

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IES_2026_1_10

MPHTI 89.57.21

МИНИМИЗАЦИЯ ПАРАЗИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КАТАДИОПТРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

КАТАДИОПТРИЯЛЫҚ ОПТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ПАРАЗИТТІК СӘУЛЕЛЕНУ ДІ АЗАЙТУ

MITIGATION OF STRAY LIGHT IN CATADIOPTRIC OPTICAL SYSTEMS

Б.Р. Жумажанов ¹, А.Е. Кулакаева ^{1,2*}, А.Т. Жетписбаева ^{1,3}, Б.С. Жумажанов ¹

¹ТОО «Ghalam», г. Астана, Казахстан

²Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева., г. Астана, Казахстан

*Автор-корреспондент: Кулакаева Айгуль Ергалиевна (полностью), e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

Ключевые слова:

BDLI, система Максудова, паразитное излучение, ДЗЗ, бленда, Zemax OpticStudio, катадиоптрическая оптическая система.

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования по моделированию, расчету и минимизации паразитного излучения в катадиоптрических оптических системах, используемых в спутниковых системах дистанционного зондирования Земли. В качестве исследуемого объекта выбрана компактная оптическая система BDLI, построенная по оптической схеме Максудова. Целью работы является оценка эффективности конструктивных решений по снижению паразитного излучения и анализ возможности их применения в условиях ограниченного объема и массы космического аппарата.

Для анализа распространения рассеянного света использовался метод обратной трассировки лучей в программной среде Zemax OpticStudio, что позволило выявить основные паразитные траектории и разработать меры по их блокированию. Были исследованы различные геометрические конфигурации бленд, а также проанализировано влияние светопоглощающих и диэлектрических покрытий. По результатам моделирования установлено, что уровень паразитного излучения может быть снижен до 1,9 % на краю поля зрения и до 0,15 % на оптической оси. Выполненное сравнение с системой более сложной конфигурации подтвердило значительное влияние пространственного размещения компонентов на эффективность экранирования. Полученные данные могут быть использованы при проектировании компактных высокоточных оптических приборов для космических систем наблюдения Земли.

Түйінді сөздер:

BDLI, Максудов оптикалық сұлбасы, паразиттік сәуле шығару, ЖҚЗ, бленда, Zemax OpticStudio, катадиоптриялық жүйе.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада Жерді қашықтықтан зондтауға арналған спутниктік жүйелерде қолданылатын катадиоптриялық оптикалық жүйелердегі паразиттік сәуле шығару процестерін модельдеу, талдау және төмендету нәтижелері қарастырылады. Зерттеу нысаны ретінде Максудов оптикалық сұлбасы негізінде құрастырылған ықшам BDLI оптикалық жүйесі таңдалды. Зерттеудің мақсаты – паразиттік



© 2026 Б.Р. Жумажанов, А.Е. Кулакаева, А.Т. Жетписбаева, Б.С. Жумажанов

Данная работа распространяется на условиях лицензии Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

сәулененді азайтуға бағытталған конструкциялық шешімдердің тиімділігін бағалау және оларды ғарыш аппараттарында шектеулі көлем мен масса жағдайында қолдану мүмкіндігін анықтау болып табылады. Паразиттік жарықтың таралу жолдарын талдау үшін Zemax OpticStudio бағдарламалық ортада кері трассировка әдісі қолданылды, бұл негізгі паразиттік траекторияларды анықтап, оларды тиімді бөгейтін шараларды әзірлеуге мүмкіндік берді. Өртүрлі бленда геометриялары, сондай-ақ жарық сіңіретін және диэлектрлік жабындардың тиімділігі зерттелді. Модельдеу нәтижелері көрсеткендей, паразиттік сәуле шығару деңгейі көру өрісінің шетінде 1,9%-ға дейін, ал оптикалық ось бойында 0,15%-ға дейін төмендеуі мүмкін. Күрделі конфигурациядағы жүйемен салыстыру кеңістікте оптикалық компоненттерді дұрыс орналастырудың экрандау тиімділігіне елеулі әсер ететінін көрсетті. Бұл нәтижелер Жерді ғарыштан бақылауға арналған ықшам әрі жоғары дәлдікті оптикалық құрылғыларды жобалауда қолдануға жарамды әдіс болып табылады.

keywords:

BDLI, Maksutov design, stray radiation, Earth remote sensing, baffle, Zemax OpticStudio, catadioptric optical system.

ABSTRACT

This article presents the results of a study on the modeling, calculation, and mitigation of stray radiation in catadioptric optical systems used in satellite-based Earth remote sensing applications. The object of investigation is a compact optical system, BDLI, based on the Maksutov optical design. The objective of the study is to evaluate the effectiveness of design solutions aimed at reducing stray radiation and to assess their feasibility under the strict volume and mass constraints of spacecraft.

To analyze the propagation of scattered light, a reverse ray tracing method was employed using the Zemax OpticStudio software. This enabled the identification of primary stray light paths and the development of effective suppression measures. Various geometric configurations of baffles were examined, along with the influence of light-absorbing and dielectric coatings. Simulation results demonstrated that stray radiation can be reduced to 1.9% at the edge of the field of view and to 0.15% along the optical axis. A comparison with a more complex optical system confirmed the substantial impact of spatial component arrangement on shielding efficiency. The obtained findings may be applied in the development of compact, high-precision optical instruments for satellite-based Earth observation systems.

ВВЕДЕНИЕ

Паразитное излучение представляет собой одну из важнейших проблем, возникающих при разработке современных оптических систем, предназначенных, в частности, для полезных нагрузок космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Тенденция миниатюризации КА бросает новые вызовы к компактности оптических систем, при этом сохраняя или даже улучшая качество изображения, получаемого с их помощью. И все более актуальным становится вопрос подавления паразитного излучения в таких оптических системах, так как пространства для конструктивных элементов становится все меньше. Паразитное излучение связано с нежелательным рассеянием или отражением света внутри оптических систем, что существенно ухудшает качество изображений, приводит к появлению шумов и помех и затрудняет последующую обработку и анализ полученных данных. Особенность данного явления состоит в том, что оно не только искажает качество конечных результатов наблюдений, но и снижает общую эффективность работы спутниковых систем, особенно при яркой освещенности наблюдаемых объектов, например, при дневных съемках

поверхности Земли. Для снижения или полного устранения негативных последствий паразитного излучения разработчикам приходится применять дорогостоящие технологические решения, что ведет к увеличению стоимости и усложнению проектирования оптических приборов. Поэтому актуальной становится задача более точного анализа уровня и источников паразитного излучения для разработки эффективных и практически применимых методов его подавления.

Попадание значительного паразитного излучения на детектор оптической системы полезной нагрузки ДЗЗ оказывает комплексное негативное воздействие на качество регистрируемого изображения. Во-первых, происходит снижение контраста изображения вследствие наложения фонового света, что затрудняет визуальное выделение деталей и уменьшает динамический диапазон системы. Это в свою очередь ухудшает пространственное разрешение, делая невозможным распознавание мелких объектов и структур на снимке. Во-вторых, неравномерность распределения паразитного излучения по поверхности детектора приводит к появлению артефактов в виде градиентов яркости и локальных засветок, усложняющих калибровку и геометрическую коррекцию изображений. В-третьих, паразитное излучение, обладая отличным от полезного сигнала спектральным составом, вносит искажения в цветопередачу, что критично для задач спектрального анализа и идентификации материалов. В-четвертых, увеличение уровня шума снижает отношение сигнал/шум, что ограничивает возможность выделения полезной информации из зашумленного изображения. Совокупность таких эффектов существенно ограничивает применимость данных ДЗЗ для решения задач распознавания объектов, мониторинга изменений и картографирования, подчеркивая актуальность исследований, направленных на разработку эффективных методов подавления паразитного излучения в оптических системах КА ДЗЗ.

Учитывая высокую чувствительность оптических систем к паразитному излучению, особенно в условиях ограниченного пространства и повышенных требований к точности измерений, разработка эффективных методов его подавления становится приоритетной задачей. Для обеспечения высокого качества изображений и надежности данных ДЗЗ необходимо не только учитывать паразитное излучение на этапе проектирования, но и глубоко анализировать источники его возникновения, пути распространения, а также оценивать эффективность различных способов его минимизации. В этой связи все большее внимание уделяется современным инженерным и программным подходам к снижению паразитного воздействия в катадиоптрических оптических системах, особенно при работе в инфракрасном диапазоне, где даже незначительные рассеянные потоки могут существенно исказить сигнал от слабых источников. Одним из наиболее эффективных методов анализа паразитного излучения в катадиоптрических оптических системах является непоследовательная трассировка лучей (*non-sequential ray tracing*). Как показано в (Zhu et al., 2015), ее применение в сочетании с оптимизацией экранов и использованием малорассеивающих покрытий позволяет добиться существенного снижения паразитной облученности фокальной плоскости.

Расширением данного подхода является метод обратной трассировки из углов детектора (*corner-departure*), рассмотренный в (Hong et al., 2025), позволяющий выявлять нестандартные и сложно прогнозируемые пути распространения рассеянного света при существенно меньших вычислительных затратах по сравнению с классической непоследовательной трассировкой лучей.

В (Yeon et al., 2025) проведена параметрическая оптимизация геометрии бленд. Показано, что даже небольшие изменения их длины и угла наклона позволяют в 2,7 раза снизить внутреннее паразитное облучение детектора, а также уменьшить угол попадания прямых лучей света с 55° до 10° , существенно повышая эффективность подавления как

внешнего, так и внутреннего паразитного излучения. Внутренние источники паразитного излучения, формируемые самими оптическими элементами и конструкцией, привлекают все больше внимания. Установлено (Lu et al., 2024), что внутреннее тепловое излучение, возникающее от компонентов, работающих при комнатной температуре, является значимым источником паразитного фона в инфракрасных системах и может существенно снижать отношение С/Ш, вплоть до подавления полезного сигнала.

В (Fu et al., 2024) рассматривается применение локального охлаждения зеркал в составе катадиоптрической системы для снижения теплового паразитного излучения. Использование компактной конструкции и высокоэффективного холодного стопа (cold stop) делает такой подход перспективным для малогабаритных космических платформ с ограничениями по массе и энергии.

Более рациональные решения включают пассивные меры подавления, такие как оптимизация конструкции корпуса, бленд и экранирующих элементов. Подобный подход реализован в (Zou et al., 2022), где синхронная многопозиционная система измерения рассеянного светового поля с зенитным диапазоном $\pm 23,5^\circ$ и угловым охватом до 68° позволила точно описать пространственное распределение паразитных потоков. При этом достигнута максимальная относительная погрешность измерения – не более 3,71 %. Однако реализация данного метода на борту космических аппаратов пока ограничена.

Инженерная оптимизация оптической схемы получила развитие в (Zeng et al., 2020), где с помощью гибридного метода были оптимизированы параметры зеркала-квадрики, что позволило значительно снизить абберрации без ухудшения разрешающей способности системы. Другой подход, основанный на обучении нейросетей (REBPNet), продемонстрирован в (Li et al., 2025), где нейросеть адаптируется под температурные колебания и калибрует уровень теплового фона. Несмотря на перспективность, такие методы требуют значительных вычислительных ресурсов и больших объемов обучающих данных, что ограничивает их универсальность.

В (Han et al., 2021) рассмотрена катадиоптрическая система в составе космической лазерной установки (SLDR) для удаления мусора, где особое внимание уделено подавлению рассеянного излучения. Применены инженерные методы: двухступенчатая бленда, боковое смещение оптической оси, подбор черных антирефлексных покрытий и оптимизация направления открытия крышки телескопа. Данные меры позволили достичь уровня подавления паразитного излучения порядка 10^{-9} , что демонстрирует эффективность геометрических решений при работе с яркими объектами вне поля зрения.

Аналогичный подход применен в (Chunlei et al., 2019), где для длинноволновой инфракрасной катадиоптрической системы проведено моделирование рассеянного излучения в TracePro с расчетом PST и тепловых шумов в диапазоне температур от 260 до 320 К. Показано, что при отклонении от оси на угол, превышающий критический, значение PST падает ниже 10^{-8} , что соответствует требованиям к фоновому излучению, а для обеспечения фонового режима наблюдения слабых целей необходима криогенная стабилизация температуры системы.

Продолжая тему тепловой устойчивости инфракрасных оптических систем, в работе (Xing et al., 2019) рассмотрена катадиоптрическая система среднего инфракрасного диапазона (MWIR), оптимизированная для функционирования в широком температурном диапазоне от -40°C до $+40^\circ\text{C}$. Благодаря применению аналитических методов коррекции теплового дефокуса и хроматической абберрации, а также глобальной оптимизации параметров в программной среде Zemax OpticStudio, удалось обеспечить 100 % эффективность холодного экранирования и высокую стабильность фокусного расстояния.

Таким образом, несмотря на широкий спектр существующих решений, проблема паразитного излучения в катадиоптрических системах остается актуальной. Множество

методов, включая непоследовательную трассировку, оптимизацию экранов и тепловую стабилизацию, показывают эффективность, но часто требуют значительных ресурсов или усложняют конструкцию. Это подчеркивает необходимость разработки более универсальных и экономичных подходов.

Целью данного исследования является разработка и оптимизация методов расчета и минимизации паразитного излучения в катадиоптрических оптических системах типа Максудова, применяемых в составе полезных нагрузок спутников ДЗЗ. Для достижения поставленной цели используется программное обеспечение Zemax OpticStudio, обеспечивающее моделирование распространения паразитного света и проведение трассировки лучей с учетом конструктивных и оптических характеристик системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данного исследования была рассмотрена технологическая оптическая полезная нагрузка казахстанского КА KazSTSat. Основной задачей разработки полезной нагрузки являлась отработка технологий постобработки изображений для получения разрешения выше, чем позволяет дифракционный предел телескопа, поэтому полезная нагрузка называется BDLI (Beyond Diffraction Limit Imager – камера с разрешением за пределами дифракционного предела). Данная оптическая система BDLI спроектирована на основе оптической схемы Максудова, включающей сферические зеркала и корректирующие линзы. Выбор таких систем обусловлен их конструктивными преимуществами: компактностью, малыми массогабаритными характеристиками, а также способностью эффективно снижать хроматические и сферические аберрации, что особенно важно при использовании в спутниковых приборах для ДЗЗ.

Методическая часть исследования была направлена на детальный анализ дизайна данной оптической системы с целью выявления основных причин попадания паразитного излучения на детектор. Следует отметить, что большое внимание уделялось недопущению возрастания стоимости прибора, поэтому в первую очередь рассматривались оптические элементы со сферическими поверхностями, и проектировщикам удалось достичь требуемого качества изображения, используя только сферические поверхности зеркал и линз. Проведен детальный анализ траекторий распространения лучей внутри оптической системы с целью выявления путей распространения паразитного излучения. Для снижения его влияния были реализованы меры, направленные на многократное отражение паразитных лучей до их попадания на детектор, что позволило существенно ослабить их интенсивность.

Для проектирования оптической системы и анализа паразитного излучения использовался специализированный программный комплекс Zemax OpticStudio. Оптимизация конструкции оптической системы позволила заблокировать часть нежелательного излучения и ослабить интенсивность оставшихся лучей. Исследована эффективность применения различных типов антибликовых покрытий, наносимых на поверхности оптических элементов, для подавления паразитных отражений.

На каждом этапе проводилась оценка доли паразитного излучения относительно мощности полезного сигнала, а также проверка возможных прямых путей распространения света к детектору. Дополнительно оценивались эффективность различных бленд и влияние светопоглощающих и диэлектрических покрытий на уровень паразитного света.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Компактные оптические системы, такие как системы Максудова, благодаря своим габаритам и коррекции аберраций, находят широкое применение в качестве полезных нагрузок КА ДЗЗ. Однако специфика данной оптической схемы, особенно в условиях

ограниченного пространства и высоких требований к качеству изображения, обуславливает повышенную восприимчивость к паразитному излучению. Данная проблема проявляется в виде снижения контрастности и точности получаемых данных, что критически важно для задач точного земледелия, мониторинга окружающей среды и других применений ДЗЗ.

Сложность эффективного подавления паразитного излучения в оптических системах Максудова обусловлена рядом факторов. Во-первых, компактность конструкции ограничивает возможности применения традиционных методов, таких как использование блендов и перегородок. Во-вторых, наличие множества отражающих поверхностей, включая зеркала и линзы, увеличивает вероятность переотражений. В-третьих, попытки расширения поля зрения ухудшают коррекцию аберраций и приводят к увеличению паразитного излучения от внеосевых источников. Наконец, предотвращение загрязнения оптических поверхностей в условиях космоса остается сложной инженерной задачей.

Данное исследование направлено на разработку новых методов анализа и минимизации паразитного излучения, учитывающих особенности компактных оптических систем Максудова. Рассмотренные варианты минимизации паразитного излучения включали оптимизацию геометрии оптических элементов, использование специализированных просветляющих покрытий и использование материалов с низким коэффициентом рассеяния, а также комбинации данных решений. Отметим, что разработка новых материалов и покрытий не входит в задачи исследования. В условиях растущей конкуренции на рынке высокотехнологичной космической продукции разработчики спутниковых систем стремятся обеспечить максимально возможное качество получаемых данных, что делает задачу минимизации паразитного излучения особенно актуальной. Кроме того, понимание причин его возникновения и характера влияния важно для научного сообщества, так как способствует повышению точности и надежности алгоритмов обработки изображений, получаемых с космоса.

В ходе проектирования оптической системы были учтены требования миссии, интерфейсы с другими подсистемами КА, все возможные механические и тепловые нагрузки. Таким образом была получена оптическая система BDLI с фокусным расстоянием 440 мм, диаметром входной апертуры 27 мм и длиной системы вдоль оптической оси не более 130 мм (без учета камеры и крепежных элементов). Ход лучей в оптической системе представлен на рисунке 1.

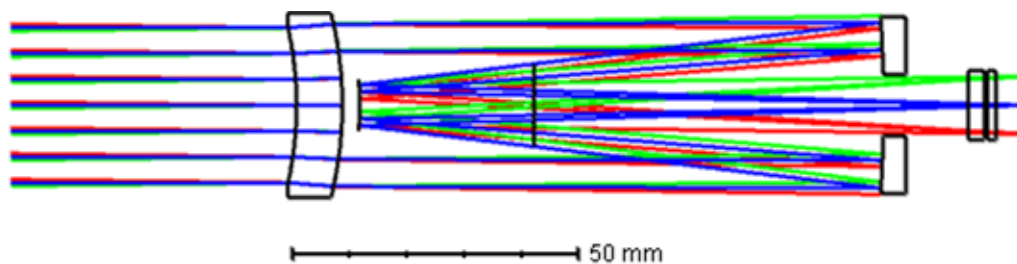


Рисунок 1. Ход лучей в оптической системе BDLI

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

В классической оптической схеме Максудова вторичное зеркало интегрировано с менисковым корректором посредством нанесения отражающего покрытия на центральную часть его внутренней поверхности, что обеспечивает жесткую фиксацию и компактность конструкции. В конструкции оптической системы BDLI вторичное зеркало выполнено в виде отдельного элемента с определенной толщиной и крепится на мениск путем склеивания, как показано на рисунке 2.

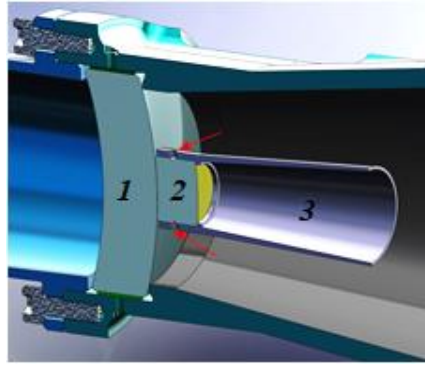


Рисунок 2. Склейка входной линзы и вторичного зеркала: 1 – Мениск (входная линза из Schott BK7G18), 2 – вторичное зеркало, 3 – внутренняя бленда, закрепленная на вторичном зеркале. Красными стрелками указаны отверстия для введения клея для фиксации бленды на вторичном зеркале

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде SolidWorks

В определенной степени это решение тоже связано с минимизацией паразитного излучения. Толщина вторичного зеркала используется как поверхность для крепления внутренней бленды. Диаметр вторичного зеркала также тщательно высчитывался и составляет компромиссное решение между экранированием полезного сигнала и блокировкой паразитного излучения.

Еще одним отличием от классической системы Максудова является то, что данная система будет использоваться в космосе и будет подвергаться жестким условиям радиации. Поэтому для защиты основных элементов оптической системы от воздействия радиационной среды космического пространства в конструкции использовалось радиационно стойкое оптическое стекло Schott BK7G18, обеспечивающее стабильные характеристики в течение длительного срока эксплуатации.

После прохождения через отверстие главного зеркала до попадания на детектор лучи проходят через две корректирующие линзы, предназначенные для устранения остаточных оптических аберраций.

На рисунке 3 показано расположение корректирующих линз относительно главного зеркала и детектора.

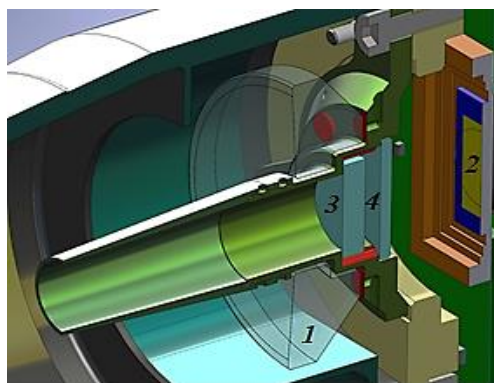


Рисунок 3. Расположение корректирующих линз относительно главного зеркала и детектора: 1 – главное зеркало, 2 – детектор, 3 – корректирующая линза 1, 4 – корректирующая линза 2, изготовлена из стекла N-BK7 с широкополосным антибликовым покрытием и служит также в качестве спектрального фильтра

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде SolidWorks

Изначально предусматривалось нанесение металлических покрытий на обе отражающие поверхности, а также установка двухкомпонентного фильтра для ограничения спектральной полосы пропускания.

Однако в процессе реализации указанных конструктивных решений были выявлены практические сложности при сборке вторичного зеркала. Стандартная процедура центрирования дублетов обычно осуществляется методом оптической юстировки с последующей фиксацией компонентов клеем, отверждаемым под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения. Однако радиационно стойкое стекло, применяемое для изготовления переднего мениска, не пропускает УФ-спектр, а наличие металлического покрытия на поверхности вторичного зеркала дополнительно препятствует прохождению УФ-лучей со стороны зеркала, что делает традиционный метод склеивания неприменимым.

В результате были рассмотрены альтернативные подходы к процессу центрирования и установки вторичного зеркала. Один из вариантов предполагал выполнение центрирования и приклеивания зеркала до нанесения металлического покрытия. Однако при этом возникли трудности с эффективной маскировкой оптических поверхностей для последующего нанесения покрытий. Наиболее рациональным решением стало использование диэлектрических покрытий, обладающих стабильной прозрачностью в УФ-диапазоне. Такой подход не только позволил обеспечить качественную фиксацию зеркала, но и способствовал подавлению внеполосных отражений, повышая общую эффективность оптической системы. В ходе оптимизации оптической схемы было принято решение использовать диэлектрические отражающие покрытия как на первичном, так и на вторичном зеркалах.

Кроме того, применение диэлектрических зеркальных покрытий позволило отказаться от двухкомпонентного фильтра, заменив его на одну линзу из стекла N-BK7 с широкополосным антибликовым покрытием. Это упростило оптическую схему и обеспечило необходимое спектральное разделение без потери эффективности.

На этапе моделирования было проведено количественное исследование паразитного излучения в оптической системе. В результате оптическая схема была детально проанализирована с целью оценки уровня паразитных световых потоков, достигающих детектора. Чтобы дать представление о том, откуда может появиться этот рассеянный свет, ниже приведен рисунок 4, представляющий трассировку луча только с рассеянным светом, отфильтрованным для точки детектора на оси (синие лучи) и точки на краю поля зрения (зеленые лучи). Поскольку все эти лучи имеют множественные отражения перед тем, как попасть на детектор, все они имеют низкую мощность.

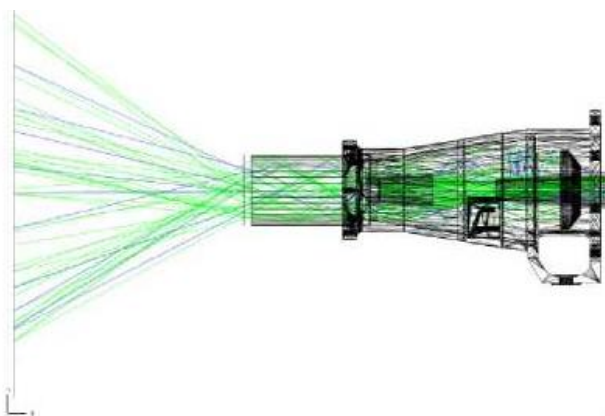


Рисунок 4. Рассеянное излучение, достигающее детектора

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

Источником паразитных лучей с наибольшей интенсивностью оказались прямые лучи, проходящие через входную апертуру и, минуя оптические элементы, попадающие непосредственно на детектор. Пример распространения таких лучей представлен на рисунке 5.

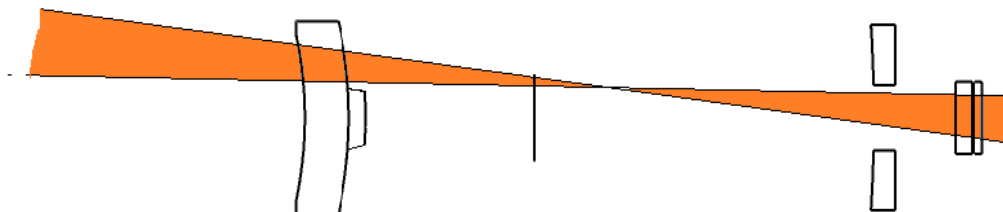


Рисунок 5. Лучи света, напрямую попадающие на детектор

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

Обычно в наземных оптических системах данная проблема решается длинными наружными блендами. Однако в условиях КА, где большое внимание уделяется компактности системы, длина наружных бленд ограничена пространством внутри платформы, выделенным под размещение оптической ПН.

Альтернативным способом минимизации попадания прямых лучей на детектор является увеличение диаметра вторичного зеркала и уменьшение диаметра отверстия в главном зеркале. Однако увеличение вторичного зеркала ведет к увеличению экранирования, тем самым уменьшая количество полезного света, попадающего на детектор, что ведет к уменьшению качества изображения. В то же время уменьшение отверстия в главном зеркале ограничивает ширину угла поля, что тоже нежелательно. Поэтому необходимы новые подходы и решения, которые совместимы с компактностью изделия.

Для предотвращения попадания прямых лучей через переднюю линзу и центральное отверстие главного зеркала на детектор были разработаны и применены специальные экранирующие элементы. Их эффективность оценивалась с использованием непоследовательной модели трассировки лучей в программном комплексе Zemax OpticStudio. Конструкция предусматривала установку двух внутренних бленд: передней, расположенной вокруг вторичного зеркала, и задней, закрепленной на втулке, проходящей через центральное отверстие главного зеркала.

На рисунке 6 представлена модель, демонстрирующая расположение указанных защитных элементов.

В конструкции также предусмотрена внешняя передняя бленда, предназначенная для защиты оптической системы от воздействия широкоугольного освещения. Хотя она не обеспечивает полного экранирования прямых световых путей, ее применение способствует снижению уровня рассеянного света, возникающего от внешних источников, находящихся за пределами основного поля зрения. Диаметр главного зеркала значительно меньше внутреннего диаметра тубуса телескопа, так как необходимо пространство для креплений. Пространство снаружи главного зеркала закрыто экранирующей поверхностью – маской. Поверхность маски так же, как и вся внутренняя поверхность тубуса, покрыта светопоглощающей черной краской Aeroglaze Z306, которая не дает дегазации в космических условиях. Такой подход дополнительно позволяет уменьшить фоновое паразитное излучение, что особенно важно при съемке в условиях высокой внешней освещенности.

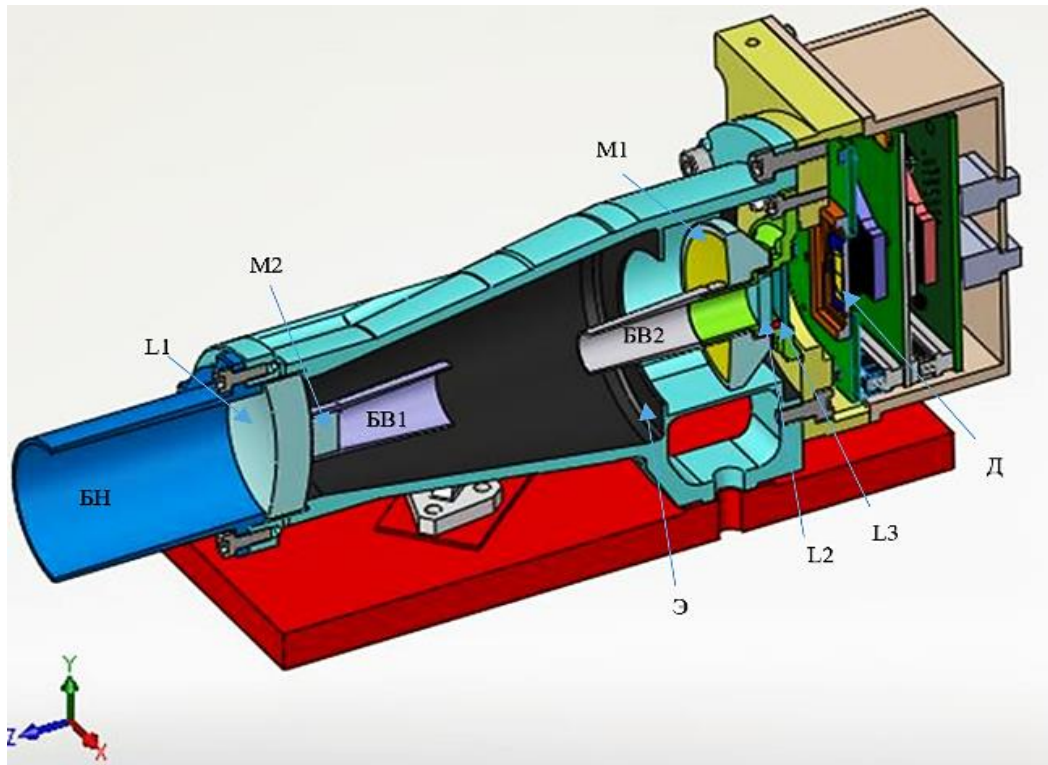


Рисунок 6. Модель размещения защитных элементов в оптической системе BDLI: Элементы оптической системы: М1 – главное зеркало, М2 – вторичное зеркало, L1 – входная линза, L2, L3 – корректирующие линзы, Д – детектор. Защитные элементы: БН – наружная бленда, БВ1 – внутренняя бленда, закрепленная на вторичном зеркале, БВ2 – внутренняя бленда, закрепленная на главном зеркале, Э – экранирующая поверхность (маска)
Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде SolidWorks

Расчет и минимизация паразитного излучения. Рассмотренные в данной работе подходы к расчету и минимизации паразитного излучения основаны на последних инженерных разработках, применяемых при проектировании современных оптических систем. Особое внимание было уделено анализу эффективности внутренних бленд, специализированных покрытий оптических поверхностей, геометрии внутренней поверхности трубы телескопа, а также использованию методов анализа прохождения лучей в программной среде Zemax OpticStudio. Для подтверждения работоспособности предлагаемых решений приводились примеры актуальных проектов, в которых успешно реализованы как механические, так и оптические меры по снижению паразитного влияния.

Анализ паразитного света: обратная трассировка лучей. В рамках данной работы предложен метод анализа паразитного излучения, основанный на предположении, что при равномерном распространении света во всех направлениях путь луча от детектора к входной апертуре идентичен пути луча, входящего через апертуру и достигающего детектора. Поэтому в ходе исследования для анализа паразитного излучения применялся метод обратной трассировки лучей, позволяющий моделировать распространение света от плоскости детектора к входному зрачку оптической системы.

Суть метода состояла в размещении моделируемых источников в плоскости детектора и анализе хода лучей, направленных от детектора к входной апертуре. На некотором расстоянии от входной линзы перпендикулярно ходу лучей ставились детекторы излучения большой площади, которые фиксировали все лучи света, исходящие от смоделированного

источника. Далее моделировался ход лучей полезного сигнала, и между оптической системой и детектором большой площади в точке фокусировки лучей, исходящих от смоделированных лучей света, ставились детекторы микроскопического размера. Количество малых детекторов равнялось количеству смоделированных источников света на детекторе, так как они представляли собой реальные источники излучения. Все лучи, попадающие на малый детектор, рассматривались как полезный сигнал, тогда как лучи, прошедшие мимо него, но зарегистрированные на большом детекторе, рассматривались как паразитное излучение. Интенсивность паразитного излучения рассчитывалась до и после применения каждой меры минимизации, а затем сравнивалась с исходным уровнем для оценки ее эффективности. Таким образом выявлялись все потенциальные нежелательные пути прохождения лучей и применялись меры по их минимизации.

В рамках моделирования были заданы два источника света: один – на оптической оси, второй – на краю поля зрения. Угол конуса излучения составил 65° , что обеспечивало охват всех возможных траекторий распространения света внутри системы. Результаты симуляции паразитного излучения представлены на рисунке 7.

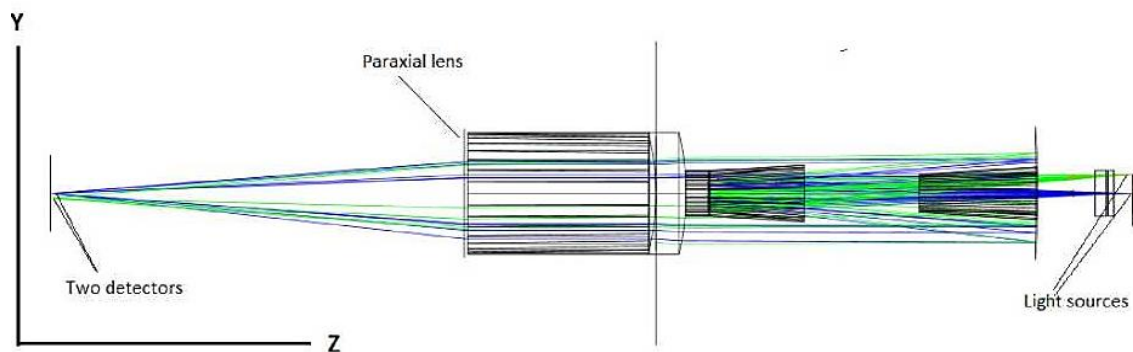


Рисунок 7. Обратная трассировка лучей в непоследовательном режиме Zemax

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

Результаты моделирования показали, что введенные бленды эффективно блокируют прямые лучи, способные достигать детектора. Уровень паразитного света, обусловленного внутренними отражениями, не превышает 2,1 % от полезного сигнала на краю поля зрения.

Принятые меры по минимизации паразитного излучения. Существенной особенностью предложенного метода является моделирование паразитного излучения с использованием конфигурации двойного детектора и оптимизация параметров внутренних бленд с учетом геометрических ограничений компактной спутниковой платформы. Для минимизации паразитного излучения в оптической системе принят ряд мер. После проектирования каждой из мер проводился повторный расчет паразитного излучения для оценки эффективности принятых решений.

Для ограничения прямых световых путей внутри системы были предусмотрены и установлены две конические бленды. Передняя бленда располагалась вокруг вторичного зеркала, а задняя – на втулке, проходящей через центральное отверстие главного зеркала. Был проведен ряд итераций с разными длинами и углами конусов бленд, после каждой итерации проводился замер уровня паразитного излучения, и таким образом выбраны максимально эффективная форма и длина бленд, которые также не блокируют полезные лучи. Эффективность конструкции бленд была подтверждена моделированием в

программной среде Zemax OpticStudio, которое показало полное отсутствие прямых путей попадания света на детектор.

Дополнительно система оснащена внешней блендой, предназначенной для защиты от широкоугольного освещения и подавления рассеянного света, поступающего от источников, находящихся за пределами основного поля зрения (угол поля зрения $>1,3^\circ$). Незначительное снижение тангенциальной модуляционной передачи (MTF) вне оптической оси, вызванное частичным экранированием конструкцией бленд, было компенсировано за счет оптимизации общей конфигурации оптической схемы.

Для дальнейшего подавления паразитного излучения внутренние поверхности корпуса, включая внутреннюю поверхность трубы телескопа и кольцевые области вокруг отверстий в главных зеркалах, были покрыты светопоглощающей краской Aeroglaze Z306. Это покрытие обладает низким коэффициентом отражения – около 5 %, что эффективно снижает уровень рассеянного света. Анализ показал, что без применения чернения паразитное излучение на краю поля зрения достигало 2,1 % от полезного сигнала, тогда как с покрытием Aeroglaze Z306 этот показатель снизился до 1,9 %. В центральной области поля зрения значения составили 0,2 % без чернения и 0,15 % после нанесения покрытия.

Обратная трассировка лучей в системе BDLI проводилась для двух точечных источников: один был расположен на оптической оси (синие лучи), второй – в краевых зонах поля зрения (зеленые лучи с наклоном, соответствующим половине угла FoV). Угол конуса излучения составлял 65° . Для каждого источника было смоделировано по 100 000 лучей при общей энергии 1 Вт и минимальном пороге мощности 10^{-5} Вт. Результаты моделирования показали полное отсутствие прямых лучей, достигающих детектора, и уровень паразитного света менее 2,1 % на краю поля зрения и менее 0,2 % на оси при отсутствии чернения краев зеркала.

Оптическая система BDLI работает в панхроматическом диапазоне 450–650 нм с центром излучения 575 ± 15 нм. Коэффициент пропускания составляет около 70 %, а модуляционная передача (MTF) превышает 12 % при пространственной частоте 77 пар линий на миллиметр. Вместо традиционного фильтра было использовано окно из стекла N-BK7 с широкополосным антибликовым покрытием, что упростило оптическую схему без ухудшения характеристик. Температурная стабильность системы составляет менее 10 мкм/°С в диапазоне температур 20 ± 5 °С. Так как испытания системы проводились в лабораторных условиях, а система эксплуатируется в условиях космоса, то есть в вакууме, возникает смещение фокуса, которое было вычислено, и в конструкции оптической полезной нагрузки при проектировании и создании предусмотрели съемную прокладку толщиной 0,13 мм, которая компенсирует смещение фокуса при переходе из лабораторных условий в вакуумную среду.

Результаты анализа показывают, что эффективное применение перегородок и специализированных покрытий позволяет снизить уровень паразитного излучения в оптической системе до значений, сопоставимых с результатами, полученными для системы BDLI. Однако абсолютные значения оказываются несколько выше, что обусловлено более сложной траекторией распространения лучей и увеличенным числом внутренних отражений вследствие конструктивных особенностей.

Исследование показало, что при проектировании компактных спутниковых оптических систем необходимо учитывать конструктивные особенности каждой меры по снижению паразитного излучения. Правильно подобранные стратегии экранирования и выбор эффективных материалов позволяют обеспечить высокую точность получаемых данных при сохранении компактности и малой массы приборов. Рисунок 8 демонстрирует, что спроектированные бленды не препятствуют прохождению полезных лучей света.

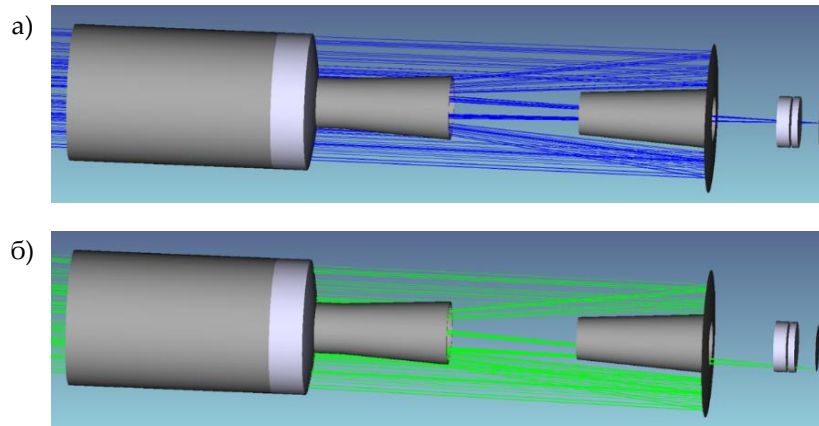


Рисунок 8. Прохождение лучей через оптическую систему с блендами: а – для осевых лучей света; б – для лучей света, попадающих на край поля зрения телескопа
Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

Рисунок 9 демонстрирует, что такие бленды также эффективно блокируют паразитные излучения, не позволяя им достичь детектора. Для примера на рисунке представлены лучи, попадающие в оптическую систему под углом 5 градусов.

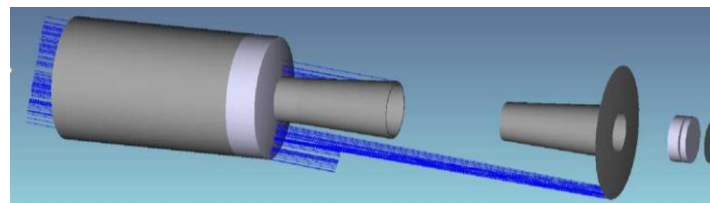


Рисунок 9. Блокировка паразитного излучения блендами
Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

Благодаря компактной архитектуре, симметричному расположению элементов и применению диэлектрических покрытий, удалось значительно снизить уровень паразитного излучения.

Таким образом, конструктивные различия между системами существенно влияют на эффективность методов минимизации паразитного излучения, что требует индивидуального подхода к проектированию защитных элементов в зависимости от конкретной оптической конфигурации.

Проведенные исследования показали, что минимизация паразитного излучения в катадиооптических оптических системах спутников ДЗЗ возможна за счет комплексного применения методов обратной трассировки лучей, оптимизации конструктивных элементов, а также использования современных диэлектрических и светопоглощающих покрытий. Для оптической системы BDLI уровень паразитного излучения составил менее 2 %, что подтвердило высокую эффективность использования перегородок и внутренних черных покрытий.

Метод обратной трассировки лучей, примененный в ходе моделирования, подтвердил свою эффективность в идентификации нежелательных траекторий распространения света. Такая методика позволила выявить как прямые пути попадания света на детектор, так и многократные внутренние отражения, приводящие к паразитной засветке.

Несмотря на достигнутые результаты, следует учитывать ограничения исследования. В частности, моделирование проводилось при ограниченном числе углов падения. Кроме того, влияние деградации светопоглощающих покрытий под воздействием факторов космической среды требует дополнительной экспериментальной проверки.

Практическая значимость выполненного исследования заключается в возможности применения разработанных конструктивных решений и методик трассировки лучей для проектирования других компактных спутниковых телескопов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования выполнены разработка, моделирование и анализ эффективности конструктивных и оптических решений, направленных на снижение паразитного излучения в катадиоптрических оптических системах спутников ДЗЗ. В качестве объекта моделирования рассмотрена компактная оптическая система BDLI на базе оптической схемы Максутова, для которой реализованы меры экранирования, масок и светопоглощающих покрытий.

Полученные результаты моделирования подтвердили высокую эффективность предложенных мер по снижению паразитного излучения в компактной катадиоптрической оптической системе BDLI. Применение комплекса защитных решений, включающего системы бленд (две внутренние, одна внешняя), а также светопоглощающих покрытий, позволило снизить уровень паразитного света до 1,9 % на краю поля зрения и 0,15 % на оптической оси, что ниже исходных значений 2,1 % и 0,2 % соответственно. Это доказывает, что даже в условиях ограниченного внутреннего объема, характерного для малых космических аппаратов, возможно эффективное подавление рассеянного света без ухудшения оптических параметров, таких как модуляционная передача и коэффициент пропускания.

Сравнительный анализ подтверждает, что увеличение числа отражающих поверхностей и удлинение оптического пути требует дополнительных мер по минимизации рассеянного света. Это подчеркивает необходимость индивидуального проектирования экранирующих элементов с учетом конфигурации каждой оптической системы.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются внедрение сверхчерных покрытий нового поколения, совершенствование методов трассировки лучей с учетом микроскопической шероховатости поверхностей, а также экспериментальная верификация разработанных моделей в условиях, максимально приближенных к реальной космической среде.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR27198365 «Разработка оптикоэлектронной системы в коротковолновой инфракрасной области спектра в контексте развития космических систем ДЗЗ Казахстана»).

Данное исследование финансировалось Аэрокосмическим комитетом Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан (BR21982462 «Разработка и тестирование малого спутника на основе отечественных технологий»).

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В подготовке данной рукописи инструменты искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zhu, Y., Wu, G., Yang, Z., & Wang, Z. (2015). Internal and external stray radiation suppression for LWIR catadioptric telescope using non-sequential ray tracing. *Infrared Physics & Technology*, 70, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.01.003>
- Hong, D. K., Lee, S. H., Park, H. J., & Nam, S. H. (2025). Enhancing the efficiency of stray-light analysis using corner-departure backward ray-tracing. *Current Optics and Photonics*, 9(1), 35–41. <https://doi.org/10.5207/COPP.2025.9.1.035>
- Yeon, H. N., Kim, S. K., & Park, J. H. (2025). Optimized baffle design for suppression of internal and external stray light in LWIR catadioptric payload. *Current Optics and Photonics*, 9(1), 65–71. <https://doi.org/10.5207/COPP.2025.9.1.065>
- Lu, Y., Xu, X., Zhang, N., Lv, Y., & Xu, L. (2024). Study on stray light testing and suppression techniques for large-field of view multispectral space optical systems. *IEEE Access*, 12, 33938–33948.
- Fu, Q., Yan, L., Tan, S., Liu, Y., & Wang, L. (2024). Lightweight and high-stiffness metal optical systems based on additive manufacturing. *Micromachines*, 15(1).
- Zou, Y., Zhang, L., Zhang, J., & Cui, J. (2022). Synchronous measurement method of a multi-angle scattered light field. *Applied optics*, 61(9), 2275–2283.
- Zeng, X., Lan, J., & Gao, X. (2020). The design of a catadioptric omnidirectional thermal imaging system based on the combination of genetic algorithm and gradient descent. *Optics & Laser Technology*, 122, 105861.
- Li, T., Lai, X., Liao, S., Zhao, X., Xia, Y., & Zhou, J. (2025). A REBPNet-based IR radiometric calibration method considering ambient temperature change. *Infrared Physics & Technology*, 145, 105715.
- Han, P., Guo, J., Bao, Q., Qin, T., Ren, G., & Liu, Y. (2021). Optical design and stray light control for a space-based laser space debris removal mission. *Applied optics*, 60(25), 7721–7730.
- Chunlei, S., & Xiaoping, L. (2019). Stray light analysis of catadioptric long-wavelength infrared optical system. *Procedia Computer Science*, 147, 203–209.
- Xing, Y., Peng, J., Wang, S., & Li, L. (2019, December). A passive optical athermalization design of MWIR catadioptric space remote sensor with high resolution in geosynchronous orbit. In *AOPC 2019: Space Optics, Telescopes, and Instrumentation* (Vol. 11341, pp. 494–499). SPIE

**Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors**

Жумажанов Берик Рахымбекович – «Ghalam» ЖШС, пайдалы жүктеме және ғылыми әзірлемелер бөлімінің басшысы, Астана, Қазақстан

Жумажанов Берик Рахымбекович – руководитель отдела полезной нагрузки и научных разработок, ТОО «Ghalam», Астана, Казахстан

Zhumazhanov Berik – Head of the Payload and R&D Department, «Ghalam» LLP, Astana, Kazakhstan

e-mail: b.zhumazhanov@ghalam.kz,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5926-9619>,



Кулакаева Айгуль Ергалиевна – «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан.

Кулакаева Айгуль Ергалиевна – ассоциированный профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан.

Kulakayeva Aigul – Associate Professor of the «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications» department, International Information University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>,



Жетписбаева Айнур Турсынкановна – «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті. «Ghalam» ЖШС, пайдалы жүктеме және ғылыми әзірлемелер бөлімінің ғылыми қызметкері, Астана қ., Қазақстан

Жетписбаева Айнур Турсынкановна – ассоциированный профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева. Научный сотрудник отдела полезной нагрузки и научных разработок, ТОО «Ghalam», г. Астана, Казахстан

Zhetpisbayeva Ainur – Associate Professor of the «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications» department, L.N. Gumilyov Eurasian National University. Researcher of the Payload and R&D Department, «Ghalam» LLP, Astana, Kazakhstan

e-mail: zhetpisbayeva_at_1@enu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4525-5299>



Жумажанов Бексултан Серикович – «Ghalam» ЖШС, Пайдалы жүктеме және ғылыми әзірлемелер бөлімінің Инженер-конструкторы, Астана қ., Қазақстан

Жумажанов Бексултан Серикович – инженер-конструктор отдела полезной нагрузки и научных разработок, ТОО «Ghalam», г. Астана, Казахстан

Zhumazhanov Beksultan – Design Engineer of the Payload and R&D Department, «Ghalam» LLP, Astana, Kazakhstan

e-mail: zhumazhanov.b@ghalam.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9493-7491>