

DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-131-140

Лабораторный имитатор авиакосмических видеоспектральных измерений поверхности и атмосферы Земли

Ю.В. Беляев, О.Д. Гринадёр, А.В. Домарацкий, П.В. Ивуть, Г.С. Литвинович,
А.О. Мартинов, В.В. Станчик, А.Д. Хомицевич, Н.Г. Щербаков

Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова 7, г. Минск 220045, Беларусь

Поступила 13.04.2026

Принята к печати 28.05.2026

Авиационная и космическая видеоспектральная съёмка является ключевым инструментом дистанционного зондирования поверхности и атмосферы Земли, однако её точность критически зависит от строгой предполётной калибровки и верификации аппаратуры. Целью данной работы являлась разработка и демонстрация лабораторного имитатора, способного воспроизводить эталонные спектральные сцены для калибровки и методической отработки видеоспектральных систем дистанционного зондирования. В работе представлен лабораторный имитатор авиакосмических видеоспектральных измерений поверхности и атмосферы Земли «Спектросинтезатор», предназначенный для апробации и калибровки аппаратуры дистанционного зондирования. Комплекс включает систему формирования спектральной плотности энергетической яркости на основе фотометрической сферы с набором управляемых светодиодных и галогенных источников, систему формирования изображения с подвижными мирами и систему регистрации. Показано, что имитатор позволяет воспроизводить заданный эталонный спектр яркости сцены, заданный по расчётам в модели переноса излучения *libRadTran* или по данным спектральной библиотеки, при этом неоднородность яркости по выходному зрачку и временная стабильность источника удовлетворяют требованиям к наземной калибровке видеоспектральной аппаратуры. На примере прибора БЕКАС продемонстрирована возможность подбора режимов работы в лабораторных условиях и последующего переноса этих настроек в реальные лётные эксперименты, что подтверждает перспективность предложенного имитатора для предварительной настройки и методической отработки видеоспектральных систем дистанционного зондирования.

Ключевые слова: имитатор, спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ), LED, дистанционное зондирование Земли, спектросинтезатор

Адрес для переписки:

Гринадёр О.Д.
Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: oleggrinaderov@gmail.com

Address for correspondence:

Hrynadziorau A.
A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian
State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: oleggrinaderov@gmail.com

Для цитирования:

Ю.В. Беляев, О.Д. Гринадёр, А.В. Домарацкий, П.В. Ивуть,
Г.С. Литвинович, А.О. Мартинов, В.В. Станчик,
А.Д. Хомицевич, Н.Г. Щербаков.
Лабораторный имитатор авиакосмических видеоспектральных
измерений поверхности и атмосферы Земли.
Приборы и методы измерений.
2026. Т. 17. № 2. С. 131–140.
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-131-140

For citation:

Belyaev Yu, Hrynadziorau A, Damaratski A, Ivuts P, Litvinovich H,
Martinov A, Stanchik V, Shcherbakou M, Khamitsevich A.
Laboratory Simulator of Airborne Video-Spectral Experiments
for Calibration of Earth Remote-Sensing Instruments.
Devices and Methods of Measurements.
2026;17(2):131-140. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-131-140

DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-131-140

Laboratory Simulator of Airborne Video-Spectral Experiments for Calibration of Earth Remote-Sensing Instruments

Yu. Belyaev, A. Hrynadziorau, A. Damaratski, P. Ivuts, H. Litvinovich, A. Martinov, V. Stanchik, M. Shcherbakou, A. Khamitsevich

*N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus*

Received 13.04.2026

Accepted for publication 28.05.2026

Abstract

Airborne and spaceborne video-spectral imaging is a key tool for remote sensing of the Earth's surface and atmosphere; however, its accuracy critically depends on rigorous pre-flight calibration and verification of the instrumentation. The aim of this work is to develop and demonstrate a laboratory simulator capable of reproducing reference spectral scenes for the calibration and methodological validation of video-spectral remote sensing systems. The paper presents a laboratory simulator of airborne video spectral measurements of the Earth's surface and atmosphere «Spectrosynthesizer» intended for testing and calibration of remote sensing instruments. The setup includes a spectral radiance forming subsystem based on an integrating (photometric) sphere with controllable LED and halogen sources, an image forming subsystem with movable test targets, and a registration subsystem. It is shown that the simulator can reproduce a given reference scene radiance spectrum specified either from radiative transfer calculations using the libRadTran model or from spectral library data, while the brightness non uniformity over the exit pupil and the temporal stability of the source meet the requirements for ground calibration of video spectral instruments. Using the BEKAS instrument as an example, the possibility of selecting operating modes under laboratory conditions and subsequently transferring these settings to real flight experiments is demonstrated, which confirms the potential of the proposed simulator for pre flight adjustment and methodological verification of video spectral Earth remote sensing systems.

Keywords: simulator, spectral radiance density (SRD), LED, Earth remote sensing, spectrosynthesizer

Адрес для переписки:

Гринадёров О.Д.
Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: oleggrinaderov@gmail.com

Address for correspondence:

Hrynadziorau A.
A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian
State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: oleggrinaderov@gmail.com

Для цитирования:

Ю.В. Беляев, О.Д. Гринадёров, А.В. Домарацкий, П.В. Ивуть,
Г.С. Литвинович, А.О. Мартинов, В.В. Станчик,
А.Д. Хомицевич, Н.Г. Щербаков.
Лабораторный имитатор авиакосмических видеоспектральных
измерений поверхности и атмосферы Земли.
Приборы и методы измерений.
2026. Т. 17. № 2. С. 131–140.
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-131-140

For citation:

Belyaev Yu, Hrynadziorau A, Damaratski A, Ivuts P, Litvinovich H,
Martinov A, Stanchik V, Shcherbakou M, Khamitsevich A.
Laboratory Simulator of Airborne Video-Spectral Experiments
for Calibration of Earth Remote-Sensing Instruments.
Devices and Methods of Measurements.
2026;17(2):131–140. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-131-140

Введение

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко применяются для мониторинга природных и техногенных объектов, при этом качество результатов во многом определяется корректностью калибровки и верификации бортовой оптико-электронной аппаратуры. На практике помимо паспортных характеристик требуется экспериментально проверять чувствительность, диапазоны и спектральные параметры каналов, а также оценивать влияние условий наблюдения (геометрия эксперимента, экспозиция, движение сцены). Эффективный способ обеспечить воспроизводимую проверку аппаратуры ДЗЗ – использование наземных стендов и имитаторов, моделирующих ключевые условия эксперимента в лаборатории.

В современных оптико-измерительных исследованиях часто применяются светодиодные имитаторы спектра, формирующие требуемое распределение излучения суммированием нескольких независимых LED-каналов [1, 2]. Типичной задачей для таких имитаторов является воспроизведение солнечного излучения с заданным спектральным и яркостным составом для тестирования режимов работы солнечных панелей ([3–8]).

Существуют имитаторы на базе интегрирующих сфер и LED излучателей, предназначенные для колориметрических и радиометрических измерений и определения спектральных характеристик сенсоров (например, [9]), но они не относятся к области моделирования натуральных экспериментов.

В целом, прослеживается тренд к увеличению числа спектральных каналов, расширению диапазона длин волн и повышению повторяемости/стабильности при сохранении программной перестройки спектрального состава.

Имитаторы экспериментов в области дистанционного зондирования обычно фокусируются на пространственном распределении яркости сцены и служат для оценки параметров смаза [10]. На этом фоне выделяется разработка NASA [11] по созданию имитатора как спектрального, так и пространственного распределения яркости по полю кадра одновременно. К недостаткам такого стенда можно отнести попиксельный вывод изображения, что ограничивает диапазон возможных экспозиций целевой аппаратуры снизу.

Многие существующие стенды контролируют лишь отдельные параметры, что затрудняет комплексную отработку режимов съёмки и методик обработки. Поэтому актуальна разработка комплекса, который в одной установке формирует заданные спектрально-энергетические условия и воспроизводит контролируемое движение тестовой сцены.

Таким образом, компактные стенды, которые в рамках одной установки обеспечивают воспроизведение спектральной яркости сцены, ориентированной на задачи ДЗЗ, и одновременно имитацию её движения в поле зрения видеоспектрального прибора. Целью работы являлась разработка имитатора авиакосмических видеоспектральных измерений поверхности и атмосферы Земли, включающего возможность имитации как спектрально-энергетических, так и пространственных характеристик эксперимента.

Общая структура имитатора

Имитатор дистанционных авиакосмических видеоспектральных измерений поверхности и атмосферы Земли «Спектросинтезатор» (далее имитатор) предназначен для моделирования условий аэрокосмического эксперимента в лабораторных условиях и исследования аппаратуры ДЗЗ в диапазоне спектра 400–2000 нм. Структурная схема имитатора и направления передачи данных представлены на рисунке 1.

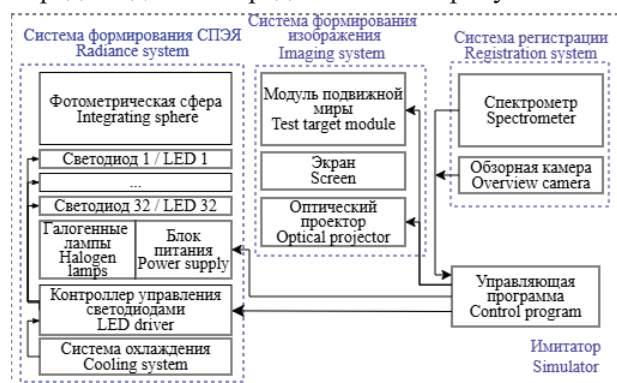


Рисунок 1 – Структурная схема имитатора

Figure 1 – Block diagram of the simulator

Система формирования спектральной плотности энергетической яркости

Система формирования спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) предназначена для формирования излучения

с заданной СПЭЯ и реализована на основе протяжённого источника – фотометрической сферы. Блок-схема управления источниками излучения представлена на рисунке 2. Все источники излучения размещены внутри фотометрической сферы, которая создаёт изотропное излучения на выходном зрачке.

В качестве источников излучения используются светодиодные модули, максимум излучения которых распределён по диапазону 400–1050 нм с шагом 10–20 нм. Управление яркостью каждого отдельного светодиодного излучателя осуществляется при помощи контроллера управления светодиодами, принимающего команды по протоколу USB от управляющей программы. Микроконтроллер в составе контроллера управления выставляет

на программируемом драйвере светодиода необходимое значение тока.

Для инфракрасного диапазона 1000–2000 м имитатор имеет излучатели на основе галогенных ламп, яркость которых регулируется блоком питания (через интерфейс *Ethernet* связи с управляющей программой) путём изменения проходящего через нить накала тока.

Каждый излучатель (светодиод или галогенная лампа) размещён на медном радиаторе с каналом внутри для протекания охлаждающей жидкости. Микроконтроллер отслеживает наличие достаточного потока охлаждающей жидкости, проходящей через радиаторы излучателей, и в случае его изменения сигнализирует звуковым сигналом.

Спектральные характеристики используемых светодиодов представлены на рисунке 3а.

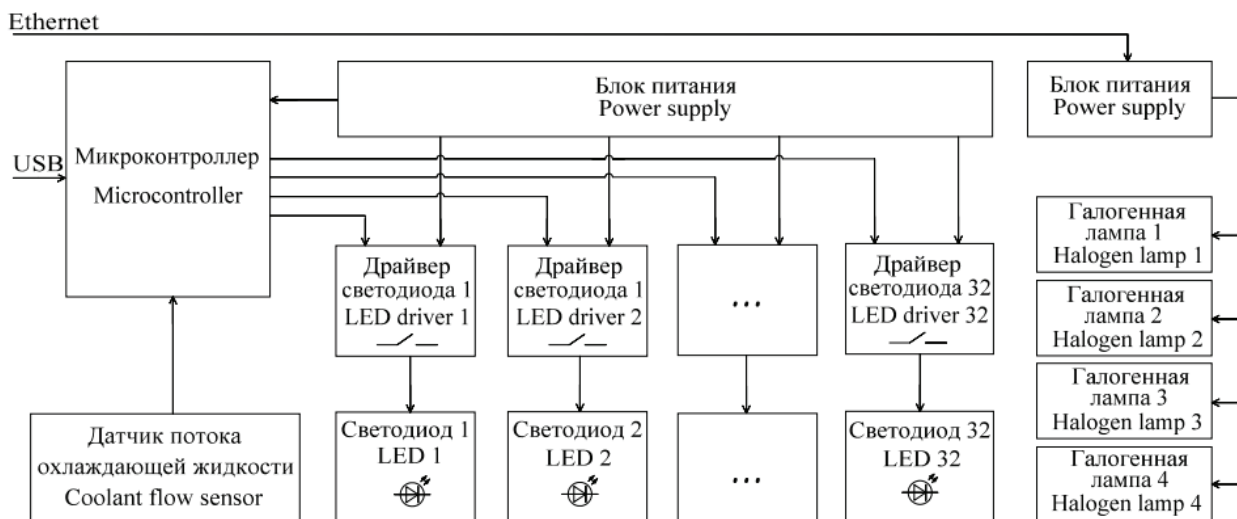


Рисунок 2 – Блок-схема контроллера управления светодиодами и галогенными лампами

Figure 2 – Block diagram of LED and halogen lamp controller

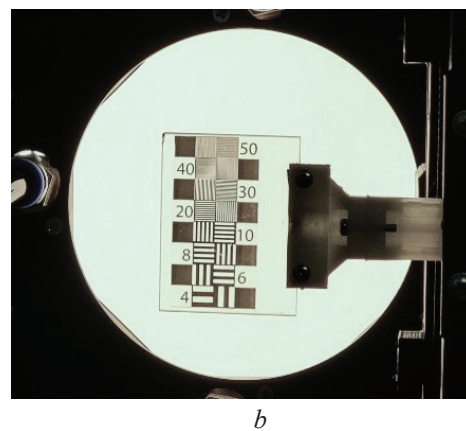
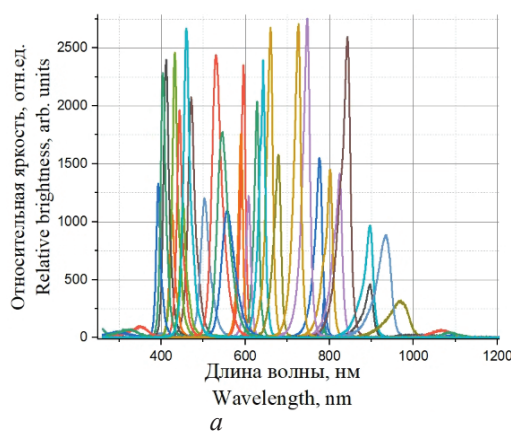


Рисунок 3 – Спектры излучения светодиодов имитатора (а); штриховая мира системы формирования изображения (b)

Figure 3 – Spectra of the simulator (a); test target of simulator imaging system (b)

Одним из немаловажных параметров работы имитаторов излучения служит неоднородность по полю зрения (выходному зрачку фотометрической сферы) и временная стабильность излучения. Для определения этого параметра была измерена интегральная яркость в диапазоне (400–1000 нм) вдоль выходного зрачка фотометрической сферы. На рисунке 4а представлено относительное распределение ин-

тегральной яркости, нормированное на яркость в центре зрачка.

Максимальная относительная неоднородность интегральной яркости вдоль выходного зрачка не превышает 2 %, что является достаточным для задач калибровки видеоспектральной аппаратуры, а при непрерывной работе 4 ч дрейф яркости (рисунок 4б) составил менее 1 % график.

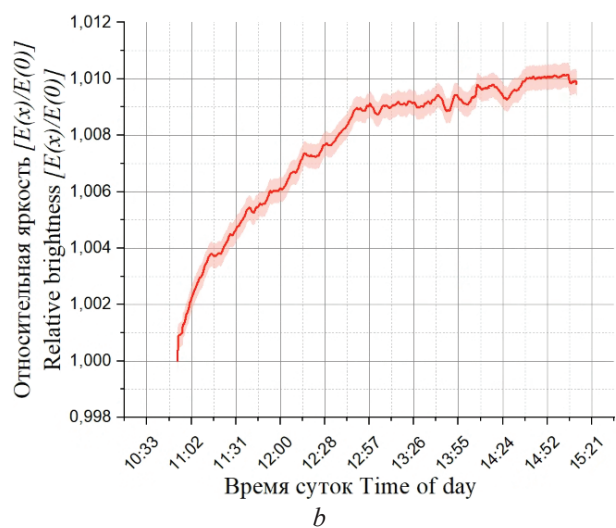
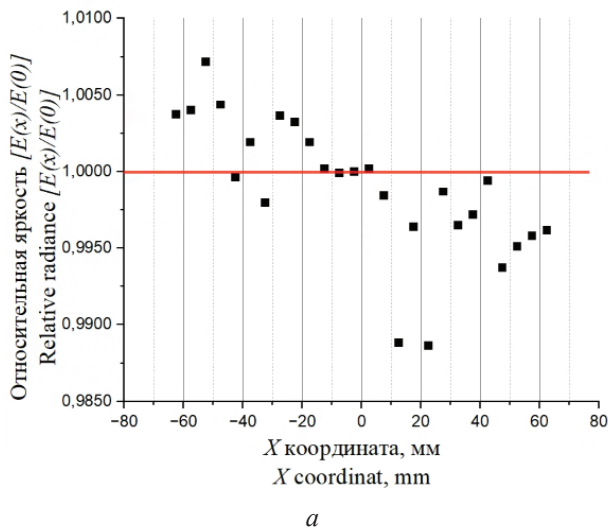


Рисунок 4 – Относительная неоднородность яркости вдоль выходного зрачка фотометрической сферы имитатора с неопределённостью измерения (а) и дрейф относительной яркости источника с неопределённостью яркости источника измерения (b)

Figure 4 – Relative non-uniformity of radiance along the exit pupil of the simulator integrating sphere with measurement uncertainty (a), and drift of the source relative radiance with measurement uncertainty (b)

Система формирования изображения

Система формирования изображения представляет собой оптико механический модуль для имитации движения подстилающей поверхности в поле зрения тестируемого прибора. В её состав входят модуль подвижной миры, оптический проектор и плоский экран. Подвижная мира выполнена в виде тест объекта (рисунок 3б) со штриховыми и (при необходимости) тоновыми элементами различного размера и контраста. Она закреплена на приводном узле, обеспечивающем её перемещение с заданной скоростью и направлением в плоскости кадра. Движение тест-объекта осуществляется со скоростью 0,2–60 мм/с и происходит на фоне выходного зрачка фотометрической сферы, что позволяет одновременно имитировать пространственно-спектральные характеристики сцены.

Также фотоизображение сцены может проецироваться оптическим проектором на экран,

расположенный в зоне наблюдения тестируемой видеоспектральной аппаратуры.

Система регистрации

Система регистрации предназначена для контроля спектрально энергетических параметров сформированного излучения и включает спектрометр и узел обзорной камеры. Спектрометр выполнен из двух полихроматоров: для видимого диапазона (400–1000 нм) и ИК диапазона (1000–2000 нм) со спектральным разрешением 2 и 5 нм соответственно. Для разделения диапазонов используется спектроделитель, что позволяет проводить измерения одновременно в одинаковой геометрии в общем спектральном диапазоне полихроматоров. Измеренный спектр яркости передаётся в окно управляющей программы. Спектральные данные системы регистрации используются как при первоначальной настройке имитатора под заданный эталонный спектр,

так и при последующем контроле его стабильности, что позволяет воспроизводить ранее используемые режимы. Использование обзорной камеры высокого разрешения, входящей в состав системы регистрации, позволяет сохранять внешний вид моделируемой сцены.

Алгоритм работы имитатора

Основной целью имитатора является воспроизведение спектрально-энергетических характеристик сцены. Для этого в окне управляющей программы имеется возможность задать эталонный спектр, воспроизводимый имитатором, двумя способами:

1. При помощи явного задания эталонного спектра яркости (из спектральной библиотеки или измеренного другим прибором);

2. При помощи расчёта СПЭЯ в модели переноса излучения *libRadTran* [12], который позволяет по заданным параметрам атмосферы, подстилающей поверхности и геометрии наблюдения вычислять СПЭЯ. Рассчитанный спектр задаётся в качестве целевого при настройке яркости отдельных каналов имитатора, обеспечивая воспроизведение рассчитанного распределения на выходном зрачке фотометрической сферы.

Вне зависимости от используемого метода задания эталонного спектра алгоритм подбора яркости каждого источника одинаков, общая структура алгоритма представлена на рисунке 5. Для воспроизведения заданного эталонного спектра с помощью светодиодных источников применяется алгоритм численной оптимизации.

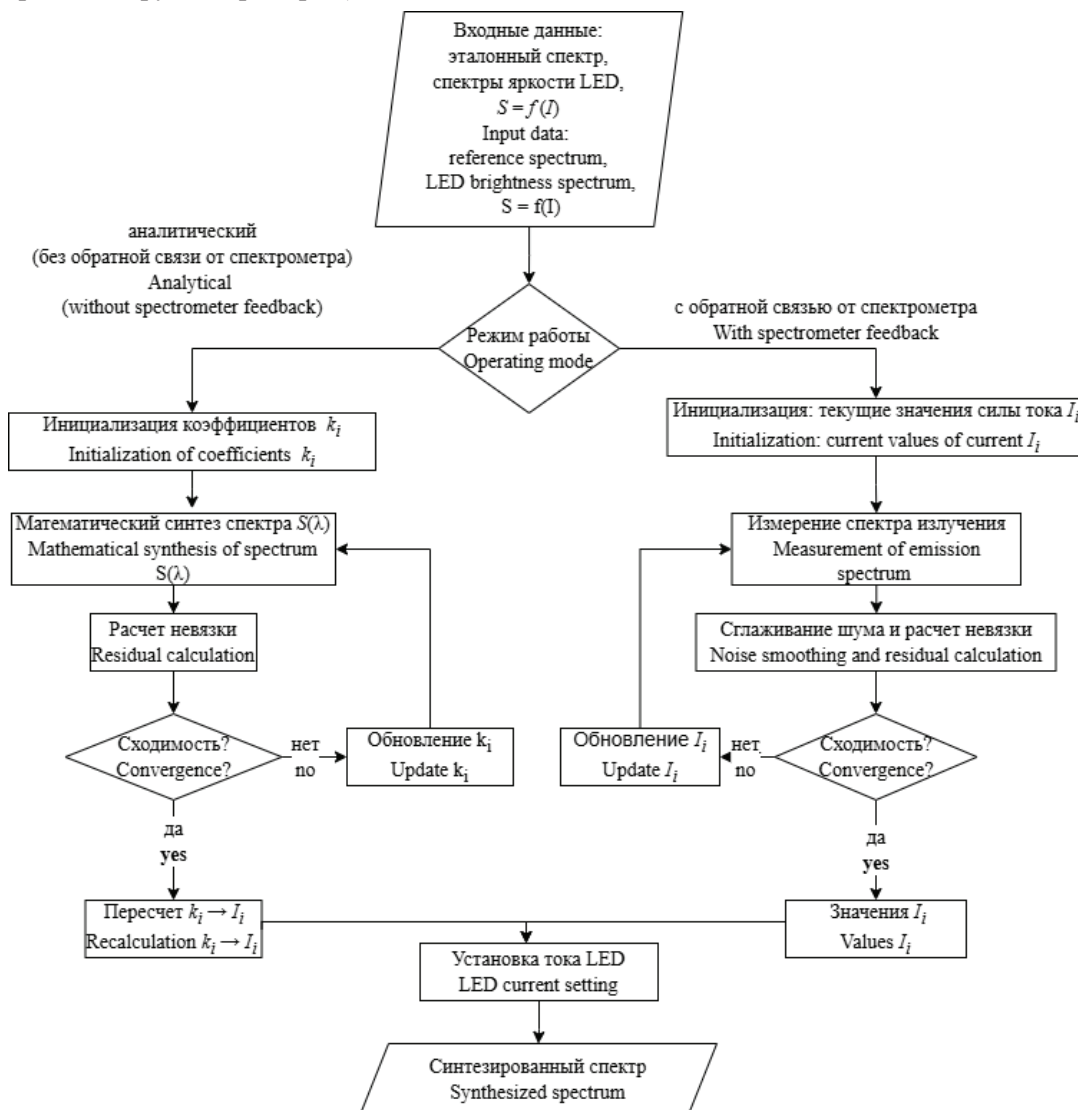


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма подбора яркости LED-источников для синтеза спектра яркости

Figure 5 – Flowchart of the LED source brightness selection algorithm for radiance spectrum synthesis

На вход алгоритм получает два набора данных: эталонный спектр в виде пар «длина волны – значение СПЭЯ» и набор математических моделей $f(I)$ светодиодов, каждая из которых содержит спектральный профиль светодиода и калибровочные коэффициенты пересчета силы тока в яркость, установленный экспериментальным путём.

В зависимости от условий эксплуатации алгоритм работает в одном из двух режимов.

Аналитический режим (левая ветвь схемы рисунка 5) не требует аппаратного спектрометра. Задача сводится к нахождению набора коэффициентов k_i при которых суперпозиция спектров отдельных светодиодов наилучшим образом аппроксимирует эталон:

$$S(\lambda) = \sum_i k_i S_i^{LED}(\lambda) = \sum_i k_i f_i(I, \lambda),$$

где i – номер LED; k_i – коэффициент в диапазоне от 0 до 1; $S_i^{LED}(\lambda)$ – спектр излучения i -го LED при максимальной силе тока; $f_i(I, \lambda)$ – функция зависимости яркости i -го LED S_i от силы тока I .

Функция невязки вычисляется как точечное отклонение синтезированного спектра от эталонного по всему рабочему диапазону длин волн. Минимизация производится методом Левенберга–Марквардта; начальные значения коэффициентов задаются равными 0,5; допустимая область поиска ограничена отрезком $[0...1]$. После достижения сходимости найденные коэффициенты k_i переводятся в силу тока I_i путём решения квадратного уравнения для каждого светодиода (т. к. зависимость $S_i^{LED}(\lambda) = f_i(I, \lambda)$ аппроксимирована квадратичной функцией).

Режим с обратной связью от спектрометра (правая ветвь схемы) использует измерительную обратную связь: на каждой итерации оптимизатора выполняется физический замер спектра установки, после чего функция невязки строится по разности между эталоном и реально измеренным спектром. Опционально к измеренным данным применяется двунаправленный релаксационный НЧ-фильтр первого порядка для подавления шума. Начальные значения параметров берутся из текущих позиций регуляторов силы тока светодиодов, а границы поиска соответствуют заданному возможному диапазону изменения силы тока. Такой подход автоматически компенсирует нелинейности реального источника, которые могут быть не учтены в аналитической модели.

На последнем этапе обоих режимов происходит выставление силы тока для каждого светодиода и формирования спектра излучения, схожего с эталонным

Методика тестирования видеоспектральной аппаратуры на имитаторе

Для проверки тестируемого видеоспектрального прибора вначале задаются условия целевой сцены (тип подстилающей поверхности, модель атмосферы, геометрия «Солнце–поверхность–прибор»), по которым при помощи пакета libRadTran рассчитывается спектральная яркость $L_{ref}(\lambda)$ в рабочем диапазоне длин волн. Затем с использованием системы регистрации имитатора выполняется настройка токов светодиодных и галогенных каналов таким образом, чтобы спектральная яркость на выходном зрачке фотометрической сферы $L_{sim}(\lambda)$ соответствовала расчётному эталонному спектру. Полученный режим фиксируется как лабораторный аналог заданной аэрокосмической сцены.

Тестируемый прибор устанавливается так, чтобы его поле зрения укладывалось в выходной зрачок фотометрической сферы или изображение на экране системы формирования изображения. В статических режимах проводится серия измерений при различных экспозициях и уровнях сигнала с последующим сравнением зарегистрированных спектров с $L_{ref}(\lambda)$, что позволяет оценить спектральную чувствительность, линейность и подобрать рекомендованный диапазон экспозиций. В динамических режимах включается система подвижной миры с заданными скоростью и направлением движения, соответствующими выбранным высоте и скорости носителя; по результатам регистрации анализируется устойчивость видеоспектральной съёмки и алгоритмов обработки к перемещению сцены, что обеспечивает перенос настроек, полученных на имитаторе, в реальные условия аэрокосмического эксперимента.

Эксперимент

Целью эксперимента являлась проверка возможности воспроизведения разработанным имитатором расчётного спектра яркости

растительного покрова и подбора режимов работы видеоспектрального прибора. В качестве тестируемой аппаратуры использовался прибор видеоспектральной съёмки БЕКАС [13, 14], предназначенный для регистрации отражённого солнечного излучения с борта беспилотных летательных аппаратов в спектральном диапазоне 400–900 нм.

На первом этапе при помощи программного пакета libRadTran была смоделирована спектральная яркость сцены, соответствующей растительному покрову в ясный день при заданной высоте Солнца над горизонтом (55°) и типовой модели атмосферы («afgls.dat») с высоты 100 м. Полученный эталонный спектр (рисунок 6а) использовался в качестве целевого при настройке имитатора: по данным спектрометра системы регистрации имитатора выполнялась регулировка токов светодиодных и галогенных каналов до согласования формы и уровня спектра на выходном зрачке фотометрической сферы с расчётным распределением в рабочем диапазоне длин волн. При этом в ближней инфракрасной области спектр воспроизводится менее точно из-за ограниченного количества светодиодных излучателей. Сравнение расчётного и воспроизведённого спектров показало хорошее согласие: коэффициент корреляции между кривыми на длинах волн максимумов излучательной способности светодиодов составил 0,96, а по всему спектру яркости – 0,83. Спектральный угол [15] между двумя спектрами составил $17,2^\circ$.

На втором этапе настроенный имитатор использовался для предполётной настройки БЕКАС. Прибор был ориентирован на выходной зрачок фотометрической сферы, и для ряда значений экспозиции проводилась регистрация спектров яркости. По результатам анализа было установлено, что в диапазоне экспозиций 175–200 мс сигнал детектора находится в пределах линейной области и не достигает насыщения, что позволило рекомендовать этот интервал экспозиций в качестве рабочего.

В ходе последующих лётных измерений над участком растительного покрова (в сопоставимых геометрических условиях – 08.05.2024 в районе точки с координатами $51^\circ 47' 47.2''\text{N}$ $23^\circ 40' 07.7''\text{E}$ (деревня Дубица, Минская область) в 12:49:22 при высоте Солнца над горизонтом $54,76^\circ$ при высоте полёта 100–115 м) использовалась экспозиция 193 мс, находящаяся внутри найденного диапазона. Полученные в полёте спектры (рисунок 6б) по форме и уровню согласуются с данными, зарегистрированными на имитаторе с учётом упрощённой атмосферной модели. Корреляция между натурным и лабораторным спектрами составила 0,47, спектральный угол – $27,5^\circ$. Тем самым показано, что комплекс обеспечивает перенос лабораторно подобранных режимов экспозиции в реальные условия видеоспектральных измерений и может использоваться для предварительной настройки и планирования аэрокосмических экспериментов.

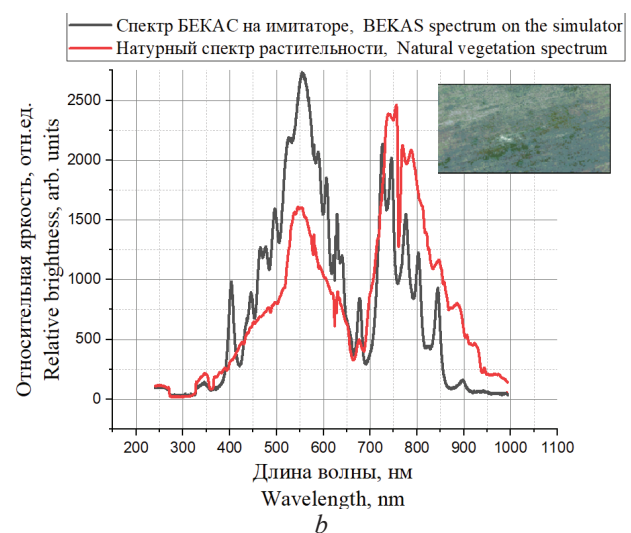
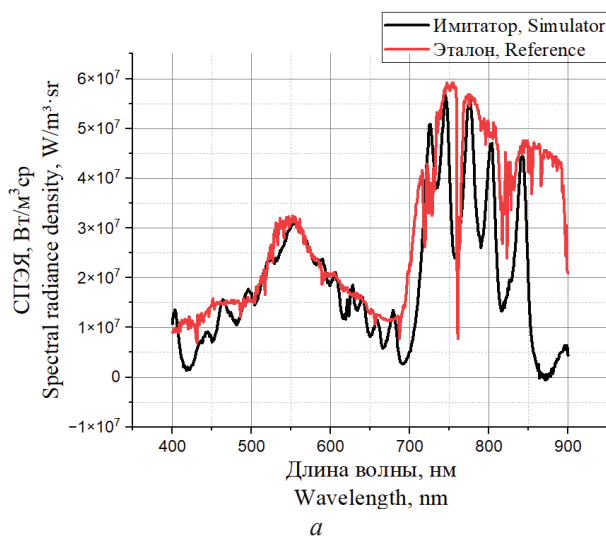


Рисунок 6 – Результаты апробации разработанного имитатора: возможность воспроизведения спектра (а) и спектры яркости имитатора и растительности, зарегистрированные БЕКАС (б)

Figure 6 – Testing results of the developed simulator: possibility of reproducing the spectrum (a) and the radiance of the simulator and vegetation recorded by BEKAS (b)

Полученные различия в спектрах, зарегистрированных в естественных условиях с борта беспилотного летательного аппарата и на имитаторе, могут быть объяснены использованием типовых (а не реальных) параметров атмосферы и регистрируемого объекта (травы) в лабораторном эксперименте. Используемая модель переноса излучения не учитывает специфику и анизотропию отражения естественных объектов.

Результаты и обсуждение

Созданный имитатор сочетает в себе управляемый по спектру источник излучения на основе фотометрической сферы, систему формирования изображения с подвижной мишенью и спектрометр для обратной связи, что позволяет в одной установке задавать как спектральные, так и пространственно динамические характеристики сцены. Настройка токов светодиодных и галогенных каналов обеспечивает воспроизведение расчётного спектра яркости, а измеренная неоднородность яркости по выходному зрачку и стабильность источника во времени соответствуют аналогам [9].

На примере прибора БЕКАС показано, что имитатор позволяет не только воспроизвести спектр яркости растительного покрова, рассчитанный по libRadTran, но и подобрать диапазон экспозиций, обеспечивающий линейный режим работы детектора, с последующим подтверждением этих настроек в реальном лётном эксперименте. По совокупности характеристик комплекс занимает промежуточное положение между классическими LED солнечными симуляторами и гиперспектральными проекторами: он уступает последним по гибкости попиксельного задания сцены, но выигрывает по простоте реализации, доступному диапазону экспозиций тестируемых приборов и возможности имитации движения сцены, что делает его удобным инструментом для прикладных задач дистанционного зондирования Земли.

Заключение

Разработан и реализован имитатор космических видеоспектральных экспериментов, сочетающий регулируемый по спектрально

энергетическим характеристикам источник излучения на основе фотометрической сферы, систему имитации движения сцены и спектрометрическую систему регистрации. Такое объединение позволяет в лабораторных условиях формировать сцены с заданными спектральными и пространственно динамическими параметрами, приближёнными к условиям реальных аэрокосмических измерений.

На примере прибора БЕКАС показано, что имитатор может использоваться для подбора оптимальных режимов экспозиции видеоспектральной аппаратуры и последующего переноса этих настроек в реальные полётные эксперименты. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности комплекса как инструмента для наземного тестирования, предварительной настройки видеоспектральных систем дистанционного зондирования Земли и методической отработки экспериментов с их участием.

Список использованных источников

1. Шевчук А.А. Оптическая система перспективного светодиодного имитатора солнечного излучения для наземной отработки космических аппаратов / А.А. Шевчук [и др.] // Космические аппараты и технологии. – 2019. – № 1(27). – С. 28–40. DOI: 10.26732/2618-7957-2019-1-28-40
2. A Low-Cost LED-Based Solar Simulator / E. López-Fraguas [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2019. – Vol. 68, No. 12. – P. 4913–4923. DOI: 10.1109/TIM.2019.2899513
3. MKS Newport. Oriel VeraSol 2 Class AAA LED Solar Simulator. – URL: <https://www.newport.com/p/VeraSol-2> (дата обращения: 17.03.2026)
4. C. Sun. LED-based solar simulator for terrestrial solar spectra and orientations / Sun C. [et al.] // Solar energy. – 2022. – Vol. 233. – С. 96–110. DOI: 10.1016/j.solener.2022.01.001
5. Zaid Ghufroon. Differential spectral responsivity measurement of photovoltaic detectors with a light-emitting-diode-based integrating sphere source / Ghufroon Zaid [et al.] // Appl. Opt. – 2010. – № 49. – P. 6772–6783. DOI: 10.1364/AO.49.006772
6. Watjanatepin N. Large Scale LED Modular Based Solar Simulator and Calibration Method for PV Module Characterization / N. Watjanatepin, P. Sritanauthaikorn // Journal of Hunan University (Natural Sciences). – 2021. – Vol. 48, No. 9. – P. 1–15.

7. Vosylius Žygimantas. Rational selection of light sources for LED-based solar simulators / Žygimantas Vosylius [et al.] // *Solar Energy* – 2023. – Vol. 265. – P. 112064. **DOI:** 10.1016/j.solener.2023.112064
8. Du Zhiqiang. Design, fabrication, and evaluation of a large-area hybrid solar simulator for remote sensing applications / Zhiqiang Du [et al.] // *Opt. Express*. – 2023. – № 31. – P. 6184–6202. **DOI:** 10.1364/OE.482003
9. Gamma Scientific. SpectralLED® RS 7 2 Large Output Port. – URL: <https://gamma-sci.com/products/spectralled-tunable-light-sources/rs-7-2-large-output-port/> (дата обращения: 17.03.2026)
10. Кириченко Д.В. Моделирующий стенд для испытаний бортовых оптико-электронных систем малых космических аппаратов с использованием средств имитации фоноцелевой обстановки / Д.В. Кириченко, А.А. Глущенко, К.К. Маслов, К.И. Упитис // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2009. – Т. 52, № 4. – С. 78–81.
11. Rice J.P. A Hyperspectral Image Projector for Hyperspectral Imagers / J.P. Rice [et al.] // *Proc. SPIE, Imaging Spectrometry XII*. – 2007. – Vol. 6565. **DOI:** 10.1117/12.724604
12. Emde C. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0. 1) / C. Emde [et al.] // *Geoscientific Model Development*. – 2016. – Т. 9. – № 5. – P. 1647–1672. **DOI:** 10.5194/gmd-9-1647-2016
13. Гуторов А.В. Комплекс мультиспектральной съемки для БПЛА / А.В. Гуторов [и др.] // *Сборник научных статей военной академии Республики Беларусь*. – 2023. – № 44. – С. 95–102.
14. Патент No 13010 Республики Беларусь, МПК G01N 21/01 (2006.01). Устройство для авиаспектральной съемки: No 20220118: заявл. 25.05.2022 : опубл. 01.08.2022 / Бручковский И.И., Гуторов А.В., Домаратский А.В., Ивуть П.В., Литвинович Г.С., Ломако А.А., Хомицевич А.Д. – 7 с.: ил.
15. Spectral Angle Mapper Processor – URL: <https://step.esa.int/main/wp-content/help/versions/9.0.0/snap-toolboxes/org.esa.s2tbx.s2tbx.spectral.angle.mapper.ui/sam/SAMProcessor.html> (дата обращения: 17.03.2026)
3. MKS Newport. Oriel VeraSol 2 Class AAA LED Solar Simulator. – URL: <https://www.newport.com/p/VeraSol-2> (date of access: 17.03.2026)
4. Sun C. [et al.]. LED-based solar simulator for terrestrial solar spectra and orientations. *Solar energy*. 2022;(233):96-110. **DOI:** 10.1016/j.solener.2022.01.001
5. Zaid Ghuftron [et al.]. Differential spectral responsivity measurement of photovoltaic detectors with a light-emitting-diode-based integrating sphere source. *Appl. Opt.* 2010;(49):6772-6783. **DOI:** 10.1364/AO.49.006772
6. Watjanatepin N, Sritanauthaikorn P. Large Scale LED Modular Based Solar Simulator and Calibration Method for PV Module Characterization. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*. 2021;48(9):1-15.
7. Žygimantas Vosylius [et al.]. Rational selection of light sources for LED-based solar simulators. *Solar Energy*. 2023;(265):112064. **DOI:** 10.1016/j.solener.2023.112064
8. Zhiqiang Du [et al.]. Design, fabrication, and evaluation of a large-area hybrid solar simulator for remote sensing applications. *Opt. Express*. 2023;(31):6184-6202. **DOI:** 10.1364/OE.482003
9. Gamma Scientific. SpectralLED® RS 7 2 Large Output Port. – URL: <https://gamma-sci.com/products/spectralled-tunable-light-sources/rs-7-2-large-output-port/> (date of access: 17.03.2026)
10. Kirichenko DV, Glushchenko AA, Maslov KK, Upitis KI. Simulation Testbed for Testing Onboard Optoelectronic Systems of Small Spacecraft Using Background-Target Environment Simulation Tools. *Journal of Instrument Engineering*. 2009;52(4):78-81.
11. Rice JP. [et al.]. A Hyperspectral Image Projector for Hyperspectral Imagers. *Proc. SPIE, Imaging Spectrometry XII*. 2007;6565. **DOI:** 10.1117/12.724604
12. Emde C. [et al.]. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0. 1). *Geoscientific Model Development*. 2016;9(5):1647-1672. **DOI:** 10.5194/gmd-9-1647-2016
13. Gutorov A.V. [et al.]. Multispectral Imaging System for UAVs. *Collection of Scientific Articles of the Military Academy of the Republic of Belarus*. 2023;(44):95-102.
14. Patent No. 13010 of the Republic of Belarus, IPC G01N 21/01 (2006.01). Device for aerial spectral imaging: No. 20220118: filed May 25, 2022 : published August 1, 2022 / Bruchkovsky I.I., Gutorov A.V., Domratsky A.V., Ivut P.V., Litvinovich G.S., Lomako A.A., Khomitsevic A.D. – 7 p.: ill.
15. Spectral Angle Mapper Processor – URL: <https://step.esa.int/main/wp-content/help/versions/9.0.0/snap-toolboxes/org.esa.s2tbx.s2tbx.spectral.angle.mapper.ui/sam/SAMProcessor.html> (date of access: 17.03.2026)

References