

УДК 658.5.012.14

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-4-14

Моделирование освещенности от светодиодного осветительного прибора для системы визуального контроля герметизации корпуса малого космического аппарата*

В. П. Кузьменко, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

С. В. Солёный, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Разработана численная модель трехканального светодиодного осветительного прибора кольцевой формы, предназначенного для системы визуального автоматизированного контроля герметизирующего шва малых космических аппаратов форм-фактора CubeSat 1U и 2U с использованием камеры технического зрения. Модель предполагает периодическое действие трех различных спектральных каналов – ультрафиолета, видимого зеленого и ближнего инфракрасного диапазонов спектрального распределения света – и формулируется в виде двухуровневой вариационной задачи, связывающей дискретное расположение светодиодных источников света с непрерывным набором их световых характеристик при ограничениях на равномерность и достаточность освещенности в зоне визуального контроля. Модель представлена как двухуровневая вариационная задача оптимизации, связывающая бинарную топологию размещения излучателей и непрерывные уровни их световой яркости при ограничениях на равномерность освещенности и тепловую нагрузку. Численная реализация модели выполнена через аппроксимацию точечных излучателей по форме ламбертова объекта и дискретизацию контролируемой области диаметром 40 мм с шагом 0,5 мм, три кольца по 36 источников на радиусах 70, 85 и 100 мм, рабочую высоту 55 мм. Результаты моделирования показали достижение целевых энергетических и светотехнических параметров: средняя радиантная плотность для ультрафиолетового канала составила 5,1 мВт/см², средняя освещенность для зеленого канала – 10,3 кЛк, средняя радиантная плотность для ближнего инфракрасного канала – 30,4 мВт/см²; коэффициент равномерности суммарного поля 0,87. По сравнению с регулярно-равноугольным размещением дисперсия суммарного поля уменьшена на 34 %. Полученные данные подтверждают пригодность модели для проектирования и поиска оптимальных параметров спектрально адаптивных трехкольцевых светодиодных осветительных приборов, включая топологию размещения источников света, спектральную составляющую света и уровни их световой яркости, необходимые для систем технического зрения, используемых на этапе визуального контроля при модульной сборке и герметизации корпусов малых космических аппаратов.

Ключевые слова: светодиодный источник света, спектральные каналы, техническое зрение, CubeSat, визуальный контроль, сборка малых космических аппаратов, управление качеством сборочных процессов, контроль качества герметизации.

Введение

Процесс сборки малых космических аппаратов (МКА) форм-фактора CubeSat 1U и 2U представляет собой многоступенчатую технологическую цепочку, включающую такие операции, как монтаж печатных плат, установку радиоэлектронных компонентов, механическую интеграцию конструкцион-

ных узлов и модулей, герметизацию корпуса, а также операции контроля показателей качества выполнения этапов сборки. Любое отклонение в процессе сборки способно привести к непоправимым последствиям при вводе МКА в эксплуатацию, особенно в условиях экстремальных перепадов температур и интенсивного космического излучения. Поэтому при сборке

МКА особенно важными являются операции визуального контроля, направленные на своевременное выявление дефектов пайки, герметизации, смещений компонентов, микротрещин, загрязнения оптических поверхностей и др. [1–3].

В последние годы переход от ручного оптического контроля к автоматизированным системам визуального контроля на основе камер технического зрения выявил критическую зависимость качества обнаружения дефектов от условий создаваемого в области визуального контроля светового поля. Особенно критичны параметры пространственной однородности и спектральной согласованности поля с пиковыми характеристиками чувствительности матрицы объективов используемых камер технического зрения, а также отражающими и поглощающими свойствами материалов, находящихся в области визуального контроля. Неравномерное распределение освещенности может приводить к искаженному контрастированию элементов, переотражениям и излишним преломлениям света, что особенно критично при контроле сборочных процессов МКА [4, 5].

Кроме того, исследования подчеркивают, что эффективность алгоритмов анализа изображений, получаемых камерами технического зрения прямо пропорциональна стабильности и согласованности спектральных характеристик источников света в осветительном приборе [6].

Автоматизация технологических процессов в условиях мелкосерийного сборочного производства, свойственная также сборочным процессам МКА, требует гибких адаптивных решений и повышения производительности, что говорит о необходимости внедрения специализированных амортизированных систем визуального контроля, соответственно, разработки специализированных осветительных приборов для данных систем [7, 8].

Использование традиционных источников света – ламп накаливания, флуоресцентных или даже бытовых и промышленных светодиодных матриц – не обеспечивает необходимой точности и однородности освещения для систем визуального контроля на основе камер технического зрения. В случае контроля герметизации корпусных элементов могут возникать блики и переотражения света на металлических частях корпуса и полимерных оболочках, а также локальные «горячие» и «темные» зоны в области монтажа, которые снижают точность определения дефектов и увеличивают число ложных срабатываний [9].

Недавние исследования в данной области также указывают на возрастающий интерес

к снижению световых и электромагнитных помех, создаваемых осветительными приборами и их источниками питания вблизи чувствительных электронных узлов МКА. Это подчеркивает необходимость разработки специализированной среды для систем визуального контроля, учитывающей оптические отражения и спектральные флуктуации поверхностей типовых серийных электронных компонентов и модулей, которые нередко применяются при производстве МКА типа CubeSat размера 1U/2U, но изначально не предназначались для эксплуатации в космических аппаратах [10–12].

Исследования также показали, что на качество формирования равномерного аperiodического светового поля, необходимого для повышения контрастности цифровых изображений, получаемых системами визуального контроля на основе технического зрения, в значительной степени влияет конфигурация эмиттеров светодиодных источников света и качество их спектральных характеристик [13–15].

На основании вышеописанных фактов и проведенного анализа научных источников сформирована **цель** данного исследования – разработка математической модели определения оптимальных параметров конструкции направленного спектрально-адаптивного светодиодного осветительного прибора, предназначенного для контроля этапа герметизации корпуса при сборке МКА типа CubeSat 1U/2U.

Постановка задачи, материалы и методы

Заключительный технологический этап перед запуском космического аппарата форм-фактора CubeSat 1U/2U (п. 2.13 руководства CSLI CubeSat 101) предусматривает герметизацию оптических окон и кабельных вводов однокомпонентным силиконовым эластомером. Нанесение данного герметизирующего материала может осуществляться как вручную, так и с помощью числового программного дозирующего устройства, движущегося по траектории, импортированной из CAD-модели, благодаря чему формируется непрерывный шов шириной $1,0 \pm 0,2$ и высотой $0,7 \pm 0,1$ мм. Применяемый герметизирующий материал, как правило, удовлетворяет требованию по суммарному количеству конденсируемых летучих веществ CVCМ (Collected Volatile Condensable Materials) $\leq 1\%$, что предотвращает контаминацию оптических поверхностей на орбите [16].

После процесса герметизации корпуса МКА перемещается в зону визуального контроля (рис. 1), с помощью которой обеспечивается обнаружение дефектов в виде микропор и пус-

тот в зонах заполнения герметизирующего слоя по кромке корпуса.

Рабочее расстояние между передней линзой объектива и контролируемой плоскостью герметизируемой плоскости МКА фиксируется в пределах 40...60 мм. При этом, как правило,

используется макрообъектив фокусного расстояния 25 мм, открытый на диафрагму $f/8$ (эффективный диаметр апертуры $\approx 3,1$ мм), что обеспечивает глубину резко изображаемого пространства порядка ± 4 мм, перекрывающую допуск по высоте корпуса (до $\pm 0,5$ мм) [17].

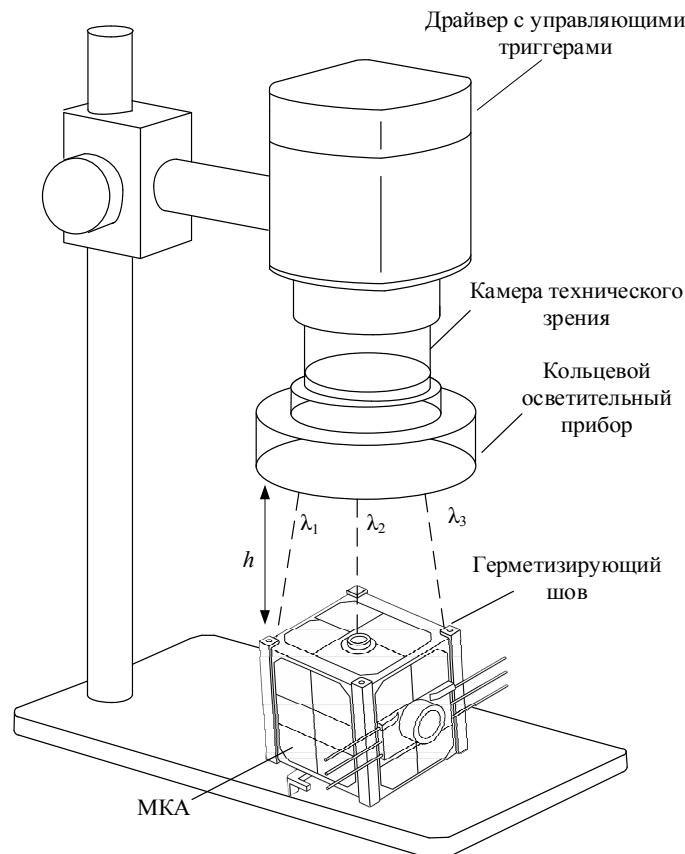


Рис. 1. Структурная схема системы визуального контроля герметизирующего шва CubeSat 1U/2U с камерой технического зрения

Fig. 1. Configuration of the visual inspection system for the sealing seam of a 1U/2U CubeSat with integrated machine vision

Для обеспечения корректного обнаружения дефектов камерой технического зрения специализированный осветительный прибор должен формировать три спектральных канала, каждый из которых размещается в собственном концентрическом ряду:

- внутренний ряд – ультрафиолет (УФ), центральная длина волны $\lambda = 405 \pm 10$ нм;
- средний ряд – зеленый (З), центральная длина волны $\lambda = 532 \pm 8$ нм;
- внешний ряд – инфракрасный (ИК), центральная длина волны $\lambda = 850 \pm 15$ нм.

Соответствующие радиусы R рядов расположения светодиодных источников света (СИС) выбираются из соотношения

$$R_{\text{УФ}} : R_{\text{З}} : R_{\text{ИК}} \approx 0,7 : 0,85 : 1,$$

где $R_{\text{УФ}}$ – радиус кругового расположения источников света ультрафиолетового канала, $R_{\text{З}}$ – зеленого и $R_{\text{ИК}}$ – инфракрасного.

Такое расположение гарантирует отсутствие взаимного экранирования кристаллов и равномерный отвод тепла [18]. Светодиодные источники света в каждом ряду располагаются по аperiodической схеме. Коэффициент неравномерности освещенности U_0 в рабочем поле диаметром 40 мм при этом должен составлять не менее 0,85 во всем допуске высот. Для исключения спектральных наложений управление источниками света каждого из каналов должно осуществляться последовательными импульсами, синхронизированными с экспозицией камеры [19].

Выбор габаритов осветительного прибора и его кольцевой формы продиктованы необходимостью вписать осветительный прибор в пространство, ограниченное размером поля зрения объектива камеры, элементами технологической оснастки и контролируемой плоскостью.

Далее определяются фотометрические уровни для каждого из спектральных каналов. Для УФ необходима энергетическая плотность 5 мВт/см^2 , достаточная для регистрации микропор $\geq 30 \text{ мкм}$ за счет возбуждения собственной флуоресценции силикона. Зеленый канал обеспечивает максимальный зеркально-диффузный контраст силикон-алюминий. Требуемая освещенность 10 клк ($\approx 15 \text{ мВт/м}^2$), что позволяет уверенно выявлять неполное прилегание шириной от $0,1 \text{ мм}$. ИК «просвечивает» слой герметика благодаря различию пропускания силикона и воздуха. Для визуализации газовых включений диаметром $\geq 80 \text{ мкм}$ необходима радиантная плотность около 30 мВт/см^2 [20, 21].

Деление окружности осветительного прибора целесообразнее всего производить на равные дуги с азимутальным шагом $2 \dots 10^\circ$, что обеспечивает различный линейный интервал между соседними площадками для установки СИС и является достаточным для отвода тепла при их работе и исключения взаимного экранирования излучателей. Это позволяет описать пространственное распределение освещенности через «точечный метод» – подход, в котором протяженный источник аппроксимируется совокупностью точечных эмиттеров [22].

Примем, что локальная освещенность в произвольной точке P_k , находящейся в области контроля, моделируется в приближении суперпозиции точечных излучателей:

$$E(P_k) = \sum_{i=1}^n \frac{I_{i(j)} \cos \gamma_{ik}}{r_{ik}^2},$$

где $E(P_k)$ – освещенность в точке P_k (для зеленого диапазона (532 нм) величина $E(P_k)$ выражается в лк , для УФ и ИК – в мВт/см^2); n – число СИС, работающих в спектральном канале j ; $I_{i(j)}$ – сила света i -го светодиода канала j (в кд (зеленый) или в Вт/ср (для УФ- и ИК-каналов); r_{ik} – расстояние от i -го источника до точки P_k , м ; γ_{ik} – угол между оптической осью СИС и нормалью к контролируемой плоскости, рад .

Также примем, что средний уровень освещенности в области контроля определяется

арифметическим средним по множеству контрольных точек для каждой длины волны:

$$E_{\text{ср}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K E(P_k),$$

где $E_{\text{ср}}$ – средняя освещенность в контролируемой области, лк ; K – число контрольных точек на дискретной сетке диаметром 40 мм .

Для оценки фотометрической однородности светового поля в области контроля используется коэффициент равномерности:

$$U_0 = \min_{j \in \{1,2,3\}} \left[\frac{\min_k E_j(P_k)}{\max_k E_j(P_k)} \right],$$

где U_0 – коэффициент равномерности освещенности, безразмерная величина; $\min_k E_j(P_k)$

и $\max_k E_j(P_k)$ – соответственно, минимальная и максимальная освещенность в точках P_k , лк .

Целевые энергетические уровни и ограничения:

$$\begin{cases} E_{\text{УФ,ср}} \geq 5 \text{ мВт/см}^2, \\ E_{\text{З,ср}} \geq 10 \text{ клк}, \\ E_{\text{ИК,ср}} \geq 30 \text{ мВт/см}^2, \\ U_0 \geq 0,85. \end{cases}$$

Для каждого спектрального канала $j \in \{1,2,3\}$, соответствующего выбранной длине волны, энергетическая плотность излучения в контрольной плоскости аппроксимируется выражением

$$\Phi_j(\lambda) = I_j \delta_j(\lambda),$$

где $\Phi_j(\lambda)$ – спектральная плотность излучения в плоскости герметизирующего шва от источников j -го спектрального диапазона, $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{нм)}$; I_j – сила света каждого светодиода в диапазоне j , кд ; $\delta_j(\lambda)$ – нормированная спектральная функция конкретного источника света (безразмерная величина) такая, что

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \delta_j(\lambda) d\lambda = 1.$$

Сравнение энергетического профиля каждого канала со спектральным откликом системы технического зрения проводится через интегральную метрику отклонения:

$$\Psi_j = \frac{\int_{\lambda_{\min,j}}^{\lambda_{\max,j}} |\Phi_j - \rho(\lambda)R(\lambda)| d\lambda}{\int_{\lambda_{\min,j}}^{\lambda_{\max,j}} \rho(\lambda)R(\lambda) d\lambda} \leq 0,05,$$

где Ψ_j – безразмерный показатель спектрального расхождения между излучением источников и эталонным профилем; $\rho(\lambda)$ – приведенная отражательная способность герметизируемой поверхности, безразмерная величина; $R(\lambda)$ – спектральная чувствительность матрицы камеры технического зрения, безразмерная величина; $\lambda_{\min,j}, \lambda_{\max,j}$ – границы спектрального диапазона, соответствующие ширине пропускания конкретного канала (например, ± 10 нм от центра полосы), нм.

Пороговое значение $\Psi_j \leq 0,05$ определяет допустимый уровень искажения, при котором стабильность алгоритмов выделения дефектов сохраняется, а контрастность ключевых признаков визуального анализа не ухудшается по сравнению с откалиброванным эталоном.

Таким образом, возможно сформулировать дискретную конфигурацию и параметры системы освещения:

1) бинарная матрица размещения СИС

$$S = \{s_{i,j}\} \in \{0,1\}^{N \times 3},$$

если $s_{i,j} = 1$, то в позиции i установлен СИС канала j ; N – суммарное количество посадочных мест в трех концентрических рядах;

2) вектор сил световых каналов

$$\mathbf{I} = (I_{\text{УФ}}, I_3, I_{\text{ИК}})^T;$$

3) ограничение по тепловой мощности

$$Q_j(I_j)n_j \leq Q_{j,\text{доп}},$$

где n_j – количество СИС канала j ; $Q_j(I_j)$ – тепловая мощность, выделяемая одним СИС канала j при силе света I_j , Вт; $Q_{j,\text{доп}}$ – максимально допустимая тепловая нагрузка на канал j , определяемая условиями теплоотвода, Вт.

В результате формируется задача вариационной оптимизации, при которой необходимо найти такую пару параметров S^*, \mathbf{I}^* , при которой выполняются ограничения по целевым энергетическим уровням: равномерности освеще-

щения и тепловой мощности для каждого спектрального светового канала, причем

$$(S^*, \mathbf{I}^*) = \arg \min_{\mathbf{I}} \{ \sigma_E^2(S, \mathbf{I}) + \alpha \Phi_{U_0}(S, \mathbf{I}) \},$$

где $\sigma_E^2(S, \mathbf{I})$ – дисперсия распределения освещенности (или облученности) в контролируемой плоскости; α – вес при штрафе за снижение равномерности U_0 , задается таким образом, чтобы при отклонении U_0 на 0,01 составной функционал возрастал на ту же величину, что и при увеличении дисперсии поля на квадрат относительного отклонения, равного 1 %; $\Phi_{U_0}(S, \mathbf{I})$ – штрафная функция, принимающая нулевое значение при $U_0 \geq 0,85$ и возрастающая по квадратичному закону при снижении коэффициента равномерности:

$$\Phi_{U_0} = \max[(0,0,85 - U_0)]^2.$$

В численной реализации задача решается двухуровневым алгоритмом: на внешнем уровне перебираются допустимые апериодические конфигурации S (три концентрических ряда, радиусы $R_{\text{УФ}} : R_3 : R_{\text{ИК}} \approx 0,7 : 0,85 : 1$); на внутреннем уровне для фиксированного S вектор \mathbf{I} уточняется стохастическим градиентом с шагом Барзилай – Борвейна, что обеспечивает сходимость к локальному минимуму без расчета гессиана, методологически обоснованного в работе Ванга, Ву и Матвеева [23].

Моделирование и анализ результатов

Для верификации предложенной вариационной модели было проведено численное моделирование, имитирующее пространственно-спектральную работу осветительного прибора.

Численное моделирование проводилось на основе оптической модели точечных ламбертовых излучателей с учетом геометрии кольцевой трехканальной системы освещения и параметров, заданных в разделе постановки задачи, и выполнена в среде Python 3.12 на прямоугольной сетке с шагом 0,5 мм, охватывающей контролируемую область диаметром 40 мм. Каждая площадка СИС аппроксимировалась точечным излучателем с ламбертовым распределением: нормированная диаграмма силы света принималась пропорциональной $\cos\vartheta$, где ϑ – угол между оптической осью СИС и нормалью к плоскости контроля; вклад каждого источника масштабировался законом обратных квадратов расстояния. Расчет освещенности/облученности $E(P_k)$ в узлах сетки, коэффициента равномерности

$U_0 = \min(E)/\max(E)$, а также спектральной согласованности каналов осуществлялся по зависимостям, введенным в разделе постановки задачи (суперпозиция точечных излучателей; коэффициент равномерности U_0 ; интегральная метрика спектрального расхождения Ψ_j ; тепловые ограничения по суммарной мощности).

Конфигурация включала три концентрических кольца с радиусами 70, 85 и 100 мм соот-

ветственно; на каждом радиусе расположено 36 СИС. Рабочая высота h между платой светильника и плоскостью контроля принималась 55 мм; объектив камеры ориентирован строго по оси кольца, что исключает скошенные лучи и связанные с ними блики на анодированном торце корпуса.

Геометрические и электрические данные, принятые за начальные условия модели, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры используемых источников света и условия моделирования

Table 1. Optical source parameters and simulation setup details

Канал	λ_0 , нм	Ширина спектра на уровне половины от максимума пика, нм	Целевая величина*	Номинальная сила света**	Кол-во СИС n_j	Радиус ряда R_j , мм	Коэффициент масштабирования k_j
УФ	405 ± 10	12	5 мВт/см ²	18 мВт/ср	36	70	1,07
З	532 ± 8	30	10 клк	24 кд	36	85	0,96
ИК	850 ± 15	35	30 мВт/см ²	20 мВт/ср	36	100	1,12

* Средняя плотность излучения в плоскости контроля диаметром 40 мм.
 ** Данные каталога LED-кристаллов без вторичной оптики при номинальном токе

При заданных номинальных силах света первых трех строк таблицы средние значения в плоскости контроля оказались ниже целевых, поэтому для каждого канала введены масштабирующие коэффициенты k_j (последний столбец), которые умножаются на табличные силы света. Нормировка не приводит к превышению теплового лимита: суммарная электрическая мощность расчета составила 8,7 Вт, что дает расчетный перегрев основания 2,9 °С.

На рисунке 2 представлены полученные в результате моделирования 3D-поверхности и двумерные тепловые карты для каждого спектра и их пиковые и средние значения.

Суммарное поле характеризуется коэффициентом равномерности $U_{0,\Sigma} = 0,87$, который получен как отношение минимальной к максимальной суммарной освещенности на дискретной сетке (3449 узлов) диаметром 40 мм.

Для сравнения разработанной модели с традиционными осветительными приборами для систем визуального контроля на основе камер технического зрения использована регулярная топология: те же 108 СИС расставлены по трем радиусам с равным угловым шагом $\Delta\varphi = 360^\circ/36$. При такой схеме дисперсия суммарного поля составила $1,06 \cdot 10^3$, тогда как для аperiodической – $7,0 \cdot 10^2$, что показывает снижение дисперсии на $(1,06 \dots 0,70)/1,06 \approx 34\%$. Таким образом, цель $U_0 \geq 0,85$ выполнена с запасом. Наблюдаемая седлообразная форма профиля объясняется тем, что вклад УФ-кольца

максимален в центре поля, тогда как ИК-канал «подсвечивает» периферию.

Чувствительность модели к технологическим отклонениям проверялась варьированием высоты h : изменение на ± 5 мм снижает суммарный U_0 не более чем на 0,015. Десятипроцентная рассинхронизация токов одного из каналов увеличивает дисперсию поля менее чем на 5 %, что подтверждает устойчивость решения. Все целевые энергетические уровни, равномерность и тепловые ограничения выполнены при реалистичных параметрах, следовательно, предложенная трехкольцевая аperiodическая архитектура осветительного прибора пригодна к практической реализации в сборочной линии CubeSat-конструкций.

Сравнение различных топологий бинарного размещения и уровней каналов представлено в таблице 2.

В таблице 2 приведены результаты для регулярного размещения S_{reg} и аperiodической оптимизированной топологии S^* , а также для шести модификаций S^* с изменением силы света каждого канала на $\pm 10\%$. Видно, что топология S^* обеспечивает более высокий коэффициент равномерности $U_{0,\Sigma}$ (0,87 против 0,82 у S_{reg}) и меньшую дисперсию поля, что соответствует улучшению равномерности на $\approx 34\%$. Варьирование силы света отдельных каналов в пределах $\pm 10\%$ приводит к изменению $U_{0,\Sigma}$ не более чем на 0,02, что указывает на устойчивость выбранной аperiodической схемы к производственным допускам и эксплуатационным флуктуациям.

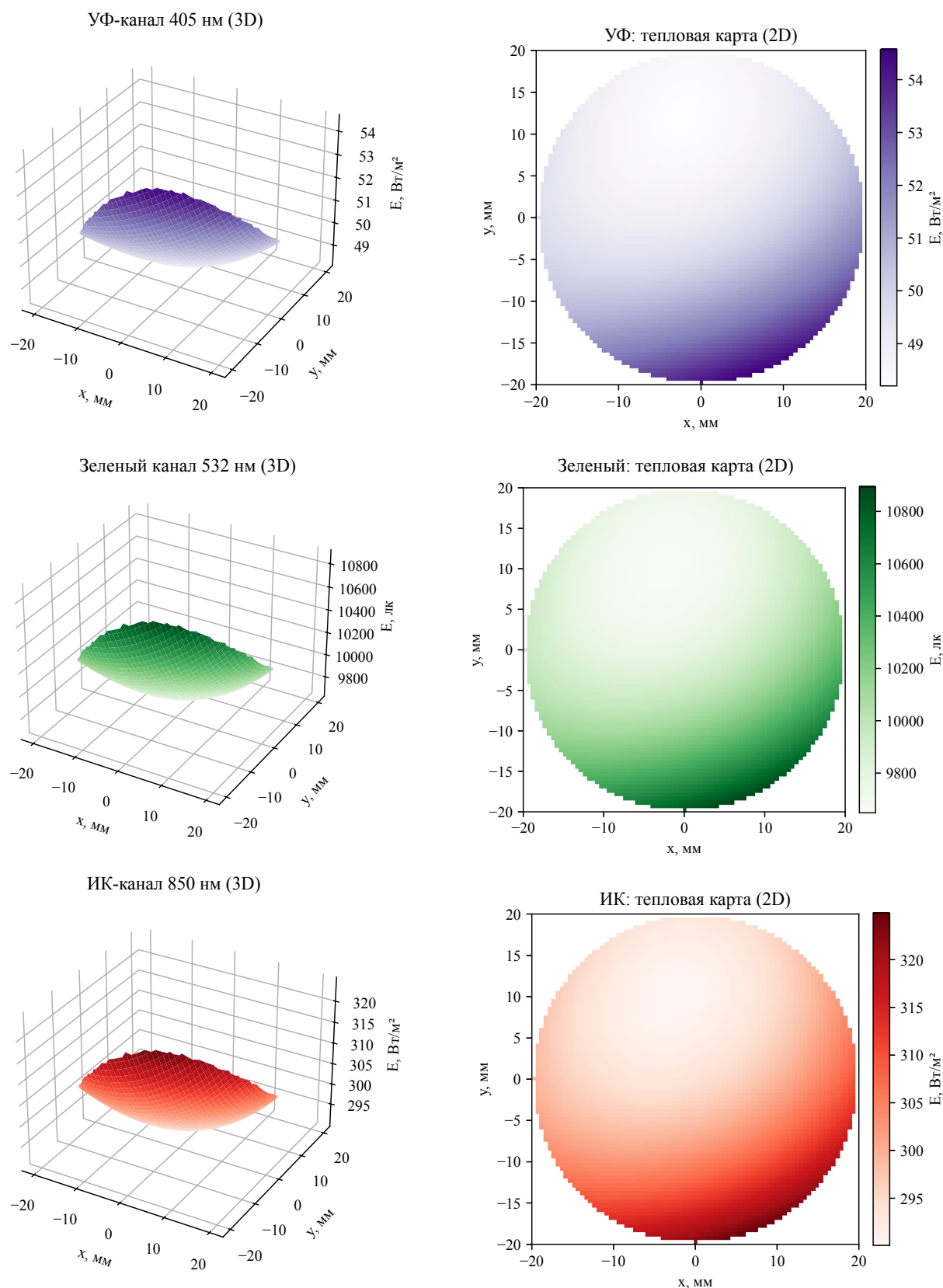


Рис. 2. Смоделированные 3D-поверхности и двумерные тепловые карты освещенности зоны визуального контроля для УФ-, 3- и ИК-канала

Fig. 2. Simulated three-dimensional illuminance distributions and two-dimensional heat maps of the visual inspection area for the ultraviolet, green, and infrared channels

Таблица 2. Сравнительные результаты моделирования коэффициента равномерности, дисперсии суммарного поля и средних уровней каналов для различных топологий и вариаций силы света

Table 2. Comparative modelling results for uniformity coefficient, total field variance, and average channel levels for different layouts and luminous intensity variations

Конфигурация	$U_{0,\Sigma}$	$\sigma^2(E_{\Sigma})$, усл. ед.	$\bar{E}_{УФ}$, мВт/см ²	\bar{E}_3 , кЛк	$\bar{E}_{ИК}$, мВт/см ²
Регулярное расположение СИС (S_{reg})	0,82	$1,06 \cdot 10^3$	5,0	10,1	30,1
Предлагаемое аperiodическое расположение СИС (S^*)	0,87	$0,70 \cdot 10^3$	5,1	10,3	30,4
S^* , $I_{УФ} + 10\%$	0,85	$0,78 \cdot 10^3$	5,6	10,3	30,4
S^* , $I_{УФ} - 10\%$	0,88	$0,73 \cdot 10^3$	4,7	10,3	30,4
S^* , $I_3 + 10\%$	0,86	$0,74 \cdot 10^3$	5,1	11,3	30,4
S^* , $I_3 - 10\%$	0,87	$0,72 \cdot 10^3$	5,1	9,3	30,4
S^* , $I_{ИК} + 10\%$	0,86	$0,76 \cdot 10^3$	5,1	10,3	33,4
S^* , $I_{ИК} - 10\%$	0,88	$0,71 \cdot 10^3$	5,1	10,3	27,4

При увеличении или уменьшении силы света одного из каналов дисперсия возрастает, что указывает на то, что найденная точка является локальным (и в рамках нашей постановки – глобальным) минимумом. Наибольший рост дисперсии наблюдается при увеличении силы света УФ-канала на 10 % (до $0,78 \cdot 10^3$), что связано с формированием более выраженного центрального пика в распределении поля.

В то же время максимальное значение коэффициента равномерности $U_{0,\Sigma} = 0,88$ достигается в двух случаях – при уменьшении силы света УФ-канала на 10 % и при уменьшении силы света ИК-канала на 10 %. Это объясняется тем, что в этих сценариях частично компенсируется избыточный вклад соответствующего канала в зоне его максимальной интенсивности, что приводит к выравниванию крайних и центральных участков профиля.

Таким образом, экстремальные значения целевых функций подтверждают корректность найденного оптимума: конфигурация S^* при номинальных параметрах соответствует минимуму дисперсии при близком к максимальному значению коэффициента равномерности, а смещение параметров в любую сторону ведет к ухудшению одного из критериев.

Выводы

В работе предложена трехканальная архитектура кольцевого светодиодного осветительного прибора, предназначенного для обеспечения заданной освещенности в зоне визуального контроля герметизирующего шва МКА типа CubeSat форм-фактора 1U/2U камерой технического зрения. Математическая постановка сформулирована как двухуровневая вариационная задача: на верхнем уровне оптимизируется аperiodическая дискретная раскладка кристаллов, на нижнем – вектор их сил света с учетом фотометрических и тепловых ограничений.

Численное моделирование показало достижение целевых энергетических уровней и заданного коэффициента равномерности суммарного поля. Тем самым подтверждена реализуемость конструкции и ее устойчивость к технологическим отклонениям высоты установки и разбалансировке токов. В дальнейшей работе предполагается экспериментальная верификация результатов на прототипе осветительного прибора и уточнение модели с учетом экспериментального анализа поверхности герметика.

Таким образом, модель формирует основу для количественного анализа эффективности осветительной системы в заданных условиях и позволяет переходить от номинальных параметров устройств к функциональным метрикам качества освещения, подлежащим верификации, как в симуляции, так и в ходе экспериментального прототипирования.

Библиографические ссылки

1. Doyle M. [et al.] (2021) Mission testing for improved reliability of CubeSats: Proc. of SPIE, vol. 11852, pp. 118526M-1-118526M-20 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.2600305> (accessed: 09.04.2025).
2. Chacon S. [et al.] (2022) Modelling CubeSat structure for thermal analysis: 2022 IEEE XXIX Int. Conf. on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), pp. 1-4 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1109/INTERCON55795.2022.9870086> (accessed: 09.04.2025).
3. Latachi I. [et al.] (2024) A systematic approach for CubeSat mission risk analysis: 2024 Int. Conf. on Global Aeronautical Engineering and Satellite Technology (GAST), pp. 1-6 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1109/GAST60528.2024.10520794> (accessed: 09.04.2025).
4. Stesina F. [et al.] Investigation of a CubeSat in orbit anomaly through verification on ground. *Aerospace* [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.3390/aerospace7040038> (accessed: 14.04.2025).

5. *Szewczyk T.* [et al.] (2023) Standardization concepts for CubeSat applications: 2023 European Data Handling & Data Processing Conf. (EDHPC), pp. 1-5 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.23919/EDHPC59100.2023.10396512> (accessed: 14.04.2025).
6. *Bollattino S.* [et al.] (2024) Fast development and validation of a sensing suite system for CubeSats. *Acta Astronautica* [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.07.005> (accessed: 14.04.2025).
7. *Девятков Д. А., Чернова А. А.* Оценка возможности автоматизации формирования технологических процессов в мелкосерийном производстве // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 3. С. 67–74. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-3-67-74
8. Разработка технологии 3D-печати корпусных деталей МКА НК / Д. В. Антипов, М. А. Михеев, В. И. Панин, В. В. Жуков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25, № 4 (114). С. 110–113. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-110-113
9. *Bouwmeester J.* [et al.] (2022) Improving CubeSat reliability: Subsystem redundancy or improved testing? *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 220, Article 108288 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108288> (accessed: 15.05.2025).
10. *Jo H.J.* [et al.] (2022) Analysis of a CubeSat magnetic cleanliness for the space science mission. *Journal of Space Technology and Applications* [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.52912/jsta.2022.2.1.41> (accessed: 15.05.2025).
11. *Welle R.* [et al.] (2020) Overview of CubeSat technology: Handbook of Small Satellites [Electronic resource]. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20707-6_3-1 (accessed: 15.05.2025).
12. *Палабугин М. В., Калужный Д. Г.* Современное состояние лазерных технологий в области нанесения функциональных покрытий // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 1. С. 13–22. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-1-13-22
13. *Abbasy M.* [et al.] (2023) System design and review of a very low-cost 6U CubeSat platform based on Pluto experience. *Advances in Astronautics Science and Technology*, vol. 6, pp. 1-18. DOI: 10.1007/s42423-023-00137-9
14. *Veljovic M.J.* [et al.] (2020) Antennas for CubeSat communication: EPFL Thesis [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.5075/EPFL-THESIS-7489> (accessed: 15.05.2025).
15. *De R.* [et al.] (2022) Enabling science with CubeSats - trends and prospects. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, vol. 3, pp. 221-231. DOI: 10.1109/JMASS.2022.3209897
16. *Koehler S., Indahl B., Szewczyk D., Vorobiev D., Fleming B.* (2023) Development and fabrication of a custom vacuum bakeout system for the Far-UV CubeSat SPRITE: Proc. SPIE 12678, UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts IX, vol. 12678, pp. 1267819. DOI: 10.1117/12.2676554
17. *Jeon D., Park J., Ryu J., Choi H.* (2024) Design of an Internal Focusing Tube Lens for Optical Inspection Systems. *Applied Sciences*, vol. 14, no. 4. DOI: 10.3390/app14041518
18. *Кузьменко В. П.* Модель спектрального анализа для определения температуры р-п-перехода в бытовых светодиодах на основе нитрида галлия // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2025. № 2 (370). С. 135–147. DOI: 10.33979/2073-7408-2025-370-2-135-147
19. *Васин П. В., Баранова Е. В.* Методика определения погрешности стенда измерения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутников с помощью эталонных объектов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 3. С. 7–22.
20. *Затонский А. В., Варламова С. А., Федосеева К. А.* Улучшение компьютерного распознавания параметров пены калийных флотомашин за счет учета антибликов пузырей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2022. Т. 22, № 3. С. 57–67.
21. *Юлаева Ю. В., Хомяков А. Ю., Туев В. И.* Декомпозиционная световая математическая модель светодиодного излучающего элемента // Научный вестник ИГТУ. 2020. № 4 (80). С. 177–197. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-177-197
22. Расчет оптических элементов при протяженном источнике излучения / Е. В. Бызов, Л. Л. Досколович, С. В. Кравченко, М. А. Моисеев, Н. Л. Казанский // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 1. С. 40–47.
23. *Ванг Л., Ву Х., Матвеев И.* Метод стохастического градиента с шагом Барзилай – Борвейна для безусловной нелинейной оптимизации // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2021. № 1. С. 79–90. DOI: 10.31857/S0002338821010108

References

1. *Doyle M.* [et al.] (2021) Mission testing for improved reliability of CubeSats: Proc. of SPIE, vol. 11852, pp. 118526M-1-118526M-20 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.2600305> (accessed: 09.04.2025).
2. *Chacon S.* [et al.] (2022) Modelling CubeSat structure for thermal analysis: 2022 IEEE XXIX Int. Conf. on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), pp. 1-4 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1109/INTERCON55795.2022.9870086> (accessed: 09.04.2025).
3. *Latachi I.* [et al.] (2024) A systematic approach for CubeSat mission risk analysis: 2024 Int. Conf. on Global Aeronautical Engineering and Satellite Technology (GAST), pp. 1-6 [Electronic resource]. Available at:

<https://doi.org/10.1109/GAST60528.2024.10520794> (accessed: 09.04.2025).

4. Stesina F. [et al.] Investigation of a CubeSat in orbit anomaly through verification on ground. *Aerospace* [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.3390/aerospace7040038> (accessed: 14.04.2025).

5. Szewczyk T. [et al.] (2023) Standardization concepts for CubeSat applications: 2023 European Data Handling & Data Processing Conf. (EDHPC), pp. 1-5 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.23919/EDHPC59100.2023.10396512> (accessed: 14.04.2025).

6. Bollattino S. [et al.] (2024) Fast development and validation of a sensing suite system for CubeSats. *Acta Astronautica* [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.07.005> (accessed: 14.04.2025).

7. Devyatov D.A., Chernova A.A. (2023) [Evaluation of the possibility of automating process formation in small-batch production]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 26, no. 3, pp. 67-74. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-3-67-74 (in Russ.).

8. Antipov D.V., Mikheev M.A., Panin V.I., Zhukov V.V. (2023) [Development of 3D printing technology for CubeSat body components]. *Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 25, no. 4 (114), pp. 110-113. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-110-113 (in Russ.).

9. Bouwmeester J. [et al.] (2022) Improving CubeSat reliability: Subsystem redundancy or improved testing? Reliability Engineering and System Safety, vol. 220, Article 108288 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108288> (accessed: 15.05.2025).

10. Jo H.J. [et al.] (2022) Analysis of a CubeSat magnetic cleanliness for the space science mission. *Journal of Space Technology and Applications* [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.52912/jsta.2022.2.1.41> (accessed: 15.05.2025).

11. Welle R. [et al.] (2020) Overview of CubeSat technology: Handbook of Small Satellites [Electronic resource]. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20707-6_3-1 (accessed: 15.05.2025).

12. Palabugin M.V., Kalyuzhny D.G. (2023) [Current state of laser technologies for functional coatings]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 26, no. 1, pp. 13-22. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-1-13-22 (in Russ.).

13. Abbasy M. [et al.] (2023) System design and review of a very low-cost 6U CubeSat platform based on Pluto experience. *Advances in Astronautics Science and*

Technology, vol. 6, pp. 1-18. DOI: 10.1007/s42423-023-00137-9

14. Veljovic M.J. [et al.] (2020) Antennas for CubeSat communication: EPFL Thesis [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.5075/EPFL-THESIS-7489> (accessed: 15.05.2025).

15. De R. [et al.] (2022) Enabling science with CubeSats - trends and prospects. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, vol. 3, pp. 221-231. DOI: 10.1109/JMASS.2022.3209897

16. Koehler S., Indahl B., Szewczyk D., Vorobiev D., Fleming B. (2023) Development and fabrication of a custom vacuum bakeout system for the Far-UV CubeSat SPRITE: Proc. SPIE 12678, UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts IX, vol. 12678, pp. 1267819. DOI: 10.1117/12.2676554

17. Jeon D., Park J., Ryu J., Choi H. (2024) Design of an Internal Focusing Tube Lens for Optical Inspection Systems]. *Applied Sciences*, vol. 14, no. 4. DOI: 10.3390/app14041518

18. Kuzmenko V.P. (2025) [Spectral analysis model for determining the p-n junction temperature in household GaN-based LEDs]. *Fundamental'nye i prikladnye problem tekhniki i tekhnologii*, no. 2 (370), pp. 135-147. DOI: 10.33979/2073-7408-2025-370-2-135-147 (in Russ.).

19. Vasin P.V., Barinova E.V. (2022) [Method for determining the error of a test bench for measuring the mass-centering and inertial characteristics of nanosatellites using reference objects]. *Vestnik of Samara University. Aerospace Engineering, Technologies and Machine Building*, vol. 21, no. 3, pp. 7-22 (in Russ.).

20. Zatonsky A.V., Varlamova S.A., Fedoseeva K.A. (2022) [Improving computer recognition of potassium flotation foam parameters by accounting for anti-glare bubble properties]. *Vestnik of South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automation, Control, Radioelectronics*, vol. 22, no. 3, pp 57-67 (in Russ.).

21. Yulaeva Yu.V., Khomyakov A.Yu., Tuev V.I. (2020) [Decomposition-based light mathematical model of a LED emitting element]. *Nauchny Vestnik NGPU*, no. 4 (80), pp. 177-197. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-177-197 (in Russ.).

22. Byzov E.V., Doskolovich L.L., Kravchenko S.V., Moiseev M.A., Kazansky N.L. (2023) [Optical element design for extended light sources]. *Computer Optics*, vol. 47, no. 1, pp. 40-47 (in Russ.).

23. Wang L., Wu H., Matveev I. (2021) [A stochastic gradient method with Barzilai - Borwein step size for unconstrained nonlinear optimization]. *Izvestiya RAN. Theory and Control Systems*, no. 1, pp. 79-90. DOI: 10.31857/S0002338821010108 (in Russ.).

Spectrally-Matched Led Illumination System Modeling for Visual Inspection of Sealing Integrity in Small Satellite Enclosures

V.P. Kuzmenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

S.V. Soleniy, PhD in Engineering, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian

A numerical model has been developed for a three-channel ring-shaped LED lighting device designed for a visual automated inspection system for sealing joints on small CubeSat 1U and 2U spacecraft using a machine vision camera. The model assumes the periodic operation of three different spectral channels - ultraviolet, visible green, and near-infrared ranges of the spectral distribution of light and is formulated as a two-level variational problem linking the discrete arrangement of LED light sources with a continuous set of their light characteristics, subject to constraints on uniformity and sufficiency of illumination in the visual control zone. The model is presented as a two-level variational optimization problem linking the binary topology of emitter placement and continuous levels of their light brightness with restrictions on the uniformity of illumination and thermal load; The numerical implementation of the model is performed by approximating point emitters by the shape of a Lambertian object and discretizing the controlled area with a diameter of 40 mm with a step of 0.5 mm, three rings of 36 sources at radii of 70, 85, and 100 mm, and a working height of 55 mm. Simulation results meet the target radiometric and photometric specifications: mean irradiance for the ultraviolet channel of 5.1 mW/cm²; mean illuminance for the green channel of 10.3 klx; and mean irradiance for the near-infrared channel of 30.4 mW/cm². The composite-field uniformity index equals 0.87, and, relative to a regular equal-angular arrangement, the variance of the composite field is reduced by 34 %. These findings substantiate the suitability of the model for the design and optimization of spectrally adaptive, three-ring LED illuminators-spanning source placement topology, spectral composition, and drive levels-required by machine-vision systems for visual inspection during modular assembly and sealing of small spacecraft enclosures.

Keywords: LED light source, spectral channels, machine vision, CubeSat, visual inspection, numerical modeling, variational optimization, thermal constraints, optical uniformity, small spacecraft assembly.

Получено 17.07.2025

Образец цитирования

Кузьменко В. П., Солёный С. В. Моделирование освещенности от светодиодного осветительного прибора для системы визуального контроля герметизации корпуса малого космического аппарата // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 3. С. 4–14. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-4-14

For Citation

Kuzmenko V.P., Soleniy S.V. (2025) [Spectrally-Matched Led Illumination System Modeling for Visual Inspection of Sealing Integrity in Small Satellite Enclosures]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 3, pp. 4-14. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-4-14 (in Russ.).