

А. Г. Хаустов^{1}, М. П. Егоренко¹*

Разработка широкодиапазонной малогабаритной видеокамеры для беспилотного аппарата

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: zatura2013@mail.ru

Аннотация. Применение двух и многодиапазонных матричных фотоприемных устройств, в которых рабочие спектральные диапазоны принимаются одним приемником излучения, позволяет упростить оптическую схему современных оптико-электронных систем, уменьшить их габариты, массу, энергопотребление и увеличить быстродействие. Вместе с такими устройствами успешно функционируют двух и многоканальные оптико-электронные системы, в которых происходит разделение на отдельные спектральные каналы. В таких системах разделение по спектральным диапазонам осуществляется разветвлением оптической оси для каждого используемого спектрального канала и фотоприемного устройства. В статье рассмотрены используемые материалы, пропускающие широкий спектр длин волн оптического излучения, конструкции многодиапазонных систем, а также многодиапазонные приемники излучения. Продемонстрирован габаритный и компьютерный расчет оптической системы. Предложена предварительная схема устройства объектива камеры, пропускающего в диапазоне оптического излучения от 0,42 мкм до 14 мкм.

Ключевые слова: видеокамера, малогабаритная видеокамера, объектив, широкодиапазонная оптическая система, многодиапазонная оптическая система, видимый, ближний инфракрасный, средний инфракрасный, дальний инфракрасный

A. G. Khaustov^{1}, M. P. Egorenko¹*

Development of a wide-range small-sized video camera for an unmanned vehicle

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: zatura2013@mail.ru

Abstract. The use of two- and multi-band matrix photodetectors, in which wide spectral ranges are received directly by one radiation receiver, makes it possible to simplify the optical scheme of modern optoelectronic systems, reduce their dimensions, weight, energy consumption and increase performance. Together with such devices, two- and multi-channel optoelectronic systems operate successfully, in which there is a separation into separate spectral channels. In such systems, the separation by spectral ranges is carried out by branching the optical axis for each spectral channel and photodetector used. The article considers the materials used that transmit a wide range of wavelengths, the designs of multi-band systems, as well as multi-band radiation receivers. The dimensional and computer calculation of the optical system is demonstrated. A preliminary scheme of the camera lens device, transmitting in the range of 0.42 microns – 14 microns, is proposed.

Keywords: Video camera, small-sized video camera, the lens, wide-range optical system, multi-band optical system, visible, near infrared, medium infrared, long infrared

Введение

Существуют оптико-электронные системы, работающие в различных диапазонах оптического спектра. Самыми распространенными спектральными диапазонами в которых работают современные оптико-электронные системы (ОЭС) являются: ультрафиолетовый (УФ) (UV от 0,05 до 0,4 мкм); видимый (VIS от 0,4 до 0,76 мкм); ближний инфракрасный (ИК) (NIR от 0,76 до 0,9 мкм); коротковолновый ИК (SWIR от 0,9 до 3,0 мкм); средневолновый ИК (MWIR от 3 до 5 мкм); длинноволновый ИК (LWIR от 8 до 14 мкм). Также производятся оптико-электронные приборы, совмещающие в себе несколько оптических каналов, работающих в разных диапазонах. В подобных приборах идет разделение, например для работы в дневное время используется канал видимого излучения, а в ночное время или в условиях недостаточной видимости – инфракрасный канал или эти каналы работают одновременно для обеспечения единовременного наблюдения в нескольких диапазонах.

Применение двух и многодиапазонных матричных фотоприемных устройств, в которых рабочие спектральные диапазоны принимаются непосредственно одним приемником излучения, позволяет упростить оптическую схему современных ОЭС, уменьшить их габариты, массу, энергопотребление и увеличить быстродействие. Вместе с такими системами успешно функционируют двух и многоканальные ОЭС, в которых разделение на отдельные спектральные каналы происходит в оптической системе. В таких ОЭС разделение по спектральным диапазонам осуществляется разветвлением оптической системы для каждого используемого спектрального канала.

В настоящее время существует ряд задач, требующих использования единой оптической системы для одновременной работы в нескольких оптических диапазонах спектра. Тем самым, используя материал прозрачный в нескольких диапазонах спектра, можно уменьшить массогабаритные характеристики и упростить юстировку прибора.

В последние годы одним из перспективных направлений развития оптико-электронных приборов являются беспилотные аппараты (мини-, микро-, нанодроны). Данные устройства, стали широко применяться для различных целей: наблюдение, разведка, дистанционное зондирование, навигация и т. д.

Анализ оптических материалов

Оптические кристаллы – это кристаллы, которые можно использовать для направления луча света, имеющие правильное периодическое расположение атомов, ионов и молекул [1].

Эти кристаллы применяют в построении оптических систем для получения необходимых оптических характеристик, в частности использования более широкого спектрального диапазона в отличии от обычных стекол. Пример некоторых кристаллов с диапазоном пропускания представлен в табл. 1 [2, 3].

Таблица 1

Спектральные диапазоны пропускания оптических кристаллов

Материал	$\Delta\lambda$, мкм
NaCl	от 0,20 до 18,0
KBr	от 0,25 до 25,0
KCl	от 0,30 до 20,0
CaF ₂	от 0,15 до 7,5
BaF ₂	от 0,30 до 15,0
ZnSe	от 0,60 до 20,0
ZnS	от 0,40 до 14,0

Далее, в табл. 2, указаны показатели преломления некоторых материалов в диапазоне длин волн до 14 мкм [4, 2].

Таблица 2

Показатели преломления n оптических кристаллов в диапазоне длин оптического излучения от 0,15 до 14 мкм

Материал	λ , мкм													
	0,15	0,2	0,48	0,546	0,643	0,9	3	4	5	6	8	10	12	14
	n													
NaCl	1,6	1,59	1,56	1,55	1,54	1,53	1,53	1,52	1,52	1,52	1,51	1,50	1,48	1,46
KBr	-	-	1,58	1,56	1,55	1,54	1,54	1,54	1,54	1,53	1,53	1,52	1,52	1,51
KCl	1,83	1,72	1,5	1,49	1,48	1,48	1,47	1,47	1,47	1,47	1,46	1,45	1,44	1,43
CaF ₂	1,58	1,49	1,44	1,43	1,43	1,43	1,41	1,4	1,40	1,39	1,35	1,31	-	-
BaF ₂	-	-	1,48	1,48	1,47	1,47	1,46	1,45	1,45	1,44	1,43	1,40	-	-
ZnSe	-	-	-	2,67	2,6	2,5	2,44	2,43	2,43	2,42	2,41	2,4	2,39	2,38
ZnS	-	-	2,43	2,39	2,34	2,3	2,26	2,25	2,46	2,4	2,2	2,2	2,17	2,14

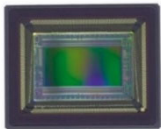



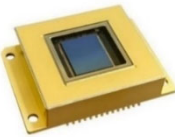
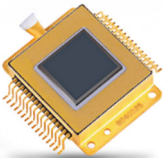
Конструкция многодиапазонных систем требует материалов, пропускающих излучение в широкой полосе оптического спектра излучения.

Анализ многодиапазонных приемников излучения

К другим направлениям разработки широкодиапазонных ОЭС идет применение многодиапазонных матричных приемников для обеспечения одновременного считывания сигналов в нескольких рабочих спектральных диапазонах. Примеры некоторых фотоприемных матриц (ФПМ), приведены в табл. 3 [5].

Анализ известных приемников излучения показал, что существуют единые ФПМ для UV, VIS и NIR, а также единые ФПМ MWIR и LWIR диапазонов спектра. Такое положение дает возможность построения широкодиапазонной оптической системы с двумя плоскостями изображения для двух типов ФПМ.

Многодиапазонные приемники излучения

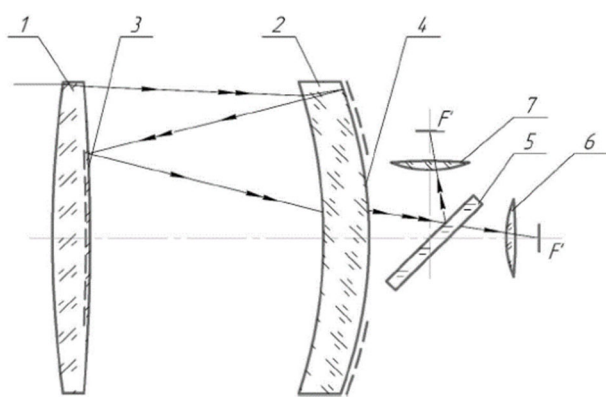
Обозначение	Вид	Размер пиксела, мкм	Разрешение	Габариты приемника, мм
VIS (0,4 – 0,75 мкм) / NIR (0,75 – 1,1 мкм)				
GMAX2509		2,5 × 2,5	4200 × 2160	11,81 (Диагональ)
UV (0,2 – 0,4 мкм) / VIS (0,4 – 0,75 мкм) / NIR (0,75 – 1,1 мкм)				
GLUX9701BSI		9,76 × 9,76	1280 × 1024	12,493 × 9,994
VUV/EUV (10 – 200 нм) / UV (0,2 – 0,4 мкм) / VIS (0,4 – 0,75 мкм) / NIR (0,75 – 1,1 мкм)				
GSENSE2020BSI-PS		6,5 × 6,5	2048 × 2048	18,83 (Диагональ)
VIS (0,4 – 0,75 мкм) / NIR (0,75 – 1,1 мкм) / SWIR (0,9 – 1,7 мкм)				
IMX991-AABJ-C		5 × 5	640 × 512	4,10 (Диагональ)
VIS (0,4 – 0,75 мкм) / SWIR (0,9 – 1,7 мкм)				
GH-SW640Pro		15 × 15	640 × 512	9,60 × 7,68
MWIR (3 – 5 мкм) / LWIR (8 – 14 мкм)				
GWIR 0202X1A (Gas)		25 × 25	384 × 288	9,60 × 7,20

Анализ моделей оптической системы с использованием нескольких приемников излучения

Известные модели однообъективных многодиапазонных оптических систем с использованием нескольких фотоприемных устройств.

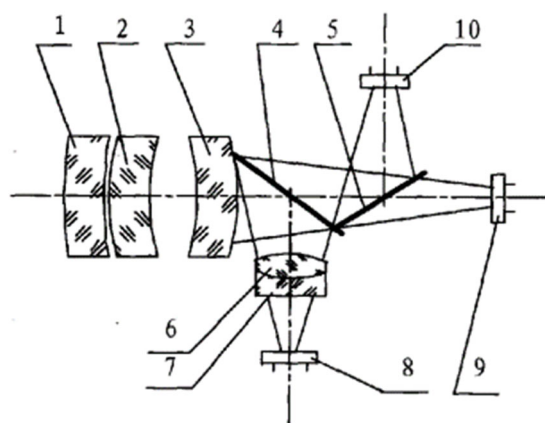
Зеркально-линзовая система (рис. 1), патент RU98072U1_20100927 [6, 7].

Линзовая система (рис. 2), патент CN102103265B [8].



1 – 4 – объектив; 5 – спектроделительное зеркало; 6, 7 – корректирующая линза

Рис. 1. Зеркально-линзовый объектив



1 – 3 – объектив; 4, 5 – спектроделительное зеркало; 6, 7 – корректирующая линза; 8 – 10 – ФПУ

Рис. 2. Линзовый объектив

По причине ограничений фотоприемных устройств по фиксируемому спектральному диапазону в конструкции оптической системы необходимо использовать спектроделительные зеркала для разделения принимаемого излучения.

Габаритный расчет параметров оптической системы

При разработке конструкции многодиапазонной видеокамеры планируются рабочие диапазоны спектра от UV (от 0,2 до 0,4 мкм) до LWIR (от 8 до 14 мкм).

Для предварительного расчета параметров оптической системы были выбраны фотоприемные устройства (табл. 4).

Таблица 4

Фотоприемные устройства

Обозначение	Диапазон	Размер пикселя, мкм	Формат матрицы	Диагональ матрицы, мм	Габаритный размер, мм
GLUX9701 BSI	от UV (0,2) до NiR (1,1)	9,76×9,76	1280×1024	16	15,5×13,0
GWIR0202X1A (GAS)	от MWIR (3) до LWIR (14)	25×25	384×288	12	13,2×10,8

Используя схему с делительной пластиной и габаритные размеры ФПУ было смоделировано их минимальное расположение в системе на оптической оси, что показано на рис. 3.

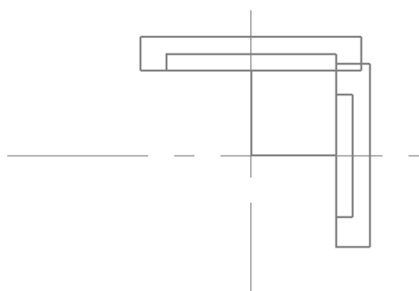


Рис. 3. Расположение ФПУ в оптической схеме

Из рис. 3 следует, что минимальное фокусное расстояние объектива (f_{OB}) должно быть 15 мм.

После чего по формуле (1) [11] можно найти угловое поле зрения 2ω .

Относительное отверстие выберем 1:2.

При дальнейшей разработке необходимо учесть толщины и количество оптических элементов конструкции, допуски и реальные габариты фотоприемных устройств, в связи с этим, на этапе расчета, минимальное значение фокусного расстояния (f_{OB}) можно принять за 20 мм, а диаметр входного зрачка ($D_{ВХ}$) за 10 мм.

Поэтому угловое поле зрения для каждого приемника равно:

$$2\omega \leq 2 \cdot \arctan\left(\frac{D_{\phi} / 2}{f_{об}}\right), \quad (1)$$

$$2\omega_1 \leq 2 \cdot \arctan\left(\frac{16 / 2}{20}\right) \leq 43,6^\circ, \quad (2)$$

$$2\omega_2 \leq 2 \cdot \arctan\left(\frac{12 / 2}{20}\right) \leq 33,4^\circ, \quad (3)$$

где D_{ϕ} – диагональ фотоприемных устройств: $D_{\phi 1} = 16$ мм, $D_{\phi 2} = 12$ мм.

Разработка оптической схемы

Для разработки оптической схемы было принято решение использовать материалы NaCl и ZnS.

Используя расчетные данные и выбранные материалы, в компьютерной программе по расчету оптических систем были смоделированы различные системы. Примеры некоторых из них представлены на рис. 4 – 7.

Качество изображения, на данный момент, не соответствует заявленным размерам пиксела фотоприемных матриц, так как процесс оптимизации системы еще не закончен. При неудовлетворительном результате оптимизации возможен вариант с заменой оптического материала системы или ФПМ.

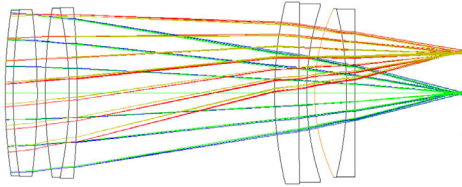


Рис. 4. Оптическая система MWIR- LWIR канала

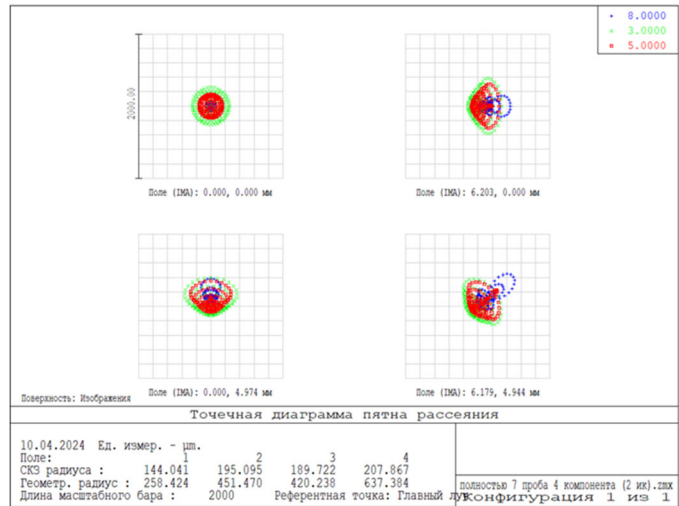


Рис. 5. Диаграмма пятна рассеяния MWIR- LWIR канала

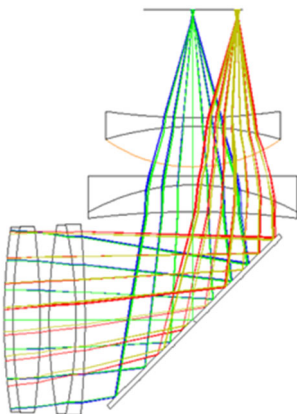


Рис. 6. Оптическая система VIS-NIR канала

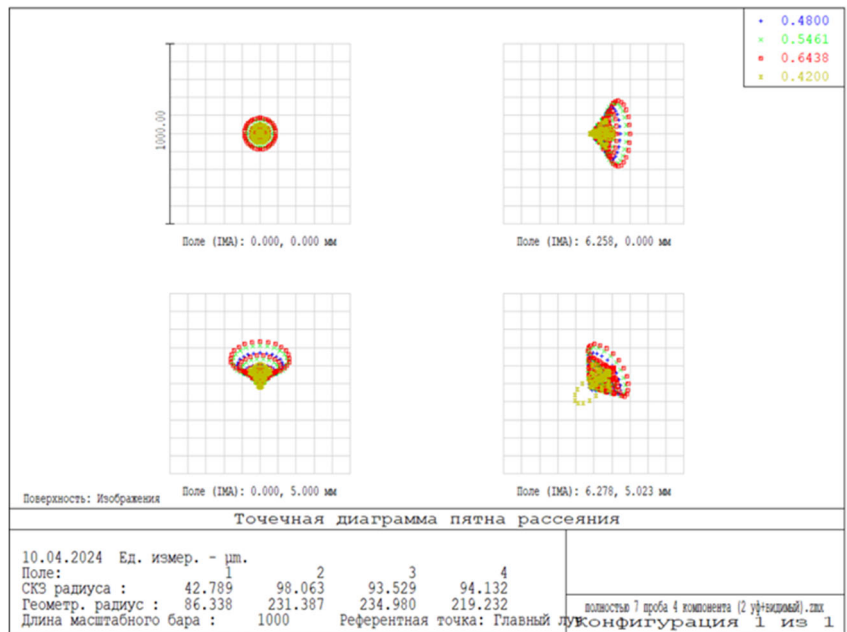
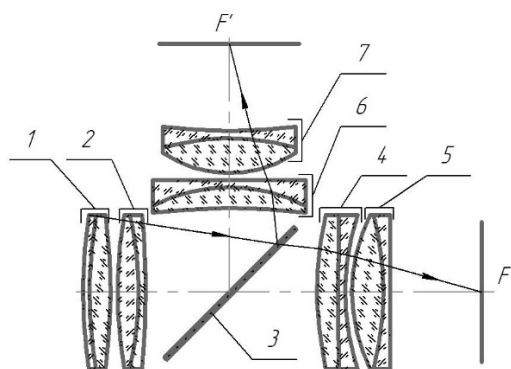


Рис. 7. Диаграмма пятна рассеяния VIS-NIR канала

Компоновка оптической схемы, с разделением оптической оси на два канала, показана на рис. 8.



1 – склейка линз общего канала из материалов ZnS, NaCl; 2 – склейка линз общего канала из материалов NaCl, ZnS; 3 – спектроделительное зеркало; 4 – склейка линз MWIR- LWIR канала из материалов ZnS, NaCl; 5 – склейка линз MWIR- LWIR канала из материалов NaCl, ZnS; 6 – склейка линз VIS-NIR канала из материалов ZnS, NaCl; 7 – склейка линз VIS-NIR канала из материалов NaCl, ZnS

Рис. 8. Оптическая схема линзового объектива со спектроделительным зеркалом

Линзовые склейки 1, 2 являются общей входной частью приема излучения, далее идет спектроделительное зеркало 3, разделяющее спектральный диапазон на два фотоприемных устройства. Далее идут линзовые склейки 4, 5, которые являются частью MWIR- LWIR канала, а линзовые склейки 6, 7 являются частью VIS-NIR канала.

Заключение

В ходе работы были проанализированы и рассмотрены материалы оптических элементов и конструкции многодиапазонных систем. Разработка широкодиапазонной малогабаритной видеокамеры является актуальной задачей для современной оптической промышленности. Предлагается предварительная схема устройства объектива камеры, пропускающего в диапазоне от 0,42 мкм до 14 мкм и работающего с двумя приемниками излучения (VIS-NIR, MWIR-LWIR).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ефремов В. С. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем: учеб. справочник / В. С. Ефремов, В. Б. Шлишевский. - Новосибирск : СГГА, 2013. - 284 с.
2. Alkor.net : Оптические кристаллы для ИК и УФ спектра : URL : <https://alkor.net/alkorru/Materials1.html?yclid=2492381920917716991/> – Текст : электронный.
3. Luminophor.ru : Цинк сульфид : URL : <https://luminophor.ru/catalog/plenko-obrazuyushchie-materialy/khalkogenidy/tsink-sulfid/> – Текст : электронный.
4. Салимгареев Д. Д. Оптические свойства и применение кристаллов системы AgBr – TlBr_{0,46}I_{0,54}/ Д. Д. Салимгареев. – Екатеринбург, 2018. – 155 с.
5. Npk-photonica.ru : Сенсоры UV (ультрафиолетового), VIS (видимого) и IR (инфракрасного) диапазонов для применения в промышленных изделиях. : URL : <https://www.npk-photonica.ru/product/sensors/filter/clear/apply/>.

6. Егоренко М. П. Многозонная зеркально-линзовая система с зеркалами Манжена / М. П. Егоренко. Дисс. канд. техн. наук. Новосибирск, 2022. – 157 с.
7. Патент RU 98 072(13) U1. Новосибирск, (RU) Двухспектральная зеркально-линзовая система; № 2010108755/22; заявл: Март. 09, 2010; опубл: Сентябрь. 27, 2010 / М. П. Егоренко, В. С. Ефремов; заявитель и правообладатель: ГОУ ВПО "СГГА" (RU) – 10 с.
8. Патент CN102103265B. Пекин, (CN) Однообъективная мультиспектральная оптическая система формирования изображений; № 201010614376.3; заявл: Декабрь. 21, 2010; опубл: Май. 16, 2012 / Ван Цяньцян, Пэн Чжунлинь Юна; заявитель и правообладатель: Пекинский технологический институт ВИТ (CN) – 8 с.
9. McDowell M. W. Achromatization in the 3 to 5 μ m spectral region with visible light transmitting materials / M. W. McDowell, H. W. Klee. Optical Engineering 23(2), 1984. –187-192 с.
10. Wakaki M. Physical Properties and Data of Optical Materials / M. Wakaki, K. Kudo, T. Shibuya. – Taylor & Francis Group, LLC, 2007. – 560 с.
11. Слюсарев, Г. Г. Расчет оптических систем / Г. Г. Слюсарев. – Москва. Изд-во Машиностроение, 1975. – 640 с.

© А. Г. Хаустов, М. П. Егоренко, 2024