

## Активная атермализация двухдиапазонных ИК-вариообъективов

Г.И. Грейсукх<sup>1</sup>, И. А. Левин<sup>2</sup>, С.В. Казин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия,

<sup>2</sup> ПАО «Красногорский механический завод им. С.А. Зверева», Красногорск, Россия

### Аннотация

Для простых по конструкции средне- и длинноволновых двухдиапазонных инфракрасных рефракционных и рефракционно-дифракционных тепловизионных вариообъективов показана возможность сохранения во всем интервале изменения фокусного расстояния высоких и практически неизменных оптических характеристик при перепаде температур от  $-40$  до  $+40^\circ\text{C}$ . Атермализация для любого фокусного расстояния достигается перемещением вдоль оптической оси объектива одного двухлинзового компонента или одиночной линзы, не задействованных в процессе зуммирования, что позволило, в частности, компенсацию терморасфокусировки и фокусировку объектива на дистанцию до объекта съемки осуществлять с использованием одного и того же фокусирующего механизма и при этом сохранять габарит и герметичность оптической системы.

**Ключевые слова:** двухдиапазонное ИК-излучение, рефракционный и рефракционно-дифракционный вариообъектив, активная атермализация.

**Цитирование:** Грейсукх, Г.И. Активная атермализация двухдиапазонных ИК-вариообъективов / Г.И. Грейсукх, И.А. Левин, С.В. Казин // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 6. – С. 931-936. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-775.

**Citation:** Greisukh GI, Levin IA, Kasin SV. Active athermalization of dual-infrared zoom lenses. Computer Optics 2020; 44(6): 931-936. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-775.

### Введение

Одним из перспективных направлений в современном оптическом приборостроении является направление, связанное с разработкой и созданием оптики, предназначенной для работы в нескольких спектральных диапазонах [1, 2, 3]. В видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах это прежде всего массовая оптика фото- и видеофиксации (от камер мобильных телефонов и автомобильных видеорегистраторов до охранных систем видеонаблюдения). В более длинноволновом диапазоне, включающем среднее ( $3,7-5$  мкм) и дальнее ( $8-11$  мкм) ИК-излучение, это оптика тепловизоров и систем технического зрения (в частности, беспилотных наземных, подводных и воздушных транспортных средств). При этом очевидно, что возможность непрерывного изменения масштаба изображения, формируемого объективом таких мультиспектральных оптических систем, позволяет минимизировать потери информации при его дальнейшей обработке. Это, в свою очередь, обуславливает всё возрастающий интерес, в частности, к двухдиапазонным ИК-вариообъективам (см., например, [4]).

Здесь следует заметить, что одним из основных требований, предъявляемых к ИК-системам, является сохранение заданных оптических характеристик в рабочем температурном диапазоне. Удовлетворить это требование невозможно без компенсации влияния температурных воздействий на параметры линз и деталей конструкции оптической системы. Действительно, при изменении температуры изменяются показатели преломления оптических сред, а также ли-

нейные размеры оптических элементов (толщины, радиусы кривизны, коэффициенты асферичности поверхностей) и деталей конструкции, таких как линзовые оправы, промежуточные кольца и корпус системы. В результате чего смещаются положения фокальных плоскостей, меняются фокусные расстояния вариообъектива и ход лучей в нем. При этом преобладающее влияние на качество формируемого изображения оказывает температурное изменение величины рабочего отрезка объектива – расстояния от последней линзы или присоединительного торца вариообъектива до плоскости изображения, а точнее плоскости, в которой качество изображения наилучшее (плоскости наилучшей установки (ПНУ)). Если этот сдвиг превышает допустимую глубину резкости, его необходимо компенсировать в первую очередь. В ряде простейших случаев, относящихся, как правило, к монофокальным объективам, такая компенсация возможна методом пассивной атермализации, предполагающим в процессе проектирования оптико-электронного прибора, в том числе на этапе расчёта оптической схемы, произвести соответствующий подбор материалов линз, оправ и корпусных деталей [5, 6]. В случае же вариообъективов для компенсации сдвига ПНУ приходится использовать ручную или автоматическую электромеханическую подфокусировку, т.е. применять активную атермализацию [5, 7].

Цель настоящей статьи – рассмотреть несколько наиболее удачных вариантов активной атермализации двухдиапазонных ( $3,7 \leq \lambda \leq 11$  мкм) рефракционного и рефракционно-дифракционного ИК-вариообъективов, представленных в работе [8], и оценить эффективность каждого из них.

### 1. Атермализация двухдиапазонного рефракционного ИК-вариообъектива

Схема рассматриваемого вариообъектива, представленная на рис. 1 работы [8], относится к N-P-P типу, т.к. состоит из трех двухлинзовых компонентов, и при этом первый из них имеет отрицательную (Negative), а последующие два положительные (Positive) оптические силы. Примерно трехкратное непрерывное изменение масштаба изображения, сопровождающее зуммирование, т.е. изменение фокусного расстояния объектива, достигается за счёт плавного перемещения его положительных компонентов. При этом фронтальный отрицательный компонент неподвижен относительно плоскости изображения, чем и обеспечивается неизменность габарита объектива при зуммировании.

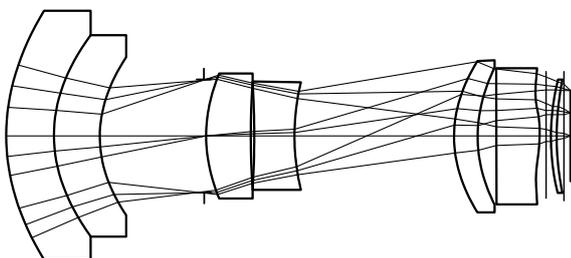


Рис. 1. Оптическая схема атермализованного рефракционного ИК-вариообъектива в промежуточной конфигурации, соответствующей  $f'_2 = 54$  мм

Тот или иной вариант атермализации объектива моделировался в программном пакете оптического проектирования ZEMAX [9]. При этом исходные конструктивные параметры вариообъектива, которые переносились из табл. 2 и 3 работы [8], полагались соответствующими температуре окружающей среды  $+20^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, полагалось, что такие детали конструкции объектива, как оправы линз, промежуточные кольца и корпусной тубус, будут выполнены из алюминиевого сплава Д16 (температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ). Изменение температуры всех оптических элементов и деталей конструкции предполагалось одновременным в диапазоне  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ .

Учитывая значительную массу собранного объектива в корпусе и шлейфовый вывод электрических сигналов с фотоприемной матрицы, в качестве приемлемых вариантов подфокусировки рассматривалось не их взаимное смещение относительно друг друга, а перемещение отдельных оптических элементов объектива, выделенных в единый узел фокусировки, не задействованный в зуммировании.

Моделирование показало, что перемещение фронтального двухлинзового компонента как целого позволяет без дополнительной оптимизации остальных конструктивных параметров осуществлять подфокусировку, компенсирующую смещение ПНУ, вызванное изменением как дистанции до объекта съемки, так и температуры. При этом термокомпенсация в

пределах оговоренного выше перепада температур (без учёта фокусировки на дистанцию) и для любого фокусного расстояния (из расчётного диапазона зуммирования) обеспечивается перемещением первого компонента вдоль оптической оси объектива на расстояние не более 1 мм. Что касается полихроматической частотно-контрастной характеристики (ЧКХ), оценённой по меридиональным и сагиттальным составляющим в пределах всего поля зрения на пространственной частоте  $25 \text{ мм}^{-1}$ , то ее падение не превышает 1,6%, 1,9% и 1% в короткофокусной, промежуточной и в длиннофокусной конфигурациях соответственно.

К недостаткам этого варианта активной атермализации следует отнести как существенную массу подфокусирующего двухлинзового компонента, так и изменение при подфокусировке габарита системы (расстояния от фронтальной поверхности первого оптического элемента объектива до плоскости фотоприемника). Однако изменения габарита системы можно избежать путем небольшого удлинения корпуса объектива и установки перед фронтальным двухлинзовым компонентом жестко закрепленной в торце корпуса прозрачной в рабочем спектральном диапазоне плоскопараллельной пластины, выполняющей функцию защитного стекла.

Альтернативный вариант активной атермализации данного ИК-вариообъектива предполагает введение в его схему дополнительной близфокальной линзы, размещаемой в узле фокусировки перед фотоприемником. В результате оптическая схема атермализованного объектива приобретает вид, представленный на рис. 1 и 2.

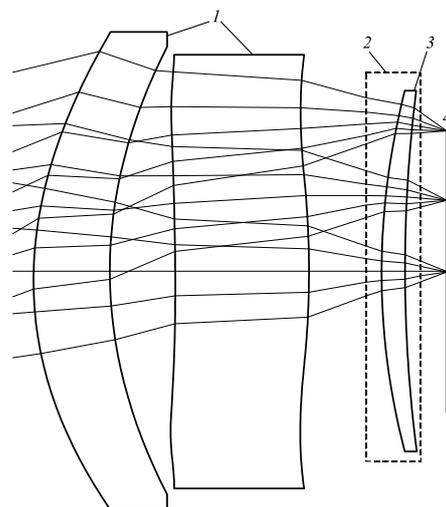


Рис. 2. Фрагмент оптической схемы атермализованного рефракционного ИК-вариообъектива: 1 – оконечный двухлинзовый компонент, перемещающийся при зуммировании; 2 – жёстко зафиксированный в корпусе объектива узел фокусировки; 3 – перемещаемая близфокальная линза; 4 – фотоприёмник

Этот вариант атермализации потребовал дополнительной оптимизации по целому ряду конструктив-

ных параметров. При этом основные оптические характеристики объектива остались практически неизменными. Апертурная диафрагма фиксированного диаметра (24,15 мм) перемещается вместе с первым положительным компонентом. Расстояние от вершинной касательной плоскости фронтальной линзы до плоскости изображения равно 121,5 мм. Фокусное расстояние, угловое поле в пространстве предметов и диафрагменное число вариообъектива в короткофокусной, промежуточной и длиннофокусной конфигурациях соответственно равны  $f'_1 = 35$  мм,  $2\omega_1 = 29,86^\circ$ ,  $K_1 = 1,3$ ;  $f'_2 = 54$  мм,  $2\omega_2 = 19^\circ$ ,  $K_2 = 1,79$ ;  $f'_3 = 84$  мм,  $2\omega_3 = 12,41^\circ$ ,  $K_3 = 2,42$ .

Конструктивные параметры и оптические характеристики объектива сведены в табл. 1–4. Все выше-

приведенные параметры и данные таблиц соответствуют температуре  $+20^\circ\text{C}$ . Преломляющие поверхности объектива с номерами 2, 6, 7, 10, 14 – сферические, а остальные – асферические, задаваемые в Zemax уравнением чётной асферической поверхности [9, 10]. Термокомпенсация при перепаде температур  $\pm 40^\circ\text{C}$  для любого фокусного расстояния (в пределах диапазона зуммирования) обеспечивается перемещением близфокальной линзы вдоль оптической оси объектива на расстояние не более 0,12 мм. При этом падение ЧКХ в пределах всего поля зрения на пространственной частоте  $25 \text{ мм}^{-1}$  не превышает 2,3%, 0,5% и 1,9% в короткофокусной, промежуточной и в длиннофокусной конфигурациях соответственно.

Табл. 1. Основные конструктивные параметры рефракционного вариообъектива

Номер поверхности	Радиус $r$ , мм	Толщина $d$ , мм	Оптический материал
Плоскость предмета	$\infty$	$\infty$	–
1	43,194	10	SILICON
2	31,947	0,2	–
3	30,961	10	GERMANIUM
4	24,364	Изменяемая $d_4$	–
Апертурная диафрагма	$\infty$	0,5	–
5	35,080	9,72	SILICON
6	252,887	0,55	–
7	497,513	8,9	GERMANIUM
8	43,256	Изменяемая $d_8$	–
9	26,703	5,03	SILICON
10	31,337	4,21	–
11	-101,704	8,98	GERMANIUM
12	-59,464	Изменяемая $d_{12}$	–
Фронтальная плоскость узла фокусировки	$\infty$	Изменяемая $d_{ФП}$	–
13	46,324	1,5	GERMANIUM
14	83,333	Изменяемая $d_{14}$	–
Задняя плоскость узла фокусировки	$\infty$	1,7	–
Плоскость изображения	$\infty$	0	–

Табл. 2. Дополнительные характеристики асферических поверхностей рефракционного вариообъектива

Номер поверхности	Коэффициент асферичности при конической постоянной $k=0$				
	$\alpha_2, \text{мм}^{-3}$	$\alpha_3, \text{мм}^{-5}$	$\alpha_4, \text{мм}^{-7}$	$\alpha_5, \text{мм}^{-9}$	$\alpha_6, \text{мм}^{-11}$
1	$-1,150 \cdot 10^{-6}$	$4,328 \cdot 10^{-9}$	$-1,178 \cdot 10^{-11}$	$9,755 \cdot 10^{-15}$	$-2,872 \cdot 10^{-18}$
3	$6,566 \cdot 10^{-8}$	$-2,079 \cdot 10^{-8}$	$4,738 \cdot 10^{-11}$	$-3,426 \cdot 10^{-14}$	$-4,493 \cdot 10^{-19}$
4	$-5,415 \cdot 10^{-6}$	$-5,732 \cdot 10^{-8}$	$1,557 \cdot 10^{-10}$	$-1,684 \cdot 10^{-13}$	$3,204 \cdot 10^{-17}$
5	$1,508 \cdot 10^{-6}$	$2,795 \cdot 10^{-8}$	$-2,857 \cdot 10^{-10}$	$1,494 \cdot 10^{-12}$	$-2,976 \cdot 10^{-15}$
8	$1,534 \cdot 10^{-5}$	$-9,660 \cdot 10^{-8}$	$2,404 \cdot 10^{-9}$	$-2,116 \cdot 10^{-11}$	$6,796 \cdot 10^{-14}$
9	$-5,684 \cdot 10^{-6}$	$2,080 \cdot 10^{-8}$	$-8,041 \cdot 10^{-11}$	$5,108 \cdot 10^{-13}$	$-1,667 \cdot 10^{-15}$
11	$3,997 \cdot 10^{-5}$	$-8,416 \cdot 10^{-8}$	$-6,045 \cdot 10^{-10}$	$4,741 \cdot 10^{-12}$	$-7,702 \cdot 10^{-15}$
12	$3,971 \cdot 10^{-5}$	$-2,913 \cdot 10^{-8}$	$-5,638 \cdot 10^{-10}$	$3,486 \cdot 10^{-12}$	$-4,511 \cdot 10^{-15}$
13	$-8,876 \cdot 10^{-6}$	$-2,697 \cdot 10^{-7}$	$5,046 \cdot 10^{-9}$	$-2,994 \cdot 10^{-11}$	$6,696 \cdot 10^{-14}$

## 2. Атермализация двухдиапазонного рефракционно-дифракционного ИК-вариообъектива

Оптическая схема рефракционно-дифракционного ИК-вариообъектива, представленная на рис. 3 работы [8], также относится к N-P-P типу, но отличается от схемы рефракционного ИК-вариообъектива тем, что на плоской поверхности рефракционной линзы, ближай-

шей к апертурной диафрагме, размещена двухслойная двухрельефная дифракционная микроструктура, а оптический материал GERMANIUM во всех трех компонентах объектива заменен на халькогенидное стекло марки IRG26. В результате увеличена светосила объектива во всем диапазоне зуммирования при сохранении остальных оптических характеристик.

Исследование возможностей атермализации рефракционно-дифракционного ИК-вариообъектива

показало, что, как и в случае рефракционного вариообъектива, имеются как минимум два эффективных варианта решения этой задачи.

Табл. 3. Параметры рефракционного вариообъектива, изменяемые при зуммировании

Параметр	Номер конфигурации		
	1	2	3
Толщина $d_4$ , мм	37,314	22,359	6,684
Толщина $d_8$ , мм	16,932	34,084	50,979
Толщина $d_{12}$ , мм	3,856	1,659	0,439
Значения дифракционно-ограниченной полихроматической ЧКХ на пространственной частоте $25 \text{ мм}^{-1}$	0,69	0,60	0,49
Минимальные значения полихроматической ЧКХ, оценённые по меридиональным и сагиттальным составляющим в пределах всего поля зрения, на пространственной частоте $25 \text{ мм}^{-1}$	0,55	0,38	0,4

Табл. 4. Параметры рефракционного вариообъектива, изменяемые в процессе автофокусировки

Параметр	Конфигурация	Температура		
		-40 С	+20 С	+40 С
Толщина $d_{фп}$ , мм	1	0,917	1	1,008
	2	0,938		0,991
	3	0,947		1,038
Толщина $d_{14}$ , мм	1	1,195	1,114	1,106
	2	1,174		1,123
	3	1,165		1,076

Первый вариант предполагает перемещение вдоль оптической оси фронтальной рефракционной линзы отрицательного компонента вариообъектива. Это позволяет без дополнительной оптимизации остальных конструктивных параметров осуществлять подфокусировку, компенсирующую смещение ПНУ, вызванное изменением как дистанции до объекта съемки, так и температуры. При этом термокомпенсация в пределах оговоренного выше перепада температур (без учёта фокусировки на дистанцию) для любого фокусного расстояния (в пределах диапазона зуммирования) обеспечивается перемещением фронтальной линзы на расстояние не более 0,3 мм. Что касается ЧКХ, оценённой по меридиональным и сагиттальным составляющим в пределах всего поля зрения на пространственной частоте  $25 \text{ мм}^{-1}$ , то ее падение не превышает 6,3 %, 4,3 % и 2 % в короткофокусной, промежуточной и в длиннофокусной конфигурациях соответственно.

Альтернативный вариант активной атермализации данного рефракционно-дифракционного ИК-вариообъектива с целью сохранения габаритных размеров системы предполагает перемещение вдоль оптической оси не фронтальной, а второй рефракционной линзы отрицательного компонента вариообъектива. Эта линза размещается в узле фокусировки, как показано на рис. 3, и позволяет осуществлять подфокуси-

ровку, компенсирующую смещение ПНУ, вызванное изменением как дистанции до объекта съемки, так и температуры.

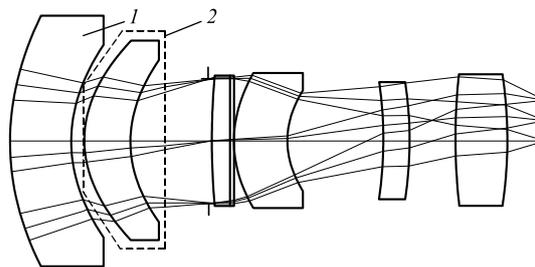


Рис. 3. Оптическая схема атермализованного рефракционно-дифракционного ИК-вариообъектива в промежуточной конфигурации, соответствующей  $f'_2 = 54 \text{ мм}$ : 1 и 2 – фронтальная и задняя плоскости узла фокусировки

Данный вариант атермализации потребовал дополнительной оптимизации объектива практически по всем конструктивным параметрам. При этом основные оптические характеристики остались неизменными. Апертурная диафрагма фиксированного диаметра (28,6 мм) перемещается вместе с первым положительным компонентом. Расстояние от вершинной касательной плоскости фронтальной линзы до плоскости изображения равно 121,5 мм. Фокусное расстояние, угловое поле в пространстве предметов и диафрагменное число вариообъектива в короткофокусной, промежуточной и длиннофокусной конфигурациях соответственно равны  $f'_1 = 35 \text{ мм}$ ,  $2\omega_1 = 29,86^\circ$ ,  $K_1 = 1,15$ ;  $f'_2 = 54 \text{ мм}$ ,  $2\omega_2 = 19^\circ$ ,  $K_2 = 1,62$ ;  $f'_3 = 84 \text{ мм}$ ,  $2\omega_3 = 12,41^\circ$ ,  $K_3 = 2,35$ .

Конструктивные параметры и оптические характеристики объектива сведены в табл. 5–8. Все вышеприведенные параметры и данные таблиц соответствуют температуре  $+20^\circ\text{C}$ . Преломляющие поверхности объектива с номерами 2, 7, 8, 11 – сферические, с номерами 1, 3–5, 9, 10, 12, 13 – асферические, а дифракционная микроструктура, размещенная на плоской поверхности третьей рефракционной линзы (на поверхности номер 6), смоделирована бесконечно тонкой фазовозадерживающей поверхностью, называемой в Zemax Binary2 [9, 10]. Термокомпенсация при перепаде температур  $\pm 40^\circ\text{C}$  и для любого фокусного расстояния (в пределах диапазона зуммирования) обеспечивается перемещением подфокусирующей линзы вдоль оптической оси объектива на расстояние не более 0,34 мм. При этом падение ЧКХ в пределах всего поля зрения на пространственной частоте  $25 \text{ мм}^{-1}$  не превышает 2,6 %, 1,2 % и 0 % в короткофокусной, промежуточной и длиннофокусной конфигурациях соответственно.

### Заключение

На примере ИК-вариообъективов, представленных в работе [8], для простых по конструкции средне- и длинноволновых двухдиапазонных ( $3,7 \leq \lambda \leq 11 \text{ мкм}$ )

рефракционных и рефракционно-дифракционных тепловизионных вариообъективов показана возможность сохранения во всем интервале изменения фо-

кусного расстояния высоких и практически неизменных оптических характеристик при перепаде температур от  $-40$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ .

Табл. 5. Основные конструктивные параметры рефракционно-дифракционного вариообъектива

Номер поверхности	Радиус $r$ , мм	Толщина $d$ , мм	Оптический материал
Плоскость предмета	$\infty$	$\infty$	—
1	64,128	14	SILICON
2	37,326	2,5	—
Фронтальная плоскость узла фокусировки	$\infty$	Изменяемая $d_{фл}$	—
3	28,043	10,27	IRG26
4	29,047	Изменяемая $d_4$	—
Задняя плоскость узла фокусировки	$\infty$	Изменяемая $d_{зп}$	—
Апертурная диафрагма	$\infty$	0,5	—
5	153,304	4,0	SILICON
6*	$\infty$	1	ZNS BROAD
7	$\infty$	0,198	—
8	28,588	11,9	IRG26
9	21,024	Изменяемая $d_9$	—
10	-102,161	5,920	SILICON
11	-83,248	10,370	—
12	255,152	11,97	IRG26
13	-62,397	Изменяемая $d_{13}$	—
Плоскость изображения	$\infty$	0	—

\*— поверхность типа Binary 2:  $m=1$ ,  $A_1=-0,14333\text{ мм}^{-2}$ ,  $A_2=4,26873\cdot 10^{-4}\text{ мм}^{-4}$ ,  $A_3=-2,01999\cdot 10^{-6}\text{ мм}^{-6}$ ,  $A_4=-7,58874\cdot 10^{-9}\text{ мм}^{-8}$ ,  $A_5=8,87845\cdot 10^{-11}\text{ мм}^{-10}$ ,  $A_6=-1,99086\cdot 10^{-13}\text{ мм}^{-12}$ .

Табл. 6. Дополнительные характеристики асферических поверхностей рефракционно-дифракционного вариообъектива

Номер поверхности	Коэффициент асферичности при конической постоянной $k=0$				
	$\alpha_2, \text{ мм}^{-3}$	$\alpha_3, \text{ мм}^{-5}$	$\alpha_4, \text{ мм}^{-7}$	$\alpha_5, \text{ мм}^{-9}$	$\alpha_6, \text{ мм}^{-11}$
1	$-1,378\cdot 10^{-6}$	$-1,284\cdot 10^{-9}$	$3,191\cdot 10^{-13}$	$-5,225\cdot 10^{-16}$	$6,736\cdot 10^{-19}$
3	$-7,597\cdot 10^{-6}$	$-2,237\cdot 10^{-9}$	$1,642\cdot 10^{-11}$	$1,076\cdot 10^{-14}$	$-2,961\cdot 10^{-17}$
4	$-6,901\cdot 10^{-6}$	$-2,766\cdot 10^{-9}$	$4,756\cdot 10^{-11}$	$7,908\cdot 10^{-14}$	$-9,187\cdot 10^{-17}$
5	$4,216\cdot 10^{-7}$	$2,499\cdot 10^{-9}$	$-2,602\cdot 10^{-11}$	$1,207\cdot 10^{-13}$	$-2,116\cdot 10^{-16}$
9	$3,333\cdot 10^{-6}$	$7,862\cdot 10^{-9}$	$-5,093\cdot 10^{-12}$	$7,540\cdot 10^{-14}$	$-2,140\cdot 10^{-16}$
10	$-6,422\cdot 10^{-6}$	$1,583\cdot 10^{-8}$	$-2,351\cdot 10^{-10}$	$1,303\cdot 10^{-12}$	$-3,228\cdot 10^{-15}$
12	$3,209\cdot 10^{-6}$	$4,041\cdot 10^{-8}$	$-1,678\cdot 10^{-10}$	$3,242\cdot 10^{-13}$	$4,263\cdot 10^{-17}$
13	$5,168\cdot 10^{-6}$	$3,519\cdot 10^{-9}$	$1,706\cdot 10^{-10}$	$-1,176\cdot 10^{-12}$	$2,678\cdot 10^{-15}$

Табл. 7. Параметры рефракционно-дифракционного вариообъектива, изменяемые при зуммировании

Параметр	Номер конфигурации		
	1	2	3
Толщина $d_{зп}$ , мм	23,861	10,015	0,3
Толщина $d_9$ , мм	4,563	21,922	37,067
Толщина $d_{13}$ , мм	11,932	8,419	2,99
Значения дифракционно-ограниченной полихроматической ЧКХ на пространственной частоте $25\text{ мм}^{-1}$	0,72	0,62	0,47
Минимальные значения полихроматической ЧКХ, оценённые по меридиональным и сагиттальным составляющим в пределах всего поля зрения, на пространственной частоте $25\text{ мм}^{-1}$	0,56	0,38	0,37

При этом рассмотрены различные варианты атермализации, предполагающие, что за изменение фокусного расстояния и за компенсацию терморасфокусировки будут отвечать разные элементы оптической схемы. Это дало возможность совместить (за исключением варианта, предполагающего использование

дополнительной близфокальной линзы) процессы атермализации и фокусировки вариообъектива на дистанцию до объекта съемки с помощью ручного или автоматического фокусирующего механизма, а также сохранить габариты и герметичность оптической системы, что защитит механизм перемещения от воздействия неблагоприятных условий внешней среды в процессе эксплуатации системы.

Табл. 8. Параметры рефракционно-дифракционного вариообъектива, изменяемые в процессе фокусировки

Параметр	Конфигурация	Температура		
		$-40\text{ C}$	$+20\text{ C}$	$+40\text{ C}$
Толщина $d_{фл}$ , мм	1	0,711	0,454	0,369
	2	0,535		0,388
	3	0,528		0,436
Толщина $d_4$ , мм	1	7,793	8,062	8,151
	2	7,9690		8,132
	3	7,976		8,084

У рефракционного вариообъектива в указанном диапазоне перепада температур и для любого фокусного расстояния в пределах диапазона зуммирования термокомпенсация обеспечивается перемещением вдоль оптической оси объектива либо первого ком-

понтента на расстояние не более 1 мм, либо дополнительной фокусирующей линзы на расстояние не более 0,12 мм. При этом падение ЧКХ на пространственной частоте  $25 \text{ мм}^{-1}$  в пределах всего поля зрения в короткофокусной, промежуточной и длиннофокусной конфигурациях в первом случае не превышает 1,6%, 1,9% и 1%, а во втором 2,3%, 0,5% и 1,9% соответственно.

У рефракционно-дифракционного вариообъектива при перепаде температур  $\pm 40^\circ\text{C}$  и для любого фокусного расстояния в пределах диапазона зуммирования термокомпенсация обеспечивается перемещением вдоль оптической оси фронтальной или последующей линзы первого компонента на расстояние не более 0,35 мм. При этом падение ЧКХ в короткофокусной, промежуточной и длиннофокусной конфигурациях в первом случае не превышает 6,3%, 4,3% и 2%, а во втором – 2,6%, 1,2% и 0% соответственно.

### **Благодарности**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

### **Литература**

1. **Медведев, А.В.** Мультиспектральные системы различного назначения / А.В. Медведев, А.В. Гринкевич, С.Н. Князева // Фотоника. – 2015. – № 5(53). – С. 68-81.
2. **Владимиров, В.М.** Оптическая система для дистанционного зондирования в УФ-, видимом и ближнем ИК-диапазонах / В.М. Владимиров, В.А. Юксеев,

- Е.Г. Лапухин // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 195-202. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-611.
3. **Vizgaitis, J.N.** Dual band infrared picture-in-picture systems / J.N. Vizgaitis, A.R. Hastings // Optical Engineering. – 2013. – Vol. 52, Issue 6. – 061306 (8 p).
4. **Zhang, B.** Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements / B. Zhang, Q. Cui, M. Piao, Y. Hu // Applied Optics. – 2019. – Vol. 58, Issue 8. – P. 2058-2067.
5. **Jamieson, T.H.** Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint / T.H. Jamieson // Proceedings of SPIE. – 1992. – Vol. 10265. – 1026508.
6. **Медведев, А.В.** Атермализация объективов прицельно-наблюдательных комплексов как средство обеспечения жизнедеятельности объектов БТБТ / А.В. Медведев, А.В. Гринкевич, С.Н. Князева // Фотоника. – 2016. – № 2(56). – С. 94-109.
7. **Reshidko, D.** Optical design study and prototyping of a dual-field zoom lens imaging in the 1-5 micron infrared waveband / D. Reshidko, P. Reshidko, R. Carmeli // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9580. – 95800C.
8. **Грейсух, Г.И.** Коррекция хроматизма двухдиапазонных ИК-вариообъективов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, А.И. Антонов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 177-182. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-623.
9. ZEMAX: Optical, illumination, and laser system design software [Electronical Resource]. – URL: <http://www.zemax.com/products/opticstudio> (request date 04.04.2020).
10. **Грейсух, Г.И.** Однослойные киноформные элементы для фото- и видеокамер мобильных устройств / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 218-226. – DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-2-218-226.

### **Сведения об авторах**

**Грейсух Григорий Исаевич**, 1943 года рождения. В 1965 году окончил Пензенский политехнический институт по специальности «Радиотехника». Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук (1990 год), профессор. Работает заведующим кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Г.И. Грейсух – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха более 210 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств и 2 патента. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Левин Илья Анатольевич**, 1987 года рождения. В 2009 году окончил Пензенский государственный университет по специальности 01.07.01 «Физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год), работает ведущим инженером-конструктором ПАО «Красногорский механический завод им. С.А. Зверева», Красногорск. И.А. Левин – специалист в области расчёта оптических систем. В списке научных работ И.А. Левина 23 публикации. E-mail: [i.a.levin@mail.ru](mailto:i.a.levin@mail.ru).

**Казин Сергей Владимирович**, 1988 года рождения. В 2010 году окончил Пензенский государственный университет архитектуры и строительства по специальности «Информационные системы и технологии». Кандидат физико-математических наук (2012 год), Научный сотрудник кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. В списке научных работ С.В. Казина 14 публикаций. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 29 июня 2020 г. Окончательный вариант – 6 октября 2020 г.

---

# Active athermalization of dual-infrared zoom lenses

G.I. Greisukh<sup>1</sup>, I.A. Levin<sup>2</sup>, S.V. Kazin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia,

<sup>2</sup> PJSC "Krasnogorsky Zavod", Krasnogorsk, Russia

## Abstract

For medium- and long-wavelength dual-band infrared refractive and refractive-diffractive thermal imaging zoom lenses of simple design, we show that it is possible to maintain superb and practically unchanged optical characteristics across the temperature range from  $-40$  to  $+40^{\circ}\text{C}$  in the entire range of focal length variation. Athermalization for any focal length is achieved by moving one double-lens component or a single lens along the optical axis of the lens. Considering that these optical components are not involved in the zooming process, it becomes possible to both compensate for thermal defocusing and focus the lens on the object of interest using the same focusing mechanism, while maintaining the size and tightness of the optical system.

**Keywords:** dual-infrared range, refractive and refractive-diffractive zoom lens, active athermalization.

**Citation:** Greisukh GI, Levin IA, Kasin SV. Active athermalization of dual-infrared zoom lenses. *Computer Optics* 2020; 44(6): 931-936. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-775.

**Acknowledgment:** The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 20-19-00081).

## References

- [1] Medvedev AV, Grinkevich AV, Knyazeva SN. Multispectral systems of different propose [In Russian]. *Photonics* 2015; 5(53): 68-81.
- [2] Vladimirov VM, Yukseev VA, Lapukhin EG. An optical system for remote sensing in the UV, visible and NIR spectral ranges. *Computer Optics* 2020; 44(2): 195-202. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-611.
- [3] Vizgaitis JN, Hastings AR. Dual band infrared picture-in-picture systems. *Opt Eng* 2013; 52(6): 061306.
- [4] Zhang B, Cui Q, Piao M, Hu Y. Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements. *Appl Opt* 2019; 58(8): 2058-2067.
- [5] Jamieson TH. Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint. *Proc SPIE* 1992; 10265: 1026508.
- [6] Medvedev AV, Grinkevich AV, Knyazeva SN. Objective athermalization of sighting and observation systems as an instrument to ensure functioning of armor and tank weapons [In Russian]. *Photonics* 2016; 2(56): 94-109.
- [7] Reshidko D, Reshidko P, Carmeli R. Optical design study and prototyping of a dual-field zoom lens imaging in the 1-5 micron infrared waveband. *Proc SPIE* 2015; 9580: 95800C.
- [8] Greisukh GI, Ezhov EG, Antonov AI. Correction of chromatism of dual-infrared zoom lenses. *Computer Optics* 2020; 44(2): 177-182. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-623.
- [9] ZEMAX: Optical, illumination, and laser system design software. Source: <http://www.zemax.com/products/opticstudio>.
- [10] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Single-layer kinoforms for cameras and video cameras of mobile communication devices. *Computer Optics* 2017; 41(2): 218-226. DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-2-218-226

---

## Authors' information

**Grigoriy Isaevitch Greisukh** (b. 1943) graduated (1965) from Penza Polytechnical Institute, majoring in Radio Engineering. He is the deserved worker of the Russian Higher School. He received his Doctor in Technical (1990) degrees from the Leningrad Institute of Precision Mechanics and Optics. He is chief of the Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction. G.I. Greisukh is EOS and D. S. Rozhdestvensky Optical Society member. His current research interests include design of optical system, diffractive and gradient-index optics. He is co-author of 210 scientific papers, 3 monographs, 9 inventions, and 2 patents. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Il'ya Anatolievich Levin** (b. 1987) graduated (2009) from Penza State University, majoring in Physics. He is Ph.D. and he works as a leading design engineer at PJSC "Krasnogorsky Zavod". His current research interests include design of optical systems. He is co-author of 23 scientific publications. E-mail: [i.a.levin@mail.ru](mailto:i.a.levin@mail.ru).

**Sergey Vladimirovich Kazin** (b. 1988) graduated (2010) from the Penza State University of Architecture and Construction, majoring in Information Systems and Technologies. He received his Candidate in Physics & Maths (2012) degrees from Samara State Aerospace University. He is researcher of the Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction. He is co-author of 14 publications. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

---

Received June 29, 2020. The final version – October 6, 2020.

---