $2\lambda K^2$, соответствующим волновой аберрации менее $\lambda/4$.

При повышении относительного отверстия требования к продольному хроматизму увеличиваются, и в светосильные инфракрасные двухдиапазонные объективы часто включают дифракционные оптические элементы (ДОЭ). В [8] описана оптическая система панкратического DWIR объектива с относительным отверстием 1 : 1,7, сопрягаемого с неохлаждаемым приемником излучений. В оптической системе применено два подвижных компонента, семь асферических поверхностей, пять материалов, MLDOE (multi-layer diffraction order element) компонент, служащий для обеспечения дифракционного качества изображений. Математическая модель статьи ключевым образом нацелена на выбор материалов подложек при формировании MLDOE.

Гипотеза, развиваемая в данной статье, заключается в том, что разработка DWIR объектива, базирующаяся на стартовой системе, созданной с использованием оптических материалов, прозрачных в диапазоне спектральной чувствительности MWIR/LWIR приемников излучений, в которой обеспечен хроматизм меньше дифракционно-ограниченного без использования ДОЭ, может быть эффективной как по времени, затрачиваемом на ее разработку, так и по результирующему качеству изображения. Поиск таких стартовых систем и математическое моделирование хроматизма положения в них и является целью статьи.

Методы и материалы

В [9] предложена стартовая система, проведено математическое моделирование и обоснование выбора исходных материалов для задачи расчета двухдиапазонного

инфракрасного объектива с фиксированным фокусным расстоянием. Настоящее исследование является продолжением ранее начатого и касается разработки оптических систем, не только обеспечивающих качественное изображение в каждом из MWIR и LWIR диапазонов спектра без смещения плоскости изображений, но и с возможностью двухступенчатой смены фокусного расстояния в каждом из диапазонов.

Реализация двухступенчатой дискретной смены увеличения в оптической системе объектива с минимальным фокусным расстоянием f'_{\min} и максимальным фокусным расстоянием f'_{\max} возможна с помощью одного подвижного компонента, имеющего два фиксированных положения вдоль оптической оси.

В основу предлагаемого авторами схемного решения положена афокальная оптическая система с дискретной сменой увеличения, равной z крат, реализуемая за счет внутреннего подвижного компонента. Такая система состоит из двух одинаковых неподвижных положительных компонентов и одного отрицательного компонента, перемещающегося между положительными. Для получения углового увеличения, равного γ в одном положении подвижного компонента и γ^{-1} в другом положении подвижного компонента, необходимо, чтобы оптические силы положительных компонентов были одинаковыми. При указанных выше условиях оптические силы положительных и отрицательного компонентов могут быть представлены выражением:

$$\varphi_1 = \frac{1 - \Gamma}{d_2 - \Gamma \cdot d_1}, \varphi_2 = \frac{\Gamma^2 - 1}{\Gamma(d_2 - d_1)}, \quad (1)$$

где $\Gamma = \sqrt{z}$.

Добавление к афокальной системе фокусирующего компонента позволяет получить оптическую систему объектива, реализующего дискретную двухступенчатую смену фокусного расстояния с фиксированным задним фокальным отрезком и постоянным относительным отверстием для каждого из фокусных расстояний. Схемное решение в тонких компонентах представлено на рис. 1.

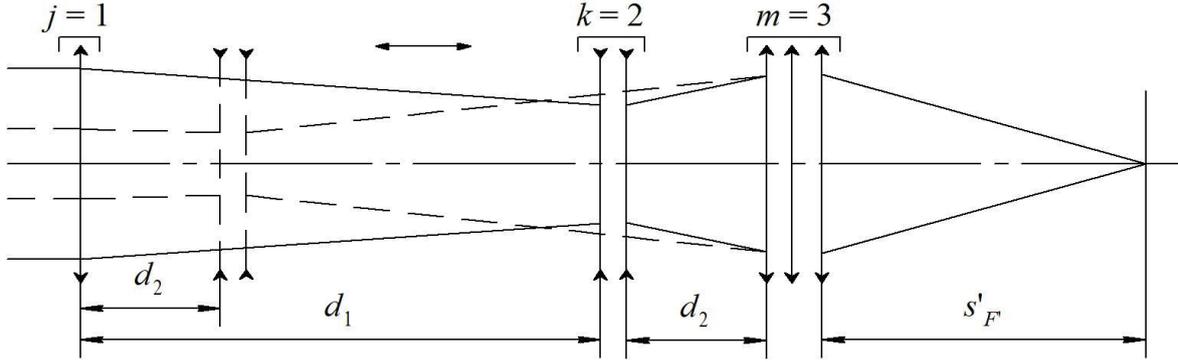


Рис 1. Принципиальная схема оптической системы

Принимая расстояние между последним компонентом афокальной системы и фокусирующим компонентом как бесконечно малое, можно считать их единым компонентом (далее названным «третий»). Оптическая сила третьего компонента определяется выражением:

$$\varphi_3 = \frac{1}{\sqrt{f'_{\min} \cdot f'_{\max}}} - \frac{\Gamma - 1}{d_2 - \Gamma \cdot d_1}. \quad (2)$$

Оптические силы компонентов φ_1 , φ_2 , φ_3 являются суммами соответствующих оптических сил линз в этих компонентах. При этом задний фокальный отрезок системы $s'_{F'}$ не зависит от выбранных толщин d_1 , d_2 между компонентами, а определяется только значениями меньшего и большего

фокусных расстояний объектива и выражением:

$$s'_{F'} = \sqrt{f'_{\min} \cdot f'_{\max}}. \quad (3)$$

Поскольку целью исследования является разработка математической модели и практического решения объектива для широкого спектрального диапазона, необходимо рассматривать систему с точки зрения выбора материалов для каждой линзы компонента. Первый, второй и третий компоненты математической модели могут состоять из j , k , m линз соответственно. Тогда при условиях нормировки $\alpha_1 = 0$, $h_1 = 1$, $f' = 1$ при большем фокусном расстоянии, оптическая сила системы в двух положениях подвижного компонента определится выражениями:

$$\begin{aligned} \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - d_1\varphi_1\varphi_2 - (d_1 + d_2)\varphi_1\varphi_3 - d_2\varphi_2\varphi_3 (1 - \varphi_1d_1) &= 1; \\ \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - d_2\varphi_1\varphi_2 - (d_1 + d_2)\varphi_1\varphi_3 - d_1\varphi_2\varphi_3 (1 - \varphi_1d_2) &= z. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражения для вычисления хроматизма положения в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$ могут быть получены на основе теории aberrаций третьих порядков для каждого компонента системы при условии, что линзы в компоненте

бесконечно тонкие и расположены вплотную друг к другу. Таким образом выражения для вычисления хроматизма положения в системе с большим и меньшим фокусным расстоянием соответственно будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \Delta s_1 &= S_{1,j} + \left[1 - d_1 \sum_{i=1}^j \varphi_i \right]^2 S_{2,k} + \left[1 - \sum_{i=1}^j \varphi_i (d_1 + d_2) - d_2 \sum_{i=1}^k \varphi_i \left(1 - d_1 \sum_{i=1}^j \varphi_i \right) \right]^2 S_{3,m}; \\ \Delta s_2 &= \frac{S_{1,j}}{z^2} + \frac{S_{2,k}}{z^2} \left[1 - d_2 \sum_{i=1}^j \varphi_i \right]^2 + \frac{S_{3,m}}{z^2} \left[1 - d_2 \sum_{i=1}^j \varphi_i - d_1 \sum_{i=1}^j \varphi_i - d_1\varphi_2 \left(1 - d_2 \sum_{i=1}^j \varphi_i \right) \right]^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где Δs_1 – хроматизм положения при f'_{\max} ; Δs_2 – хроматизм положения при f'_{\min} .

Переменные $S_{1,j}$, $S_{2,k}$, $S_{3,m}$, в выражениях (5) определяются как суммы отношений оптических сил каждой линзы к их относительным средним дисперсиям для первого, второго и третьего компонента соответственно, где j , k , m – верхние границы суммирования, равные количеству линз в компоненте. Значения относительных средних дисперсий выбираются для исследуемого спектрального диапазона.

Таким образом система выражений, состоящая из дважды записанных выражений (5) для MWIR и LWIR спектральных диапазонов, приравненных к нулю, и соотношений (1) – (4), описывает мультиспектральный DWIR объектив с дискретной сменой фокусных расстояний со скорректированным хроматизмом положения в выбранных спектральных диапазонах. Решения такой системы уравнений при задании конечного количества линз j , k , m в компонентах системы позволяют получить оптические силы линз в стартовой системе, которая может использоваться для дальнейшей оптимизации и расчета DWIR объектива с двумя полями, переход между которыми не требует смещения плоскости приемника излучений относительно объектива.

Результаты и обсуждение

Для решения полученной в предыдущем разделе системы уравнений, описывающих оптическую систему, необходимо задаться расстояниями d_1 и d_2 между оптическими компонентами. Оптические силы компонентов системы и высоты лучей на них, определяемые выражениями (1) – (2), зависят только от значений характеристик в техническом задании и толщин d_1 и d_2 . В автоматизированный поиск решений закладывается фильтрация значений d_1 и d_2 , при которых относительные отверстия компонентов имеют разумные с точки зрения проектировщика значения. Из габаритных соображений сумма толщин d_1 и d_2 в тонких компонентах не должна превышать $1,2$ от f'_{max} . Область значений толщин также ограничена условием, что оптическая сила первого компонента должна быть положительной, а, значит, знаменатель выражения (1) должен быть отрицательным.

Для поиска решений численными методами используются значения d_1 и d_2 с шагом $0,1$ в пределах области их значений. В качестве рассматриваемой номенклатуры материалов используется 12 материалов, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номенклатура используемых материалов

Материал	ν_{3-5}	ν_{8-12}	Материал	ν_{3-5}	ν_{8-12}
Ge	107,3	783,2	IRG203	172,9	49,2
ZnSe	178,0	57,5	IRG204	170,3	171,1
KRS5	232,2	165,0	IRG205	167,2	109,3
ZnS	109,6	22,8	IRG206	163,0	160,2
IRG201	113,0	109,2	IRG207	203,9	168,5
IRG202	200,6	121,4	IRG209	100,2	236,7

Компьютерное решение методом Левенберга – Марквардта в среде MATLAB систем уравнений, основанных на выражениях с использованием значений коэффициентов средней дисперсий материалов из табл. 1 и значений толщин d_1 и d_2 из области допустимых значений, позволило найти 743 993 комбина-

ции материалов и оптических сил линз в оптической системе, при которых хроматизм положения в MWIR и LWIR спектральных диапазонах меньше дифракционно-ограниченного с учетом масштабирования системы. В табл. 2 приведены некоторые из полученных решений.

Таблица 2

Выборка из шести вариантов стартовых систем

Материал линзы						Оптическая сила линзы						d_1	d_2
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
IRG207	IRG209	ZnSe	KRS5	IRG209	ZnSe	0,60	-1,10	-0,80	4,18	-0,98	-1,02	0,8	0,3
IRG206	IRG202	IRG201	Ge	ZnSe	IRG202	0,39	0,16	-1,21	-1,43	-2,57	5,97	1,0	0,1
KRS5	IRG205	IRG203	IRG206	Ge	ZnSe	0,44	-1,24	0,06	8,03	-3,53	-2,48	0,9	0,1
Ge	IRG209	IRG207	ZnS	Ge	IRG207	0,72	-5,24	2,87	-0,43	-0,77	3,51	0,7	0,3
IRG202	KRS5	IRG205	Ge	IRG202	IRG209	0,78	3,24	-5,62	5,50	3,18	-6,32	0,6	0,2
IRG204	IRG209	ZnS	Ge	IRG209	IRG204	0,60	-1,64	-0,26	3,99	-5,53	3,73	0,8	0,3
IRG204	ZnSe	IRG201	IRG204	ZnSe	IRG201	0,50	0,10	-1,46	6,13	0,41	-4,46	0,8	0,1

С целью верификации описанного метода разработки стартовых систем методами компьютерной оптики одна из систем, приведенных в табл. 2, представлена в компонентах конечной толщины и оптимизирована для достижения качества по интегральному критерию – коэффициенту передачи контраста в частотно-контрастной характеристике (ЧКХ) на пространственной частоте, соответствующей частоте Найквиста. Результаты оптимизации приведены на рис. 2.

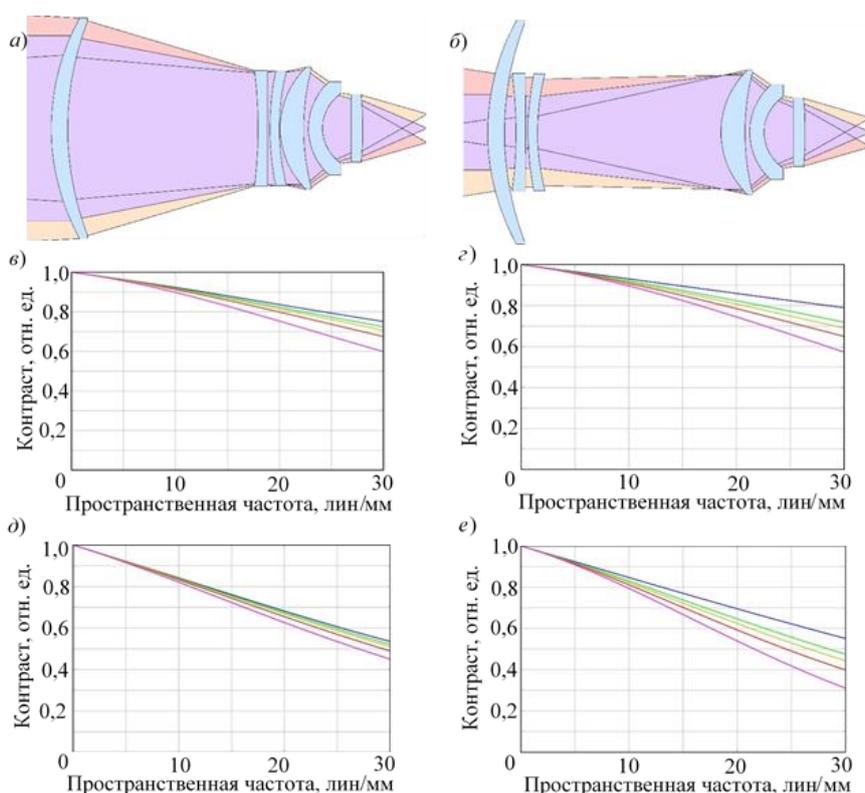


Рис. 2. Результат оптимизации оптической системы: а), в), д) – оптическая система с ходом лучей и графики ЧКХ в MWIR и LWIR диапазонах при $f' = 100$ мм; б), в), д) – оптическая схема с ходом лучей и графики ЧКХ в MWIR и LWIR диапазонах при $f' = 40$ мм

Оптические силы и материалы линз системы, взятой за основу, соответствуют первой строке табл. 2. Расчет приводился для фокусных расстояний 100 и 40 мм, относи-

тельного отверстия системы 1 : 1,2 и поля зрения, определяемого размером приемника формата 640 x 512 пикселей с размером пикселя 15 мкм. Границы рабочих спек-

тральных диапазонов определяются фактическими характеристиками выбранных приемников излучения. В [10] описан приемник излучения на квантовых ямах, рабочие длины волн которого в MWIR диапазоне составляют от 3,7 до 5,0 мкм и в LWIR диапазоне – от 7,0 до 9,0 мкм. Для разработки оптической системы в статье приняты аналогичные границы рабочих спектральных диапазонов. Для коррекции монохроматических аберраций в системе используются две асферические поверхности.

Из графиков ЧКХ следует, что в центре поля зрения отличие коэффициента передачи контраста на частоте Найквиста от такового в безаберрационном объективе не превышает 10 %, отношение Гопкинса составляет не менее 0,9. Такое качество изображения, близкое к дифракционному пределу, обусловлено тем, что остаточный продольный хроматизм в рабочих спектральных диапазонах MWIR и LWIR составляет 1/7 000 и 1/4 200 от фокусного расстояния (при фо-

кусном расстоянии 100 мм) и 1/2 200 и 1/5 700 (при фокусном расстоянии 40 мм). Таким образом, в ходе оптимизации сохраняется уровень коррекции продольного хроматизма, заложенный при создании стартовой системы: не более $2\lambda K^2$ для каждого их диапазонов и фокусных расстояний.

Заключение

В заключение отмечается, что оптическая система, сконструированная по предлагаемому схемному решению, параметры которой удовлетворяют системе уравнений, составленной с использованием соотношений (1) – (5) представленным в статье образом, может служить стартовой для разработки DWIR объективов с дискретной сменой фокусного расстояния, при этом в итоговом варианте продольный хроматизм в каждом из диапазонов и фокусных расстояний может сохранить значение, сопоставимое с дифракционным пределом, заложенным в стартовую систему.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao Zhigang, Wang Xin, Peng Tinghai, Zhao Canbing, Xia Likun, Zhou You Status Quo and Application of Middle and Long Wave Dual-band Infrared Imaging Technologies in Occident // *Infrared Technology*. – 2020. – Вып. 4 (31). С. 312–319. – DOI 10.3724/SP.J.7101502294.
2. Leonardo Land & Naval Defence Electronics. Optronic Systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://electronics.leonardo.com/en/products/optronic-systems>.
3. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Часть I // *Фотоника*. – 2020. – Вып. 3 (18). – С. 234–244. – DOI 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.3.234.244.
4. Ramsey J. L., Unger B. L., Lindberg G. P. Design study of a MWIR/LWIR multiple FOV lens // *Proc. SPIE 10627, Advanced Optics for Defense Applications: UV through LWIR III* : материалы Международной научно-практической конференции (15–19 апреля 2018 г.). – Орlando. – С. 1062703-1–1062703-10. – DOI 10.1117/12.2303415.
5. Vizgaitis J. N. Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lenses // *Proc. SPIE 7652, International Optical Design Conference* : материалы Международной научно-практической конференции (13–17 июня 2010). – Джексон Хол. – С. 76522E-1–76522E-8. – DOI 10.1117/12.871352.
6. ZEMAX Optical Design Program. User's Guide. Tucson, Arizona, USA: Zemax Development Corporation. – 2008. – 732 с.
7. Mikš A., Novák J. Method for primary design of superachromats // *Applied Optics*. – 2013. – Вып. 28 (52). – С. 6868–6876. – DOI 10.1364/AO.52.006868.
8. Bo Zhang, Qingfeng Cui, Mingxu Piao, Yang Hu Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements // *Applied Optics*. – 2019. – Вып. 8 (58). – С. 2058–2067. – DOI 10.1364/AO.58.002058.
9. Khatsevich T. N., Shmelev E. V. Development of dual-band infrared lenses // *Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics* : ма-

териалы Международной научно-практической конференции (26–30 июня 2023). – Москва. – С. 127800N-1–127800N-5. – DOI 10.1117/12.2689347.

10. Cogle O., Rannou C., Forestier B., Jougla P., Bois P. F., Costard E. M., Manissadjian A., Gohier D. QWIP compact thermal imager: Catherine-XP and its evolution // Proc. SPIE 6542, Infrared Technology and Applications XXXIII : материалы Международной научно-практической конференции (9–13 апреля 2007). – Орландо. – С. 654234-1–654234-12. – DOI 10.1117/12.723720.

Об авторах

Евгений Владимирович Шмелев – аспирант кафедры фотоники и приборостроения СГУГиТ, инженер-конструктор ООО «Оптическое Расчетное Бюро».

Татьяна Николаевна Хацевич – кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения СГУГиТ, генеральный директор ООО «Оптическое Расчетное Бюро».

Получено 08.07.2024

© *Е. В. Шмелев, Т. Н. Хацевич, 2024*

Development of dual-band infrared lenses with discrete focal length change

E. V. Shmelev^{1,2} ✉, T. N. Khatsevich^{1,2}

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

² Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: shmelev@luggar.biz, khatsevich@rambler.ru

Abstract. The development of objectives with competitive characteristics seems to be an urgent task for expanding the range of domestic elemental base of optical-electronic devices and complexes. The development of microelectronics technologies in the production of dual-band infrared radiation receivers requires the creation of a new group of infrared dual-band lenses. The main problem of the article is related to the need to develop such lenses. The purpose of the article is to present results of modeling of chromatic aberration in dual-band lenses with discrete change of focal length, using methods of geometric optics, theory of chromatic aberration and computer design of optical systems. The circuit solution of dual-band MWIR/LWIR objective with discrete change of focal length is proposed, for which mathematical model is created, describing chromatical focal shift aberration of objective in each position of movable component of the circuit and for two ranges of the spectrum. Based on the analysis of the mathematical model, solutions containing sets of materials, optical powers of the lenses included in the starting system and distances between the components are found. Numerical methods show that the solutions found can serve as starting systems for developing dual-band lenses that provide a stable position of the image plane in the ranges of 3–5 and 8–12 μm and a two-stage change of focal length, oriented towards conjugation with uncooled dual-band radiation receivers. The results are illustrated by the calculation of a dual-band lens with a focal length of 100/40 mm and a relative aperture of 1:1.2.

Keywords: infrared, discrete focal length change, DWIR

REFERENCE

1. Zhao, Zhigang, Wang, Xin, Peng, Tinghai, Zhao, Canbing, Xia, Likun, & Zhou, You (2020). Status Quo and Application of Middle and Long Wave Dual-band Infrared Imaging Technologies in Occident. [*Infrared Technology*], 4(42), 312–319, DOI 10.3724/SP.J.7101502294.

2. Leonardo, Land & Naval, Defence Electronics. Optronic Systems. Retrieved from <https://electronics.leonardo.com/en/products/optronic-systems>.

3. Kul'chitskiy, N. A., Naumov, A. V., & Startsev, V. V. (2020). Infrared Focal Plane Array Detectors: «Post Pandemic» Development Trends. *Fotonika [Photonics]*, 3(18), 234–244 [in Russian].
4. Ramsey, J. L., Unger, B. L., & Lindberg, G. P. (2018). Design study of a MWIR/LWIR multiple FOV lens. [*Proc. SPIE 10627, Advanced Optics for Defense Applications: UV through LWIR III*] pp. 1062703-1–1062703-10, DOI 10.1117/12.2303415.
5. Vizgaitis, J. N. (2010). Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lenses. [*Proc. SPIE 7652, International Optical Design Conference 2010*]. pp. 76522E-1–76522E-8. DOI 10.1117/12.871352.
6. ZEMAX Optical Design Program. User's Guide. (2008). Tucson, Arizona, USA: Zemax Development Corporation. 732 p.
7. Mikš, A., & Novák, J. (2013). Method for primary design of superachromats. [*Applied Optics*], 28(52), 6868–6876, DOI 10.1364/AO.52.006868.
8. Bo, Zhang, Qingfeng, Cui, Mingxu, Piao, & Yang, Hu (2019). Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements. [*Applied Optics*], 8(58), 2058–2067, DOI 10.1364/AO.58.002058.
9. Khatsevich, T. N., & Shmelev, E. V. (2023). Development of dual-band infrared lenses. [*Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*] pp. 127800N-1–127800N-5, DOI 10.1117/12.2689347.
10. Cocle, O., Rannou, C., Forestier, B., Jouglu, P., Bois, P. F., Costard, E. M., Manissadjian, A., & Gohier, D. (2007). QWIP compact thermal imager: Catherine-XP and its evolution. [*Proc. SPIE 6542, Infrared Technology and Applications XXXIII*], pp. 654234-1–654234-12, DOI 10.1117/12.723720.

Author details

Evgeniy V. Shmelev – Ph. D. Student, Department of Photonics and Device Engineering, SSUGT; design engineer at Optical Design Bureau LLC.

Tatyana N. Khatsevich – Ph. D., Professor, Department of Photonics and Device Engineering, SSUGT; General Director of Optical Settlement Bureau LLC.

Received 08.07.2024

© E. V. Shmelev, T. N. Khatsevich, 2024