

## Спектральная настройка стенда равномерной засветки

К. В. Алаторцев<sup>1</sup>, О. А. Алаторцева<sup>2</sup>, С. Г. Данилов<sup>2</sup>, В. Л. Алаторцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Московский физико-технический институт (НИУ)  
Долгопрудный, 141700, Московская обл., Россия  
E-mail: alatorsev.kv@mail.ru*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
Зеленоград, 124498, Москва, Россия  
E-mail: alcorsat@mail.ru*

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) с использованием космических аппаратов (КА) используется достаточно давно. Основой регистрации информации являются фото приёмные устройства (ФПУ) КА на основе приборов с зарядовой связью, использующих различные формы накопления, в том числе с временной задержкой и накоплением заряда. Сложность аппаратуры обуславливает требования к предполётному тестированию и калибровке спутникового оборудования. Одной из таких проверочных процедур является тестирование фотоприёмников КА ДЗЗ на различных стендах равномерной засветки (СРЗ) фокальной плоскости ФПУ, позволяющих провести отработку, калибровку и радиометрическую коррекцию чувствительности оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) КА. Для решения указанных задач необходимо уметь влиять на спектральный состав излучения стенда равномерной засветки, задавать его распределённым по заданному спектральному распределению. Настоящая работа посвящена оптимизации настройки стендового оборудования равномерной засветки для задания спектрального состава его излучения близким к заданному распределению по спектру. Настройка стенда засветки осуществляется на основе оптимального выбора весовых коэффициентов, позволяющих использовать различные спектральные излучатели стенда с требуемыми весами регулировки яркости его излучения. Значения весовых коэффициентов получаются из решения оптимизационной задачи по минимизации функционала отличия заданного спектра от спектра излучения стенда, формируемого композицией его светодиодных компонентов. Получаемая спектральная стендовая информация используется в последующей настройке ОЭА КА ДЗЗ, её радиометрической калибровке и в других областях создания космического приборостроения и ДЗЗ.

**Ключевые слова:** космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, стенд равномерной засветки, оптико-электронная аппаратура, радиометрическая калибровка

Одобрена к печати: 29.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-163-171

### Введение

Результаты дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса с использованием космических аппаратов (КА) оказывают большое влияние на различные сферы нашей жизни. Для получения детальной и качественной информации ДЗЗ требуется точная настройка всего спутникового оборудования, в частности: проведение сложных испытаний оптико-электронной аппаратуры КА, калибровка, радиометрическая коррекция и т. п. Данные вопросы регулярно обсуждаются в монографиях, на семинарах и научных конференциях (Бакланов, 2009; Кирилин и др., 2017; Системы..., 2022).

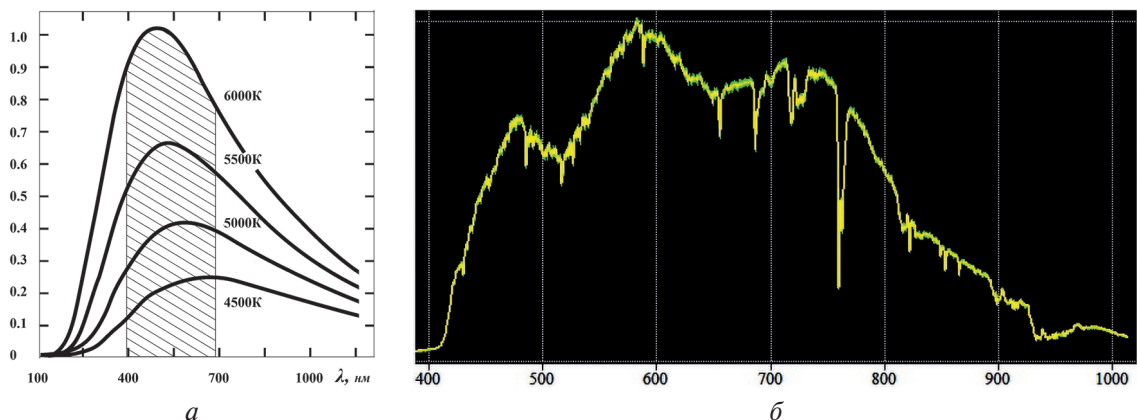
### Стенд равномерной засветки оптико-электронной аппаратуры

Одной из настроечных процедур работы с оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) КА является тестирование ОЭА на различных стендах засветки фокальной плоскости фотоприёмника.

Первоначально такую засветку обеспечивало применение наборов зеркальных фотоламп, формирующих требуемое освещение в широком диапазоне уровней регулировки яркости

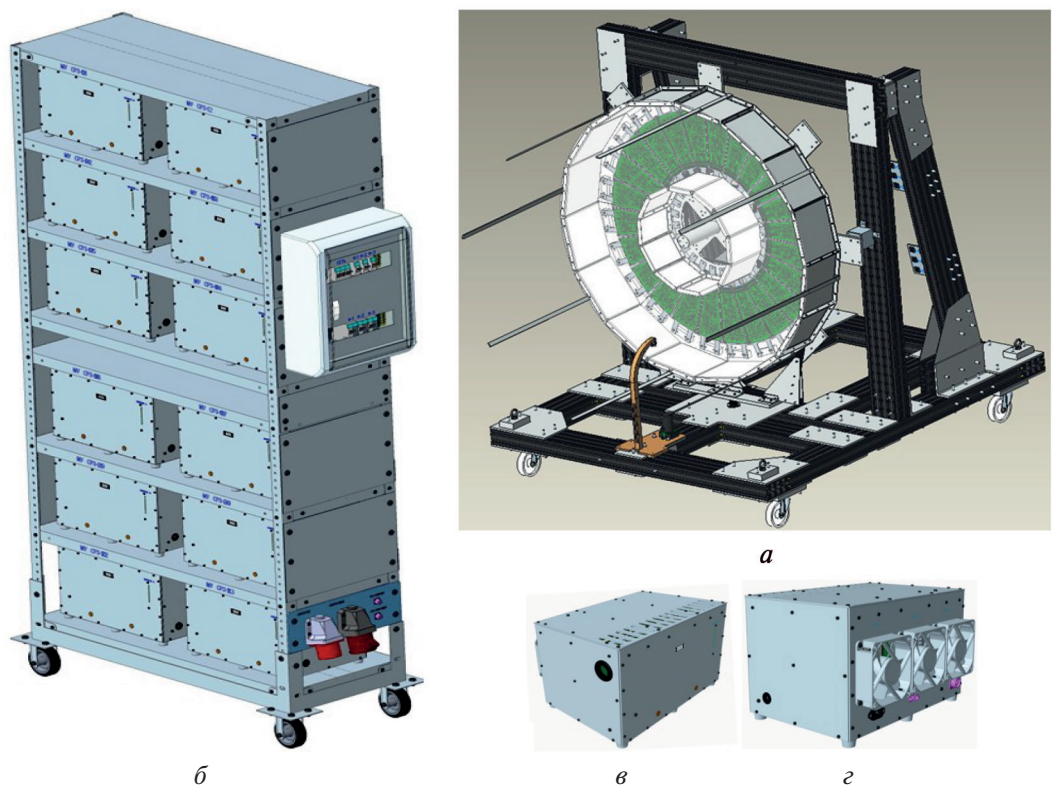
в видимом диапазоне спектра. К тому же это обеспечивало простоту конструирования стенда и недорогую его стоимость.

Однако в этом случае достаточно трудно повлиять на спектральный состав формируемого излучения. На практике желательно иметь настраиваемый спектр облучения ОЭА, близкий к отражённому спектру излучения от наземных объектов, вторично прошедший через земную атмосферу либо заданный по известному спектральному закону. Примеры стендового излучения приводятся на *рис. 1*.



*Рис. 1.* Излучение абсолютно чёрного тела (АЧТ) при разной температуре ( $T$ ) и длины волны излучения  $\lambda$  (нм) (*а*); реальный спектр солнечного излучения, регистрируемый спектрометром СРЗ (*б*)

Для формирования требуемой освещённости фокальной плоскости ОЭА в лабораторных условиях можно использовать светодиодное излучение стенда равномерной засветки, представленного на *рис. 2*.



*Рис. 2.* Стенд СРЗ (*а*) со стойкой (*б*) и элементами управления (*в, г*)

В составе стенда возможно присутствие десятка изучающих светодиодов в заданной части спектра, каждый из которых может быть настроен на работу с излучением различной яркости. Благодаря этому появляется возможность регулировки спектра результирующего излучения стенда до близкого к заданному по спектру.

В настоящей работе приводится один из способов регулировки настройки излучения стенда равномерной засветки, используемого для проверки ОЭА, с помощью процедуры оптимизации выбора коэффициентов задания уровней регулировки яркости отдельных его элементов, формирующих требуемый результирующий спектр излучения.

Практические результаты настоящей работы были ориентированы на проверку ОЭА на стенде равномерной засветки (см. рис. 2) со светодиодными излучателями.

Графические данные (см. рис. 3) получены с использованием стенда равномерной засветки путём считывания данных спектрометра (S100-2048H), входящего в состав стендового оборудования.

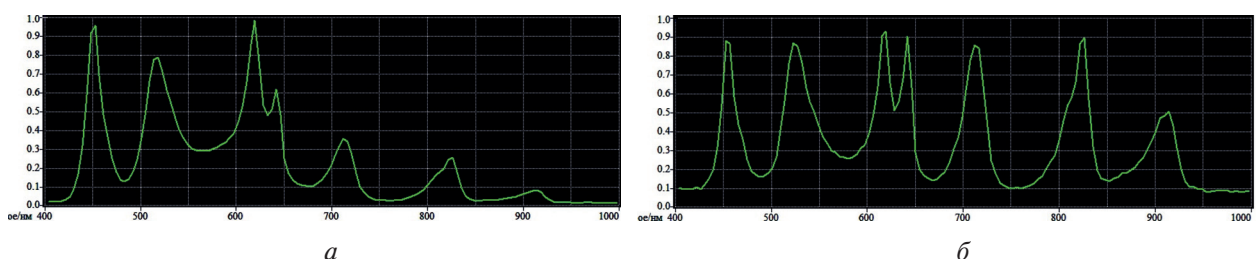


Рис. 3. Относительная яркость излучения СРЗ, попадающего на ОЭА КА, в зависимости от длины волны светодиодного излучения  $\lambda$  (нм): а — равномерные яркости светодиодов; б — равномошные яркостные уровни

Исходный стенд равномерной засветки (СРЗ) включает  $N = 8$  различных типов источников спектрального излучения, диапазон регулирования яркости каждого из которых может изменяться в пределах от 0 до 255 у.е. (условных единиц) (см. таблицу). Таблица содержит также наименования светодиодов, спектральный рабочий диапазон ( $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$ ) и длину волны с максимальной яркостью ( $\lambda_{\text{central}}$ ).

Светодиоды, формирующие ядро стенда равномерной засветки

Тип светодиода	Цвет светодиода	$\lambda_{\text{central}}$ , нм	$\lambda_{\min}$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм
1. SBM-40-RGBW-N41-QA100 (B)	Blue	453	400	510
2. SBM-40-RGBW-N41-QA100 (G)	Green	527	460	620
3. SBM-40-RGBW-N41-QA100 (R)	Red	625	570	670
4. MP-5050-8100-27-70	White	460/590	420	750
5. SST-10-DR-B130-KD5	Far Red	660	590	710
6. SST-10-FR-B130-JF3	Deep Red	730	660	770
7. SST-10-IR-B130-K850	IR850	850	770	900
8. SST-10-IR-B130-H940	IR940	940	860	1000

Примечание: Blue — синий; Green — зелёный; Red — красный; White — белый; Far Red — дальний красный; Deep Red — глубокий красный.

На рис. 3 представлены спектральные кривые относительной яркости группового излучения светодиодов в зависимости от регулирования уровня яркости каждого из них. Рисунок 3а получен при одинаковых уровнях яркости различных групп светодиодов. При этом светодиоды более ярких групп имеют и большую относительную яркость. Для получения графиче-

ских кривых *рис. 3б* стендовые уровни различных спектров светодиодов подобраны таким образом, чтобы относительная их яркость была приблизительно одинаковой. Чтобы этого добиться, более слабым по яркости группам светодиодов заданы большие уровни регулировки, и наоборот.

На практике необходимо максимально приблизить спектр стендового излучения к заданному, например к солнечному. Реальный солнечный спектр, попадающий на ОЭА, может зависеть от множества факторов (и погоды в том числе). Типичный солнечный спектр, регистрируемый спектрометром СРЗ, представлен на *рис. 1б*.

В самом простом случае спектр освещения фокальной плоскости ОЭА можно считать идеальным солнечным спектром, схожим с излучением абсолютно чёрного тела (АЧТ) при температуре  $T \approx 5500$  К (см. *рис. 1а*). Модельные расчёты получены с использованием уравнения Планка:

$$I_\lambda = \frac{Z_1/\lambda^5}{\exp(Z_2/\lambda T) - 1},$$

где  $\lambda$  — длина волны (м);  $Z_i$  — размерные коэффициенты,  $Z_1 = 3,741 \cdot 10^{-6}$  Вт·м<sup>2</sup>,  $Z_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$  м·К;  $T$  — температура абсолютно чёрного тела, К (Сивухин, 2005).

### Определение параметров настройки стендов равномерной засветки

С учётом сделанных замечаний задачу оптимизации настройки стендового светодиодного излучения можно сформулировать следующим образом.

Пусть  $\text{Spectr}(\lambda)$  — заданный спектр изучения (от длины волны  $\lambda$ ), который мы стремимся получить на нашем стенде;  $i = 1, \dots, N$  — номер группы светодиодов, различных по спектральному диапазону излучения;  $S_i(\lambda)$  — спектр излучения  $i$ -го светодиода.

Необходимо найти стендовые коэффициенты ( $c_1, \dots, c_N$ ) уровней регулирования яркости светодиодного излучения, при которых результирующий спектр интегрального излучения, формируемый всеми светодиодами:  $S(\lambda) = \sum_{i=1}^N c_i S_i(\lambda)$ , был бы максимально близок к заданному по спектральному составу излучения с распределением  $\text{Spectr}(\lambda)$  во всём требуемом спектральном интервале ( $\lambda_1, \lambda_2$ ). В данном случае задача получения набора ( $c_1, \dots, c_N$ ) требует разложения функции  $\text{Spectr}(\lambda)$  по  $N$  базисным функциям ( $S(\lambda), \dots, S_N(\lambda)$ ) (Беклемишев, 2015; Кудрявцев, 1981).

Анализ спектра излучения каждого из светодиодов с использованием данных спектрометра, входящего в состав стенда СРЗ, позволяет настроить режим работы каждого из светодиодов на свою линейную область регулирования уровня яркости ( $B$ ) в зависимости от уровня управляющего его работой тока ( $I$ ) ( $I = 1, \dots, 255$  у.е.) (*рис. 4*). На участке  $A-C$ , *рис. 4*,  $A$  — начало линейного участка зависимости яркости светодиода ( $B$ ) от тока регулирования ( $I$ ),  $C$  — его окончание (переход в режим насыщения). Наличие линейной области работы светодиодов, собственно, и делает возможным использование описываемой процедуры оптимизации для нахождения весовых коэффициентов ( $c_1, \dots, c_N$ ).

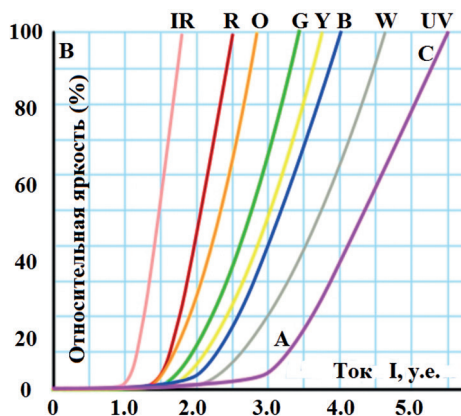


Рис. 4. Яркостная характеристика светодиодов в составе стенда СРЗ

Критерием качества аппроксимации при нахождении необходимых коэффициентов ( $c_1, \dots, c_N$ ) может служить минимальность отклонения среднеквадратичного отклонения  $\mathfrak{F}(c_1, \dots, c_N)$ , сформированного стендовым



излучением, от заданного (Лабораторный..., 2019), проинтегрированная по всему задействованному спектральному диапазону длины волны  $(\lambda_1, \lambda_2)$  излучения стэнда засветки:

$$\mathfrak{F}(c_1, \dots, c_N) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ \left[ \text{Spectr}(\lambda) - \sum_{i=1}^N c_i S_i(\lambda) \right]^2 \right\} d\lambda \rightarrow \min. \quad (1)$$

Задача состоит в определении требуемых коэффициентов  $(c_1, \dots, c_N)$ , обеспечивающих экстремум (минимум) функции  $\mathfrak{F}(c_1, \dots, c_N)$ .

Для нахождения указанного минимума  $\mathfrak{F}(c_1, \dots, c_N)$  необходимо приравнять к нулю частные производные  $\mathfrak{F} : ((\partial\mathfrak{F}/\partial c_1), \dots, (\partial\mathfrak{F}/\partial c_N))$  по переменным коэффициентам  $(c_1, \dots, c_N)$  (Кудрявцев, 1981):

$$\begin{cases} \frac{\partial\mathfrak{F}}{\partial c_1} = -2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ [\text{Spectr}(\lambda) - \mathbb{S}(\lambda)] S_1(\lambda) \} d\lambda = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial\mathfrak{F}}{\partial c_N} = -2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ [\text{Spectr}(\lambda) - \mathbb{S}(\lambda)] S_N(\lambda) \} d\lambda = 0 \end{cases} \quad (2)$$

или

$$\begin{cases} \frac{\partial\mathfrak{F}}{\partial c_1} = -2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ \left[ \text{Spectr}(\lambda) - \sum_{i=1}^N c_i S_i(\lambda) \right] S_1(\lambda) \right\} d\lambda = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial\mathfrak{F}}{\partial c_N} = -2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ \left[ \text{Spectr}(\lambda) - \sum_{i=1}^N c_i S_i(\lambda) \right] S_N(\lambda) \right\} d\lambda = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Выражения (2), (3) представляют систему из  $N$  уравнений с  $N$  неизвестными и в матричном виде выглядят следующим образом:

$$\mathbb{A} \cdot \mathbb{C} = \mathbb{B}, \quad (4)$$

где  $\mathbb{A}$  — матрица размерности  $N \times N$ ;  $\mathbb{B}$ ,  $\mathbb{C}$  — векторы размерности  $N$ , которые задаются соответственно соотношениями:

$$\mathbb{C} = \begin{bmatrix} c_1 \\ \dots \\ c_N \end{bmatrix}, \quad \mathbb{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ [\text{Spectr}(\lambda)] S_1(\lambda) \} d\lambda \\ \dots \\ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ [\text{Spectr}(\lambda)] S_N(\lambda) \} d\lambda \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbb{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ S_1(\lambda) S_1(\lambda) \} d\lambda & \dots & \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ S_1(\lambda) S_N(\lambda) \} d\lambda \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ S_N(\lambda) S_1(\lambda) \} d\lambda & \dots & \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ S_N(\lambda) S_N(\lambda) \} d\lambda \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для определения оптимизирующего набора коэффициентов  $(c_1, \dots, c_N)$  аппроксимации, формирующих излучение стенда (1), необходимо найти обратную матрицу  $\mathbb{A}^{-1}$  (Беклемишев, 2015). При этом окончательное решение запишется в виде:

$$= \mathbb{A}^{-1} \cdot \mathbb{B}.$$

Элементы  $(a_{ij} = a_{ji})$  симметричной  $\mathbb{A}$ -матрицы  $a_{ij} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{S_i(\lambda)S_j(\lambda)\} d\lambda$  можно интерпретировать как скалярное произведение спектров излучения двух светодиодов с индексами  $i, j$  (Беклемишев, 2015; Кудрявцев, 1981), что по смыслу характеризует степень пересечения спектров  $i$ -,  $j$ -светодиодов. В случае близости спектров светодиодов получаем пересекаемые спектры и, как следствие, отличные от нуля коэффициенты  $a_{ij}$  матрицы  $\mathbb{A}$ . Для непересекающихся спектров получаем нулевые значения  $a_{ij} = 0$ , что соответствует ортогональным спектрам с нулевым скалярным произведением.

Излучение конкретного идеального светодиода близко к  $\delta$ -функции Дирака и определяется шириной запрещённой зоны полупроводникового материала, из которого светодиод изготовлен (Сивухин, 2005) (см. рис. 3). В таком случае идеальных светодиодов матрица  $\mathbb{A}$  представляет собой диагональную матрицу, поскольку при различии  $\delta$ -функций излучения светодиодов пересечение их спектров излучения отсутствует и решением (5) являются коэффициенты:

$$c_i = a_{ij}/b_i, i = 1, \dots, N,$$

Аппроксимация непрерывного спектра излучения стенда потребовала бы достаточно большого количества различных по спектральному составу светодиодов, поскольку аппроксимационная кривая излучения светодиодного стенда состояла бы только из отдельных точек.

Однако из-за наличия примесей в полупроводниковых материалах реально излучаемые спектры светодиодов имеют конечную ширину спектрального распределения излучения (имеют форму кривой излучения, характеризующейся конечной «добротностью» (Лабораторный..., 2019)) и отличаются от  $\delta$ -функций. В частности, для белого светодиода ширина спектра излучения значительно превосходит соответствующую ширину спектра остальных светодиодов (см. таблицу и рис. 1а, б).

В таких случаях (пересекающихся спектров) матрица  $\mathbb{A}$  имеет большое количество недиагональных элементов и для нахождения требуемой последовательности коэффициентов  $(c_1, \dots, c_N)$  необходимо строгое обращение матричного уравнения (4) с дополнениями (5), (6). Если спектры светодиодов с разными номерами различны, то можно утверждать, что детерминант  $\mathbb{A}(\det(\mathbb{A}))$  отличен от нуля, обратная матрица  $\mathbb{A}^{-1}$  существует и уравнение (4) будет однозначно разрешимо. И наоборот, на практике при наличии двух типов источников спектра с близкими спектральными кривыми  $\det(\mathbb{A})$  обратится в ноль и решение найти будет нельзя (Беклемишев, 2015). То есть источники с одинаковыми спектральными характеристиками необходимо объединять под общим регулятором (одним коэффициентом  $c_i$ ). Так, в стенде СРЗ объединены в единый «зелёный» спектральный диапазон управления три группы светодиодов зелёного типа.

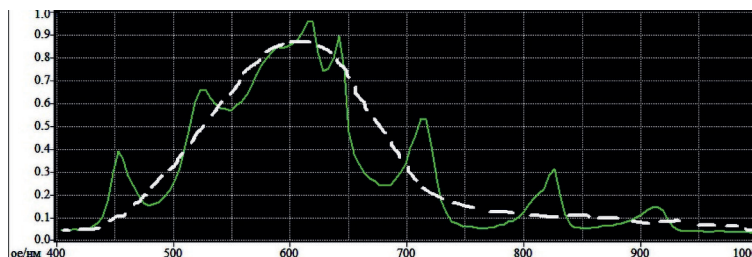


Рис. 5. Аппроксимации яркости излучения стенда СРЗ

Программа управления работой стенда (рис. 5, см. с. 168) использует порты COM и USB и осуществляет включение спектральных каналов стенда переменной интенсивности через элементы управления (см. рис. 2б–г), а по обратной связи через спектрометр принимает графический спектр сформированного излучения, что и отображается на рис. 1б, 3а, б.

Дополнительно отображаются различные варианты эффективной яркости СРЗ, её распределение по выбранным спектральным диапазонам и задаваемым коэффициентам регулирования мощности излучения в каждом из каналов (1, ..., 8) (рис. б).

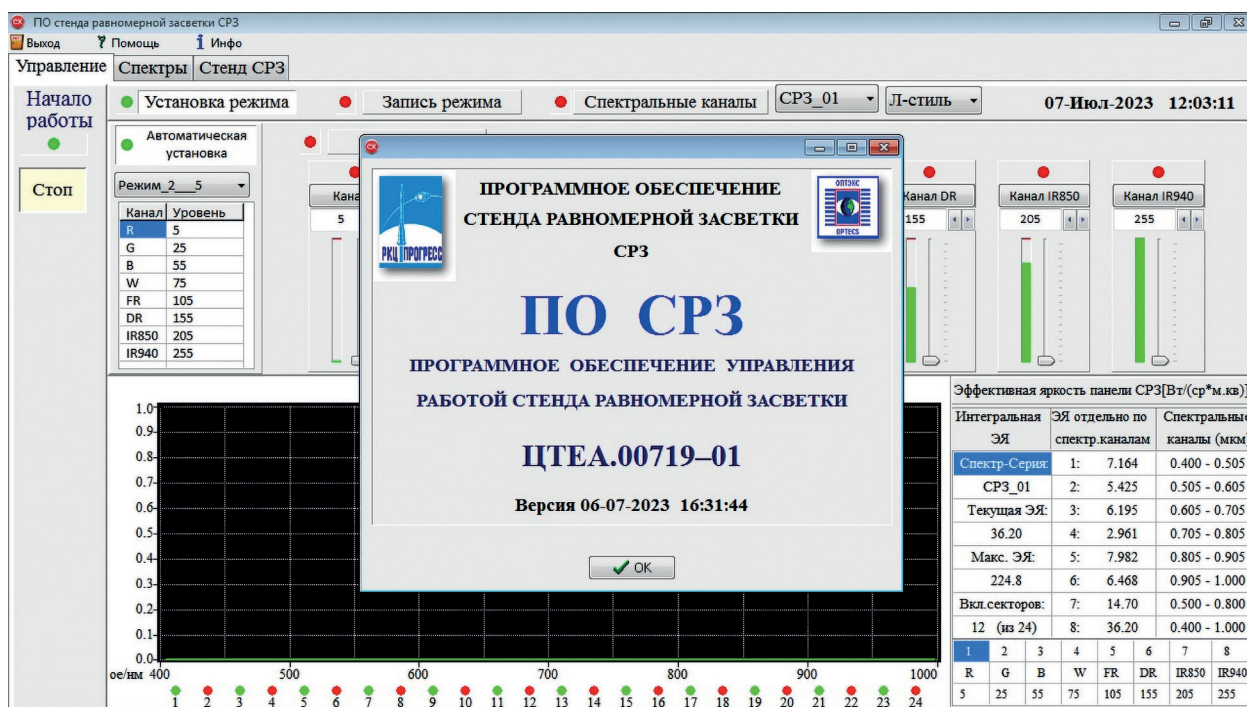


Рис. 6. Программное обеспечение управления работой стенда равномерной засветки фокальной плоскости ОЭА КА ДЗЗ

Используя упомянутую «добротность» спектра светодиодов, можно произвести оценку необходимого числа  $N$ : количество различных спектральных групп светодиодов для качественного приближения результирующего интегрального излучения стенда засветки

$$\mathbb{S}(\lambda) = \sum_{i=1}^N c_i S_i(\lambda)$$
 к требуемому распределению  $\text{Spectr}(\lambda)$ . Для зависимостей, приводимых на рис. 3, полуширина спектрального излучения светодиодов варьируется на уровне длины волны 20–80 нм. В этом случае для качественной аппроксимации результирующего излучения стенда в диапазоне длин волн  $(\lambda_1, \lambda_2) = 400\text{--}1000$  нм необходимо использовать от восьми различных по спектру групп светодиодов. При этом по мере увеличения количества спектральных групп светодиодов результирующая кривая излучения стенда (см. рис. 5, зелёная сплошная линия) становится всё более близкой к требуемому распределению (см. рис. 5, белая пунктирная линия), что и наблюдается в работе стенда СРЗ.

Отметим также, что на практике целевая стендовая функция может содержать большое число требований в зависимости от класса решаемых задач (анализ созревания урожая на полях сельхозугодий, поиск различного рода загрязнений окружающей среды и т. п.) (Системы..., 2022).

В результате у выражения 
$$\mathbb{S}(\lambda) = \sum_{i=1}^N c_i S_i(\lambda)$$
 при аппроксимации  $\text{Spectr}(\lambda)$  могут появляться дополнительные весовые коэффициенты  $W_i$  или даже  $W_i(\lambda)$ , отражающие важность получения более точных результатов в определённых спектральных диапазонах длины волны

излучения  $(\lambda_1^*, \lambda_2^*) \in (\lambda_1, \lambda_2)$  при тематической обработке получаемых космических снимков. Основная система уравнений (1) принимает вид:

$$\mathfrak{F}(c_1, \dots, c_N) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[ \text{Spectr}(\lambda) - \sum_{i=1}^N W_i(\lambda) c_i S_i(\lambda) \right]^2 d\lambda \rightarrow \min. \quad (7)$$

Решение системы уравнений (7) получается с использованием итерационной процедуры поиска локальной обратной матрицы, постоянной на каждом из шагов итерации, для получения коэффициентов  $(c_1, \dots, c_N)$ , оптимизирующих работу стенда засветки фокальной плоскости фотоприёмника КА ДЗЗ.

## Заключение

В заключение отметим, что описанная в статье процедура нахождения оптимальных коэффициентов спектральной настройки стенда СРЗ аналогична многочисленным подобным процедурам в методах наименьших квадратов. Спектры излучений светодиодов в нашем случае играют роль базисных функций, их пересечение по спектру аналогично нормальности базисных координат в случае многомерного анализа. Возможность произвольного задания целевой функции, отличной от солнечного излучения, расширяет круг решаемых задач в стенде СРЗ.

Наряду с анализом чувствительности ОЭА по спектру стенд СРЗ может быть использован и в других задачах оптимизации работы ОЭА КА ДЗЗ, в частности для обеспечения равномерной чувствительности элементов ОЭА (так называемые задачи предполётной калибровки, радиометрической коррекции аппаратуры и т.п.), результаты которых будут представлены в последующих работах.

## Литература

1. *Бакланов А. И.* Системы наблюдения и мониторинга. М.: БИНОМ, 2009. 234 с.
2. *Беклемишев Д. В.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. СПб.: Лань, 2015. 448 с.
3. *Кирилин Р. Н., Ахметов Р. Н., Шахматов Е. В. и др.* Опыт-технологический малый космический аппарат «Аист-2Д». Самара: СамНЦ РАН, 2017. 324 с.
4. *Кудрявцев Л. Д.* Курс математического анализа. М.: Высш. шк., 1981. 584 с.
5. Лабораторный практикум по общей физике / ред. А. В. Максимищев, М. Г. Никулин. М.: МФТИ, 2019. 446 с.
6. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Т. 4. Оптика. 3-е изд. М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2005. 792 с.
7. Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: материалы XVIII научно-техн. конф. М.; Зеленоград, 2022. 284 с.



## Spectral adjustment of the illumination stand

K. V. Alatortsev<sup>1</sup>, O. A. Alatortseva<sup>2</sup>, S. G. Danilov<sup>2</sup>, V. L. Alatortsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology  
Dolgoprudny 141700, Moscow Region, Russia  
E-mail: alatortsev.kv@mail.ru*

<sup>2</sup> *National Research University of Electronic Technology  
Zelenograd 124498, Moscow, Russia  
E-mail: alcorsat@mail.ru*

Remote sensing of the Earth using spacecraft has been used for a long time. The basis for recording information is photodetector devices of the spacecraft based on charge-coupled devices using various forms of accumulation, including with time delay and accumulation of charge. The complexity of the equipment determines the requirements for pre-flight testing and calibration of satellite equipment. One of such verification procedures is the testing of remote sensing spacecraft photodetectors on various stands of uniform illumination of the focal plane, which allow testing, calibration and radiometric correction of the sensitivity of optoelectronic equipment (OEA) of the spacecraft. To solve these problems, it is necessary to be able to influence the spectral composition of the radiation of the uniform illumination stand, to set it distributed according to a given spectral distribution. This work is devoted to optimizing the setting of the bench equipment of uniform illumination to set the spectral composition of its radiation close to a given distribution over the spectrum. The illumination stand is adjusted based on the optimal choice of weight coefficients that allow the use of various spectral emitters of the stand with the required weights for adjusting the brightness of its radiation. The values of the weighting coefficients are obtained from solving the optimization problem of minimizing the functional difference between a given spectrum and the radiation spectrum of the stand formed by the composition of its LED components. The received spectral bench information is used in the subsequent configuration of the remote sensing spacecraft OEA, its radiometric calibration and in other areas of space instrumentation and remote sensing.

**Keywords:** spacecraft, remote sensing of Earth, stand of uniform flare, optical-electronic equipment, calibration

Accepted: 29.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-163-171

## References

1. Baklanov A. I., *Sistemy nablyudeniya i monitoringa* (Systems of supervision and monitoring), Moscow, BINOM, 2009, 234 p.
2. Beklemishev D. V., *Kurs analiticheskoi geometrii i lineinoi algebry* (Course of analytical geometry and linear algebra), Saint Petersburg: Lan Publ. House, 2015, 448 p.
3. Kirilin R. N., Akhmetov R. N., Shakhmatov E. V. et al., *Opytno-tekhnologicheskii maliy kosmicheskii apparat Aist-2D* (Experienced and technological small spacecraft Aist-2D), Samara: SamNTs RAN, 2017, 324 p.
4. Kudryavtsev L. D., *Kurs matematicheskogo analiza* (Course of mathematical analysis), Moscow: Higher school, 1981, 584 p.
5. *Laboratornyi praktikum po obshchei fizike* (Laboratory workshop of the general physics), A. V. Maksimychyev, M. G. Nikulin (eds.). Moscow, MFTI, 2019, 446 p.
6. Sivukhin D. V., *Obshchii kurs fiziki. T. 4. Optika* (General course in physics. Vol. 4. Optics), Moscow: Fizmatlit; MFTI Publ. House, 2005, 792 p.
7. *Sistemy nablyudeniya, monitoringa i distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Systems of supervision, monitoring and remote sensing of Earth), Proc. 18<sup>th</sup> Scientific and Technical Conf., Moscow; Zelenograd, 2022, 284 p.