

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-1-8

УДК 681.78; 621.3; 621.396; 004.932

Многоспектральная оптико-электронная система

Алексей Владимирович Григорьев¹, Анатолий Владимирович Демин²,
Евгений Николаевич Сечак³✉

¹ АО «Вологодский оптико-механический завод», Вологда, 160009, Российская Федерация

^{2,3} АО «ЛМО», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация

¹ scpence@vomz.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4695-6766>

² dav_60@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2605-0964>

³ sechakevgeny@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8810-2022>

Аннотация

Введение. Аэрофотооборудование и космические системы дистанционного зондирования поверхности Земли позволяют решать разнообразные задачи в условиях быстро изменяющихся оптико-физических параметров и динамики полета. Несмотря на свои преимущества, аэрофотографирование имеет ряд недостатков, которые ограничивают его применение в реальных условиях. К таким недостаткам можно отнести необходимость высокого уровня технологии процесса получения аэрофотоснимка и сравнительно большой срок обработки фотоматериалов в условиях быстро меняющихся техногенных процессов в зоне мониторинга. В данной работе рассмотрена актуальная задача создания многоспектральной оптико-электронной системы (комплекса) дистанционного зондирования Земли. Разработанная система позволяет получать информацию о характеристиках поверхности Земли преимущественно в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Основным достоинством мультиспектральных оптических и оптико-электронных комплексов является возможность работы в любое время суток и время года. Описан принцип построения авиационных интегрированных многоспектральных оптико-электронных систем, работающих на высоте до стратосферы, и основные его компоненты. Показаны возможности и перспективы применения таких систем в различных областях, включая мониторинг и управление. **Метод.** Предложена структурно-функциональная схема устройства, включающая независимые каналы сбора, хранения и передачи информации. Функциональное назначение экспериментального образца — поиск и обнаружение объектов ниже облаков в инфракрасном диапазоне. Канал видимого диапазона выполняет функцию ориентации зрительного восприятия оператора в пространстве и получения изображения объекта. Для передачи собранной информации предусмотрен канал лазерной связи. **Основные результаты.** Исследования экспериментального образца авиационного двухканального оптико-электронного комплекса, конструктивно выполненного как комплексированная техническая система с независимыми каналами и работающая в видимой и инфракрасной областях спектра, показали высокую точность и эффективность работы системы. Точность работы системы стабилизации составила около $7 \cdot 10^{-9}$ с⁻¹, дальность действия в инфракрасном диапазоне спектра не менее 150 км, необходимое время экспозиции не более 2 с. **Обсуждение.** Результаты работы могут быть использованы для дальнейшего развития и усовершенствования многоспектральных оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова

многоспектральные оптико-электронные комплексы, оптическая система, 3D-модель, аэросъемка, лазерная связь

Ссылка для цитирования: Григорьев А.В., Демин А.В., Сечак Е.Н. Многоспектральная оптико-электронная система // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 1–8. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-1-8

Multispectral optoelectronic system

Alexey V. Grigoriev¹, Anatoliy V. Demin², Evgenii N. Sechak³✉

¹ JSC "Vologda Optical and Mechanical Plant", Vologda, 160009, Russian Federation

^{2,3} JSC "LOMO", Saint Petersburg, 194044, Russian Federation

¹ scpence@vomz.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4695-6766>

² dav_60@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2605-0964>

³ sechakevgeny@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8810-2022>

Abstract

Aerial photography equipment and space systems for remote sensing of the Earth's surface make it possible to solve various problems in conditions of rapidly changing optical and physical parameters and flight dynamics. Despite its advantages, aerial photography has a number of disadvantages that limit its application in real conditions: the need for a high level of technology for obtaining an aerial photograph, a relatively long period of processing photographic materials in conditions of rapidly changing man-made processes in the monitoring zone. This article discusses the urgent task of creating a multispectral optical-electronic system (complex) for remote sensing of the Earth, which allows obtaining information about the characteristics of the surface in different spectral ranges, primarily in the visible and infrared. The main advantage of multispectral optical and optical-electronic complexes is the ability to work at any time of day or night and at any time of year. The article discusses the principle of constructing aviation integrated multispectral optical-electronic systems operating at an altitude of up to the stratosphere, and its main components. From a modern perspective, the possibilities and prospects for using such systems in various fields, including monitoring and control, are shown. A structural and functional diagram of the device is proposed, including independent channels for collecting, storing and transmitting information. The functional purpose of the experimental sample is to search for and detect objects below the clouds in the infrared range. The visible range channel performs the function of orienting the operator's visual perception in space and obtaining an image of the object. A laser communication channel is provided for transmitting the collected information. Studies of the experimental sample of the aviation two-channel optical-electronic complex, structurally implemented as an integrated technical system with independent channels and operating in the visible and infrared spectral regions, showed high accuracy and efficiency of the system. The accuracy of the stabilization system was about $7 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, the range in the infrared range is at least 150 km, the required exposure time is no more than 2 s. The results of the work can be used for further development and improvement of multispectral optical-electronic systems for remote sensing of the Earth.

Keywords

multispectral optoelectronic complexes, optical system, 3D model, aerial photography, laser communication

For citation: Grigoriev A.V., Demin A.V., Sechak E.N. Multispectral optoelectronic system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 1–8 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-1-8

Введение

Аэрофотооборудование и космические системы дистанционного зондирования поверхности Земли (ДЗЗ) позволяют решать разнообразные задачи в условиях быстро изменяющихся оптико-физических параметров и динамики полета. Однако, несмотря на свои преимущества, аэрофотографирование имеет ряд недостатков, которые ограничивают его применение в реальных условиях. В частности, существует потребность высокого уровня технологии процесса получения аэрофотоснимка. Сравнительно большой срок обработки фотоматериалов делает получение информации в реальном масштабе времени нецелесообразным для динамически изменяющихся техногенных процессов в зоне мониторинга [1–4].

Внедрение в практику бортовых авиационных многоспектральных оптико-электронных комплексов, работающих в диапазоне электромагнитного излучения (0,28–1000 мкм), позволяет расширить круг решаемых научно-технических задач при зондировании поверхности Земли и атмосферы на фоне оптико-физических помех.

Основным преимуществом мультиспектральных оптических и оптико-электронных комплексов является возможность работы в любое время суток и время года, поскольку любой объект в соответствии с зако-

ном Планка является источником электромагнитного излучения [1–8].

Установление информационного контакта многоспектральной оптико-электронной системы (МОЭС) с объектом по сути является решением задачи «вскрытия» (поиск, обнаружение, идентификация, пеленгация) объекта на фоне помех. При этом, если в видимом диапазоне спектра излучения объект наблюдается за счет его подсветки естественным или искусственным источником потока фотонов, а оптический и геометрический контраст объекта зависит от фона и является признаком «вскрытия», то в инфракрасном диапазоне это возможно за счет термодинамического контраста излучения объекта и фона, формируемого за счет двух независимых физических факторов [1, 5, 7, 9].

В последние годы наблюдается стремительный рост интереса к использованию авиационных и космических систем ДЗЗ для решения различных задач, таких как мониторинг окружающей среды, управление природными ресурсами, наблюдение за изменениями климата и др. Однако для эффективного решения этих задач необходимы более точные и быстрые методы получения информации.

Например, система Multispectral Camera Array компании ITRES [10], представляет собой комплекс из четырех камер, работающих в разных спектральных диапазонах (синий, зеленый, красный и ближний ин-

фрактальный). Однако эта система имеет ряд недостатков, таких как ограниченная разрешающая способность и необходимость дополнительной обработки данных для получения точной информации.

Система Airborne Imaging Spectrometer for Applications компании SPECIM [10] представляет собой гиперспектральную камеру, работающую в диапазоне от 400 до 1000 нм. Известно, что эта система имеет высокую стоимость и требует специального оборудования для обработки информации.

Система Compact Airborne Spectrographic Imager компании ITRES [10] представляет собой компактную гиперспектральную камеру, работающую в диапазоне от 400 до 1000 нм. Система имеет ограниченную разрешающую способность и требует дополнительной обработки данных для получения точной информации.

Анализ научных работ показал, что МОЭС в основном создаются как комплексированные, и только в системах спектрального анализа — комбинированные, в которых присутствует изображение анализируемого объекта (как правило — спектральный анализ материалов и биологических объектов). Главный недостаток комплексированных и комбинированных МОЭС — все изображения наблюдаемой сцены в разных спектрах анализируются оператором раздельно. Это не позволяет создать единую картину, т. е. идентифицировать интересующий объект с его типом и соответствующей привязкой на местности, что необходимо в системах управления особенно когда анализ необходимо выполнять в реальном масштабе времени [1–4, 10–13].

Преимущество аэросъемки поверхности Земли с помощью МОЭС, в отличие от панхроматической аэрофотосъемки, — данные системы позволяют получать информацию в большем объеме и в масштабе реального времени. Это дает возможность более эффективно решать задачи мониторинга и управления, такие как обнаружение изменений в окружающей среде, наблюдение за движением транспорта и т. п.

В настоящей работе рассматривается принцип построения авиационных интегрированных МОЭС, работающих на высоте до стратосферы, и основные их компоненты. Изучены возможности и перспективы применения, интегрированных МОЭС в различных областях, включая мониторинг и управление.

Функциональный состав и возможности МОЭС

МОЭС ДЗЗ представляет собой сложную систему, которая включает в себя несколько функциональных блоков, работающих вместе для получения и обработки данных. Функциональный состав такой системы может быть представлен следующим образом:

- блок сбора данных — включает сенсоры различных типов (камеры, спектрометры, радары и т. д.), которые собирают данные об окружающей среде;
- блок обработки данных — состоит из процессоров (центрального процессорного узла, графического процессорного узла, программируемой логической интегральной схемы и т. д.), которые обрабатывают данные, собранные сенсорами;

— блок управления — содержит системы (управления полетом, управления сенсорами и др.), которые управляют работой МОЭС ДЗЗ;

— блок передачи данных — объединяет системы, которые передают данные, собранные и обработанные системой, на Землю или в другие системы;

— блок питания — обеспечивает питание системы (батареи, солнечные панели и т. д.).

МОЭС ДЗЗ имеет следующие функциональные возможности: сбор данных (получение данных об окружающей среде в различных спектральных диапазонах); обработка данных (анализ данных, собранных сенсорами, для получения информации об окружающей среде); управление (система управления работой, включая управление полетом, сенсорами и др.); передача данных (пересылка информации, собранной и обработанной системой, на Землю или в другие системы).

Функциональный состав МОЭС представлен в варианте его исполнения для съемки поверхности Земли в диапазонах электромагнитного излучения: 0,38–0,95 мкм, 3–5 мкм, 7,5–12 мкм.

Преимущество МОЭС ДЗЗ — повышенная точность. Система может обеспечить более точные данные, чем отдельные сенсоры и более высокую скорость обработки данных, чем отдельные процессоры. Также МОЭС имеет более высокую гибкость в выборе сенсоров и процессоров.

МОЭС можно рассматривать как сложную техническую систему, функционирующую за счет действия совокупности законов физической оптики, механики, термодинамики, электродинамики и информатики, на вход которой поступает электромагнитное излучение оптического диапазона от объекта и фона, а на выходе — информация [11].

Структура МОЭС может состоять из двух или нескольких оптических каналов и подразделяется на три типа [2, 8, 11]. В первом типе МОЭС (комплексированная) оптические каналы объединены в единую конструкцию, в этом случае их оптические оси параллельны (такая конструкция позволяет увеличить разрешающую способность системы и повысить точность измерений), а для второго типа (комбинированная) — оптические каналы объединены путем полного или частичного совмещения их оптических осей (это дает возможность уменьшить размеры системы и повысить ее компактность). Третий тип (интегрированная) — оптические каналы МОЭС объединены на основе оптической системы, которая формирует единое многоспектральное изображение (можно получить полную информацию о наблюдаемом объекте и повысить точность измерений).

Компонентами МОЭС, обеспечивающими решение основной задачи — «вскрытие» объекта, — являются мультиспектральная оптическая система, которая позволяет собирать информацию о наблюдаемом объекте в различных спектральных диапазонах, и система приема и преобразования информации (СППИ) — принимающая и преобразовывающая информацию, собранную мультиспектральной оптической системой. На современном этапе СППИ должна обладать элементами искусственного интеллекта, которые позволяют авто-

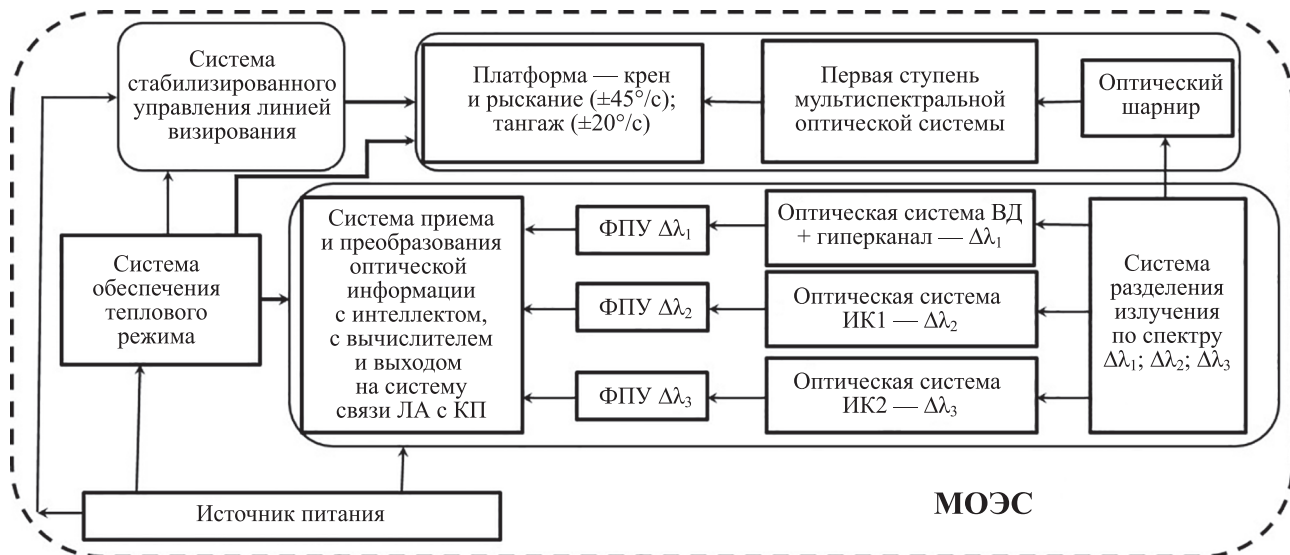


Рис. 1. Функциональный состав авиационной многоспектральной оптико-электронной системы: ЛА с КП — летательный аппарат с командным пунктом; ВД — видимый диапазон; ФПУ — фотоприемное устройство; ИК1 — инфракрасный диапазон 1; ИК2 — инфракрасный диапазон 2; $\Delta\lambda_1$ — диапазон электромагнитного излучения 0,38–0,95 мкм, $\Delta\lambda_2$ — диапазон электромагнитного излучения 3–5 мкм; $\Delta\lambda_3$ — диапазон электромагнитного излучения 7,5–12 мкм

Fig. 1. Functional composition of an aviation multispectral optoelectronic system: МОЭС is Multispectral Optical Electronics System; ЛА с КП is an aircraft with a control panel and with a command post; ВД is the visible range; ФПУ is a photodetector; ИК1 is the infrared range 1; ИК2 is the infrared range 2; $\Delta\lambda_1$ is the range of electromagnetic radiation 0.38–0.95 μ , $\Delta\lambda_2$ is the range of electromagnetic radiation 3–5 μ ; $\Delta\lambda_3$ is the range of electromagnetic radiation 7.5–12 μ

матически обрабатывать и анализировать полученную информацию [11].

Основными характеристиками МОЭС являются спектральный диапазон работы, разрешающая способность, светосила, оптическая передаточная функция, угол поля зрения, фокусное расстояние (таблица).

Спектральный диапазон работы определяет возможности системы в различных областях применения. Например, системы, работающие в видимом спектральном диапазоне, могут быть использованы для наблюдения за объектами на поверхности Земли, а системы, работающие в инфракрасном диапазоне — для наблюдения за объектами в атмосфере или за пределами Земли.

Для решения задачи одновременного анализа пространственного распределения и спектральных харак-

теристик наблюдаемых объектов, процессов и явлений в МОЭС вводится гиперспектральный съемочный канал. Для гиперспектральной съемки важно количество спектральных зон (каналов), ширина зоны и последовательность измерений, при этом ширина каждой спектральной зоны не более 10 нм (в видимом диапазоне — 4 нм).

«Гиперкуб» входных данных, состоящий из строк и столбцов, является трехмерной матрицей, включающей пространственное распределение яркостей в поле зрения МОЭС и длин волны регистрируемого излучения. Поскольку «гиперкуб» данных получается в результате обусловленных условий съемки, и является впоследствии базой, а «гиперкуб», полученный в результате гиперспектроскопической съемки в реальных условиях и масштабе времени, однозначно не соответствуют базе,

Таблица. Основные характеристики и факторы, влияющие на МОЭС

Table. The main characteristics and factors affecting the Multispectral Optical Electronics System (MOES)

Основные характеристики	Возможности системы	Основные параметры
Разрешающая способность	различает два близких объекта	диаметр входного зрачка, фокусное расстояние и спектральный диапазон работы
Светосила	собирает свет от наблюдаемого объекта	
Оптическая передаточная функция	описывает связь между оптическими параметрами наблюдаемого объекта и его изображением	
Угол поля зрения	угол, под которым наблюдаемый объект виден в изображении	диаметр входного зрачка и фокусное расстояние
Фокусное расстояние	определяет расстояние между оптической системой и наблюдаемым объектом, при котором изображение объекта формируется в фокальной плоскости	диаметр входного зрачка и спектральный диапазон работы

то для принятия решения о правильном распознавании и идентификации наблюдаемого объекта требуется время (возможно, не малое). В этой связи применение искусственного интеллекта при анализе результатов гиперспектроскопической съемки позволяет принять объективное и правильное решение в реальном масштабе времени [14–16].

СППИ с искусственным интеллектом, с вычислителем и выходом на систему связи летательных аппаратов с командным пунктом на Земле является основной подсистемой формирования выходной информации на основании пространственно-энергетической связи поверхности Земли и фотозоной, создаваемой оптической системой. Фотозона формируется фотоприемниками с предусилителями, каждый из которых работает в своей спектральной зоне и реагирует в видимом диапазоне на поток фотонов, а в инфракрасном диапазоне — на тепловое излучение.

Фотоприемные матрицы располагаются на прецизионной посадочной поверхности и согласованы с рабочей системой координат МОЭС. Следует отметить, что геометрическая проекция пиксела на поверхности Земли в надири должна быть не больше требуемого от МОЭС линейного разрешения на поверхности Земли, а чувствительность приемника при соответствующей площади входного зрачка оптической системы МОЭС должна обеспечивать необходимое отношение сигнал/шум [11, 15, 16].

Система распознавания объекта в МОЭС формирует интегрированное изображение с применением результатов гиперспектральной съемки и искусственного интеллекта в реальном масштабе времени. Если на летательном аппарате нет возможности иметь компьютер, то задача распознавания решается на командном пункте путем оперативной передачи информации. Более полное раскрытие принципов построения СППИ является предметом отдельной работы, когда важно учитывать влияние атмосферы [17], качество оптического изображения [18] и аспекты восприятия изображения [19].

Оптическая линия лазерной связи

Применение оптических линий лазерной связи позволяет преодолеть проблемы радиочастотных линий связи, связанные с необходимостью передачи больших объемов информации (особенно видеоинформации) со скоростью не менее 1,2 Гбит/с (скорость передачи информации по радиолинии не более 0,1 Гбит/с). При практической реализации методов лазерной связи неизбежно возникает множество технических проблем, в частности с малой расходимостью лазерного пучка и требованием значительно более точного его позиционирования относительно командного пункта, чем радиолуч. Тем самым необходимо в состав МОЭС ввести канал лазерной связи (канал дуплексной лазерной связи или терминал, который может быть отдельно размещен на борту летательного аппарата), у которого приемопередающая оптическая антенна постоянно ори-

ентирована на командный пункт [16, 20, 21]. Это позволит обеспечить стабильную связь между летательным аппаратом и командным пунктом и передавать данные в режиме реального времени. Система стабилизации должна обеспечивать стабильное положение линии визирования и компенсировать механические воздействия на комплекс от летательного аппарата. Таким образом, для корректной приемо-передачи информации с борта летательного аппарата на командный пункт необходимо учитывать большой перечень внешних дестабилизирующих факторов, ключевые аспекты и подробное описание которых представлены в работах [12, 20, 21].

Алгоритмы обработки сигналов в МОЭС должны быть разработаны с учетом специфики системы и задач, которые она решает. Это включает в себя разработку алгоритмов фильтрации, компенсации и коррекции сигналов, а также алгоритмов распознавания и классификации объектов.

Таким образом, МОЭС является сложной системой, которая требует решения многих технических проблем для обеспечения стабильной и точной работы. Применение оптических линий лазерной связи и системы стабилизированного управления линией визирования позволяет преодолеть некоторые из этих проблем и обеспечить стабильную связь между летательным аппаратом и командным пунктом.

Структурно-функциональная схема МОЭС

Структурно-функциональная схема инфракрасного канала представлена на рис. 2. Эта схема включает оптическую систему инфракрасного канала, фотоприемное устройство, блок электронной обработки, устройство управления по тангажу.

На рис. 3 представлена сборка МОЭС, выполненная на этапе эскизного проектирования. МОЭС включает в себя оптические системы видимого и инфракрасного каналов, опорно-поворотное устройство оптических каналов по тангажу и рысканию, креновую платформу с устройством управления. Подробное описание оптико-механического блока на опорно-поворотном устройстве представлено в работе [11]. В результате создания рабочей конструкторской документации на изделие с последующим изготовлением и корректировкой расчета изготовлен экспериментальный образец (рис. 4). В ходе наземной экспериментальной отработки были проведены испытания для подтверждения заложенных технических характеристик изделия, после которых было принято решение об изготовлении опытного образца для летных испытаний в реальных условиях эксплуатации.

Функциональное назначение экспериментального образца — поиск и обнаружение объектов ниже облаков в инфракрасном диапазоне. Канал видимого диапазона выполняет функцию ориентации зрительно-го восприятия оператора в пространстве и получения изображения объекта.

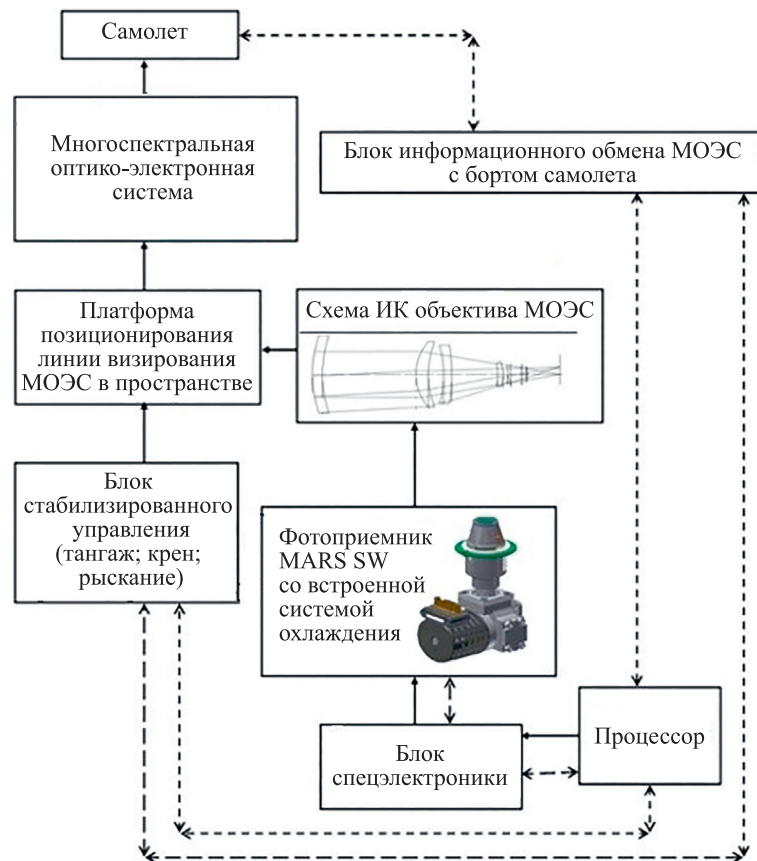


Рис. 2. Структурно-функциональная схема инфракрасного канала двухканальной авиационной многоспектральной оптико-электронной системы

Fig. 2. Structural and functional diagram of the infrared channel of a two-channel aviation MOES

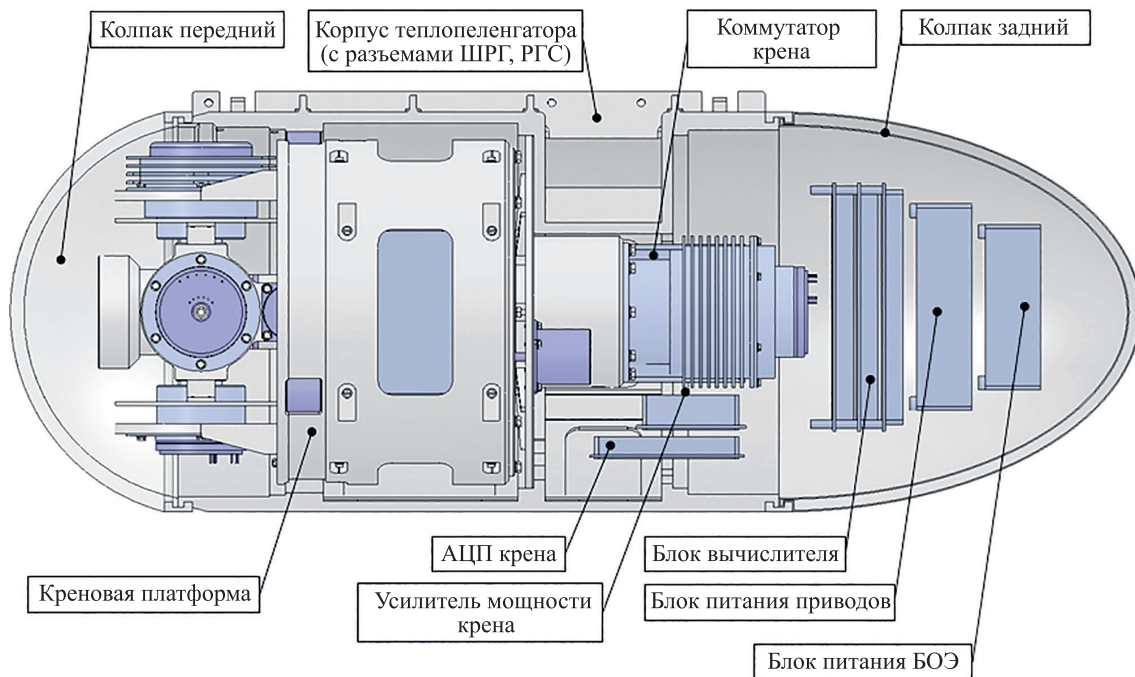


Рис. 3. Компонентная модель многоспектральной оптико-электронной системы:

РГС — разъем герметичный с защитой; ШРГ — штепсельный разъем герметичный; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; БОЭ — блок оборудования энергетического

Fig. 3. Layout model of a multispectral optoelectronic system: ШРГ — hermetically sealed connector; РГС — hermetically sealed plug connector; АЦП — analog-to-digital converter; БОЭ — power equipment unit

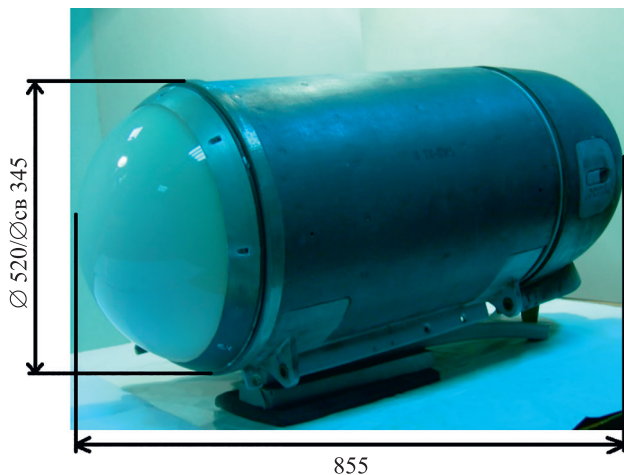


Рис. 4. Экспериментальный образец многоспектральной оптико-электронной системы. Габаритные размеры образца: длина 855 мм; диаметр 520 мм; световой диаметр системы 345 мм

Fig. 4. An experimental sample of a multispectral optoelectronic system. Overall dimensions of the sample: length 855 mm; diameter 520 mm; light diameter of the system 345 mm

Заключение

Показаны преимущества аэросъемки поверхности Земли с помощью многоспектральной оптико-электронной системы, которые, в отличие от панхроматической

аэрофотосъемки, позволяют получать информацию в большем объеме и в масштабе реального времени. Это достигается за счет использования многоспектральных оптико-электронных систем, которые могут собирать информацию в различных спектральных диапазонах, включая видимый и инфракрасный.

Впервые предложена структурно-функциональная схема многоспектральной оптико-электронной системы, которая позволяет разработчику комплексов помимо проектирования создавать методику комплексного экспериментального исследования. Схема включает в себя следующие основные компоненты: оптические системы, системы стабилизации, системы управления и системы передачи данных. Оптические системы включают в себя многоспектральные камеры, которые могут собирать информацию в различных спектральных диапазонах. Для обеспечения передачи результатов аэросъемки многоспектральной оптико-электронной системы на командный пункт Земли предусмотрена лазерная связь, которая позволяет передавать большие объемы данных в режиме реального времени и обеспечивает высокую точность и надежность передачи.

Испытания экспериментального авиационного двухканального оптико-электронного комплекса, разработанного как комплексная техническая система с независимыми каналами, показали его высокую точность и эффективность работы в видимом и инфракрасном диапазонах спектра.

Литература

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Многоспектральные оптико-электронные системы // *Специальная техника*. 2002. № 4. С. 56–62.
2. Алишев Я.В. Многоканальные системы передачи оптического диапазона. Минск: Высшая школа, 1986. 235 с.
3. Кондратьев А.В. Методы обработки цифровой многоспектральной спутниковой информации. СПб.: РГТМИ, 1997. 107 с.
4. Григорьев А.В., Демин А.В. Многоканальные и многоспектральные оптико-электронные комплексы // *Вопросы радиоэлектроники*. Серия: Техника телевидения. 2023. № 3. С. 3–8.
5. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приёмниками излучения. М.: Университетская книга: Логос, 2007. 191 с.
6. Мордвин Н.Н., Попов Г.Н. Концепция построения оптико-электронных приборов наблюдения универсального назначения // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2009. Т. 52. № 6. С. 34–39.
7. Вольф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике. Т. 1. М.: Мир, 1995. 608 с.
8. Моисеев В.А., Терешин Е.А., Демьянов Э.А., Журавлев П.В., Ульянова Е.О., Шатунов К.П., Чурилов С.М. Принципы построения многоспектральных комплексированных оптико-электронных систем // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2004. Т. 47. № 9. С. 51–57.
9. Григорьев А.В., Демин А.В. Имитационная модель пассивного детектирования высокоскоростных летательных аппаратов // *Вопросы радиоэлектроники*. Серия: Техника телевидения. 2023. № 2. С. 55–59.
10. Ma W., Wan Y., Li J., Zhu S., Wang M. An automatic morphological attribute building extraction approach for satellite high spatial resolution imagery // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. N 3. P. 337. <https://doi.org/10.3390/rs11030337>
11. Демин А.В., Цыгулин А.К., Нонин А.С., Семашкин О.И., Михайловский А.И., Добряков Б.Н., Денисов А.В., Сечак Е.Н., Сторошук О.Б. Авиационный многоспектральный оптико-электронный комплекс // *Вопросы радиоэлектроники*. Серия: Техника телевидения. 2024. № 3. С. 18–26.

References

1. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. Multispectral optical-electronic systems. *Special'naja tehnika*, 2002, no. 4, pp. 56–62. (in Russian)
2. Alishev Ya.V. *Multichannel Optical Range Transmission Systems*. Minsk, Vyshnejshaja shkola Publ., 1986, 235 p. (in Russian)
3. Kondratiev A.V. *Processing Methods for Digital Multispectral Satellite Information*. St. Petersburg, RSHU Publ., 1997, 107 p. (in Russian)
4. Grigoriev A.V., Demin A.V. Multichannel and multispectral optoelectronic complexes. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tehnika televidenija*, 2023, no. 3, pp. 3–8. (in Russian)
5. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Dual- and Multi-range Optical-electronic Systems with Matrix Radiation Receivers*. Moscow, Universitetskaja kniga: Logos, 2007, 191 p. (in Russian)
6. Mordvin N.N., Popov G.N. Conceptual design of universal optical-electronic observation devices. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, vol. 52, no. 6, pp. 34–39. (in Russian)
7. Wolfe W.L., Zissis G.J. *The Infrared Handbook*. General Dynamics, 1985, 1700 p.
8. Moiseyev V.A., Tereshin E.A., Demjanov E.A., Zhuravlev P.V., Ulyanova E.O., Shatunov K.P., Churilov S.M. Realization ways of multispectral integrated of optoelectronic systems. *Journal of Instrument Engineering*, 2004, vol. 47, no. 9, pp. 51–57. (in Russian)
9. Grigoriev A.V., Demin A.V. Simulation model of passive detection of high-speed aircraft. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tehnika televidenija*, 2023, no. 2, pp. 55–59. (in Russian)
10. Ma W., Wan Y., Li J., Zhu S., Wang M. An automatic morphological attribute building extraction approach for satellite high spatial resolution imagery. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 337. <https://doi.org/10.3390/rs11030337>
11. Demin A.V., Tsytsulin A.K., Nonin A.S., Semashkin O.I., Mikhailovsky A.I., Dobriakov B.N., Denisov A.V., Sechak E.N. Aviation multispectral optical-electronic complex. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tehnika televidenija*, 2024, no. 3, pp. 18–26. (in Russian)
12. Demin A.V., Sorokin A.V., Gordeev D.M., Belyansky M.A., Ptitsyna A.S., Shalkovskiy A.G., Churikov A.B., Smolin A.S.

12. Демин А.В., Сорокин А.В., Гордеев Д.М., Белянский М.А., Птицына А.С., Шалковский А.Г., Чуриков А.Б., Смолин А.С. Авиационный тепловизионный прибор // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 5. С. 93–97.
13. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
14. Горбунов Г.Г., Демин А.В., Никифоров В.О., Савицкий А.М., Скворцов Ю.С., Соколовский М.Н., Трегуб В.П. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 75–82.
15. Серебряков Д.А., Гареев В.М., Гареев М.В., Корнышев Н.П. Особенности формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри-Перо // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 1. С. 128–132.
16. Вагин В.А., Гершун М.А., Жижин Г.Н., Тарасов К.И. Светосильные спектральные приборы. М.: Наука, 1988. 262 с.
17. Зуев В.В., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 256 с.
18. Вычислительная оптика: Справочник / Под общ. ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
19. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и ее приложения. М.: Радио и связь, 1986. 246 с.
20. Демин А.В., Попов В.В., Зимин В.А., Сторошук О.Б., Цыцулин А.К. Космическая лазерная система дуплексной связи // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 4. С. 14–22.
21. Григорьев А.В., Демин А.В. Стабилизация изображения в многоканальных оптико-электронных комплексах // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 3. С. 9–14.
- Airborne heat direction finder. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, vol. 54, no. 5, pp. 93–97. (in Russian)
13. *Methods of Computer Image Processing* / ed. by V.A. Soifer. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 784 p. (in Russian)
14. Gorbunov G.G., Demin A.V., Nikiforov V.O., Savitskii A.M., Skvortsov Y.S., Sokol'skii M.N., Tregub V.P. Hyperspectral apparatus for remote probing of the earth. *Journal of Optical Technology*, 2009, vol. 76, no. 10, pp. 651–656. (in Russian). <https://doi.org/10.1364/JOT.76.000651>
15. Serebrjakov D.A., Gareev V.M., Gareev M.V., Kornyshev N.P. Features of image formation in a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tehnika televidenija*, 2023, no. 1, pp. 128–132. (in Russian)
16. Vagin V.A., Gershun M.A., Zhizhin G.N., Tarasov K.I. *High-aperture Spectral Instruments*. Moscow, Nauka Publ., 1988, 262 p. (in Russian)
17. Zuev V.E., Krekov G.M. *Optical Models of the Atmosphere*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986, 256 p. (in Russian)
18. *Optical Computation. Handbook* / ed. by M.M. Rusinov. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1984, 423 p. (in Russian)
19. Krasilnikov N.N. *Theory of the Images Transfer and Sensing. Theory of the Images Transfer and its Applications*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1986, 246 p. (in Russian)
20. Demin A.V., Popov V.V., Zimin V.A., Storoshuk O.B., Tsytulin A.K. Space laser duplex communication system. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tehnika televidenija*, 2023, no. 4, pp. 14–22. (in Russian)
21. Grigoriev A.V., Demin A.V. Image stabilization in multichannel optoelectronic complexes. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tehnika televidenija*, 2023, no. 3, pp. 9–14. (in Russian)

Авторы

Григорьев Алексей Владимирович — заместитель генерального директора по науке, АО «Вологодский оптико-механический завод», Вологда, 160009, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0005-4695-6766>, scpence@vomz.ru

Демин Анатолий Владимирович — доктор технических наук, профессор, начальник бюро, АО «ЛОМО», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация, [sc 56921555500](https://orcid.org/0009-0006-2605-0964), <https://orcid.org/0009-0006-2605-0964>, dav_60@mail.ru

Сечак Евгений Николаевич — кандидат технических наук, начальник специализированного конструкторского бюро, АО «ЛОМО», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация, [sc 57218939105](https://orcid.org/0000-0002-8810-2022), <https://orcid.org/0000-0002-8810-2022>, sechakevgeny@gmail.com

Authors

Alexey V. Grigoriev — Deputy Director General for Science, JSC “Vologda Optical and Mechanical Plant”, Vologda, 160009, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0005-4695-6766>, scpence@vomz.ru

Anatoliy V. Demin — D.Sc., Professor, Head of the Advanced Development Bureau, JSC “LOMO”, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation, [sc 56921555500](https://orcid.org/0009-0006-2605-0964), <https://orcid.org/0009-0006-2605-0964>, dav_60@mail.ru

Evgenii N. Sechak — PhD, Head of the Specialized Design Bureau, JSC “LOMO”, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation, [sc 57218939105](https://orcid.org/0000-0002-8810-2022), <https://orcid.org/0000-0002-8810-2022>, sechakevgeny@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19.09.2024
Одобрена после рецензирования 08.11.2024
Принята к печати 23.01.2025

Received 19.09.2024
Approved after reviewing 08.11.2024
Accepted 23.01.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»