

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1024-1032

УДК 681.78; 621.3; 621.396

Новый подход к измерениям и расчетам спектральных характеристик селективных элементов оптико-электронных систем

Александр Владимирович Ильинский¹, Надежда Константиновна Мальцева²✉, Евгений Олегович Раскин³

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ avilinskii@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6413-6411>

² nkmaltceva@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0004-4515-0261>

³ raskin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7830-6841>

Аннотация

Введение. Исследованы вопросы энергетической калибровки и точных измерений спектральных характеристик элементов оптико-электронных систем, предназначенных для анализа излучения удаленных объектов. Современные методы калибровки требуют учета переменных параметров окружающей среды, особенно в инфракрасном диапазоне спектра. Это приводит к значительным погрешностям измерений и создает затруднения при проведении наземных испытаний. Сложность компенсации атмосферных эффектов, низкая точность и трудоемкость их учета при использовании классических методик приводят к значительным ошибкам и снижают качество полученных данных. Предложенный подход базируется на использовании узкоспектральных излучателей, расположенных непосредственно перед входным иллиминатором прибора, и исключает необходимость учета спектрального пропускания атмосферы. **Метод.** Вместо традиционных методов, основанных на использовании эталонных источников типа «черное тело» или фотоприемников, требующих учета пропускания воздушного тракта, предлагается применять в качестве калибровочного излучателя ряд узкоспектральных (спектрозональных) потоков излучения, воздействующих на испытуемую оптико-электронную систему непосредственно в плоскости ее входного иллиминатора, что позволяет получать спектральные характеристики исследуемых элементов напрямую, минуя этап определения пропускания воздушного промежутка. Такой подход уменьшает неопределенность измерений и позволяет проводить калибровку без привлечения сложных компенсирующих измерений. **Основные результаты.** Проведенные эксперименты подтвердили, что предложенный метод снижает неопределенность измерений минимум на два порядка по сравнению с традиционными подходами. Эффективность метода продемонстрирована на конкретных примерах, которые показали преимущества метода при исследовании источников света и измерениях спектральной чувствительности приборов. **Обсуждение.** Новизна предложенного подхода состоит в устранении основного источника неопределенности (учета спектрального пропускания атмосферы), что кардинально улучшает метрологические показатели калибровки. Предложенный метод эффективен практически во всех прикладных ситуациях и обеспечивает существенное повышение точности измерений. По сравнению с классическими решениями, метод проще реализуется технически и дает значительно лучшие результаты в области дистанционной оптической разведки, медицины, сельского хозяйства и экологии.

Ключевые слова

спектрофотометрия, оптико-электронная система, спектральные характеристики, энергетическая калибровка, инфракрасный диапазон, калибровка, излучение удаленных объектов, черное тело, системы обнаружения, спектральный анализ

Ссылка для цитирования: Ильинский А.В., Мальцева Н.К., Раскин Е.О. Новый подход к измерениям и расчетам спектральных характеристик селективных элементов оптико-электронных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 6. С. 1024–1032. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1024-1032

Innovative method for measuring and calculating spectral characteristics of selective elements in optoelectronic systems

Alexander V. Ilinskii¹, Nadezhda K. Maltseva²✉, Eugene O. Raskin³

^{1,2,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ avilinskii@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6413-6411>

² nkmaltseva@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0004-4515-0261>

³ raskin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7830-6841>

Abstract

The paper deals with the issues of energy calibration and precise measurements of the spectral characteristics of optoelectronic systems elements designed for the analysis of radiation from remote objects. Modern calibration methods require the consideration of environmental variables, particularly in the infrared spectrum range. This leads to significant measurement errors and creates difficulties during ground-based tests. The complication of compensating for atmospheric effects, the low accuracy, and the labor-intensive nature of their consideration when using traditional techniques result in significant errors and reduce the quality of the obtained data. The proposed approach is based on the use of narrow-spectrum emitters located directly in front of the instrument input port, eliminating the need to account for atmospheric spectral transmission. Instead of traditional methods based on the use of standard sources, such as “black bodies” or photodetectors that have to take into account the transmission of the air gap, it is proposed to use a series of narrow-spectrum (spectral-zone) radiation fluxes as a calibration emitter that affects the testing optical-electronic system directly in its input window plane, which allows to provide the direct measurement of the spectral characteristics of the elements under study, bypassing the step of determining the transmission of the air gap. This approach reduces the measurements uncertainty and allows carrying out calibration without the need for complex compensating measurements. The conducted experiments confirmed that the proposed method reduces the measurement uncertainty by at least two orders of magnitude compared to traditional approaches. The effectiveness of the method is demonstrated through specific examples that show the advantages of the method in the study of light sources and measurements of the spectral sensitivity of instruments. The novelty of the proposed approach is the elimination of the main source of uncertainty (accounting for the spectral transmission of the atmosphere), which significantly improves the metrological performance of calibration. The proposed method is effective in almost all application situations and provides a significant increase in measurement accuracy. Compared to classical solutions, this method is easier to implement technically and it provides significantly better results in the fields of remote optical reconnaissance, medicine, agriculture, and ecology.

Keywords

spectrophotometry, optoelectronic system, spectral characteristics, energy calibration, infrared range, remote object radiation, black body, detection systems, spectral analysis

For citation: Ilinskii A.V., Maltseva N.K., Raskin E.O. Innovative method for measuring and calculating spectral characteristics of selective elements in optoelectronic systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 6, pp. 1024–1032 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1024-1032

Введение

Энергетическая калибровка и точные измерения спектральных характеристик элементов оптико-электронных систем (ОЭС) являются фундаментальной задачей спектральной фотометрии и радиометрии [1–6]. Точность этих процедур напрямую определяет достоверность данных, получаемых ОЭС самого различного назначения: от дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и мониторинга природных катастроф [7–9] до систем промышленного контроля [10, 11], медицинской диагностики [12], сельскохозяйственного и экологического мониторинга. Особенно критичны требования к калибровке в инфракрасном (ИК) диапазоне, где присутствуют полосы сильного поглощения излучения атмосферными газами [13, 14], что существенно усложняет как наземные испытания аппаратуры, предназначенной для работы в космосе или атмосфере, так и интерпретацию получаемых данных.

Существующие методы энергетической калибровки и измерения спектральных характеристик селективных элементов (фотоприёмных устройств, фильтров, детекторов) ОЭС [15, 16] часто требуют учета или строгого контроля параметров окружающей среды, в первую

очередь — спектрального пропускания воздушного тракта между эталонным источником излучения [17] (таким как модель абсолютно черного тела [18]) и калибруемым прибором [4, 5, 8, 14, 19]. Эта необходимость обусловлена тем, что традиционные методики предполагают измерение сигнала прибора в ответ на известное падающее на его вход излучение [2, 3, 5, 8, 13]. В ИК диапазоне, особенно в областях сильного поглощения (например, полосы водяного пара и углекислого газа), учет пропускания атмосферы становится сложной, трудоемкой задачей и зачастую основным источником неопределенности метрологической задачи [8, 13, 14]. Точное измерение или расчет спектрального пропускания реального воздушного тракта требуют сложного дополнительного оборудования (высокоточные спектрометры, контроль параметров атмосферы) и вносят значительные погрешности [5, 19]. Кроме того, существующие методы калибровки многоканальных и сканирующих систем [4, 9, 10] могут быть трудоемкими и требующими сложных эталонных установок, обеспечивающих равномерное поле освещения в широком спектральном и динамическом диапазонах [4, 5, 8, 17, 18].

Однако, несмотря на достигнутый прогресс [1, 7, 9], проблема необходимости учета спектрального пропу-

скания атмосферы в тракте между эталонным источником и калибруемым прибором при высокоточных измерениях в ИК диапазоне, особенно в полосах поглощения, остается актуальной [13, 14]. Существующие методики либо требуют сложных компенсационных измерений, либо вынужденно ограничиваются спектральными диапазонами с высокой прозрачностью атмосферы, либо вносят значительную неопределенность. В настоящей работе предлагается подход, позволяющий упростить процедуру калибровки ОЭС и повысить точность спектральных измерений за счет устранения необходимости учитывать спектральное пропускание атмосферы, что традиционно создает значительную неопределенность и сложность в процессе калибровки, особенно в ИК диапазоне.

Предлагаемое решение

Предлагаемый принципиально новый подход основан на использовании в качестве калибровочного излучателя ряда узкоспектральных (спектрозональных) потоков излучения, воздействующих на испытуемую ОЭС непосредственно в плоскости ее входного иллюминатора. Это позволяет получать спектральные характеристики исследуемых элементов напрямую, минуя этап определения пропускания воздушного промежутка.

Под спектральным составом оптического излучения понимается ряд потоков излучения в соответствующем ряде спектральных зон. Установка для получения набора узкоспектральных зон описана в работе [14]. Эти зоны могут быть заданы посредством системы узких фильтрующих функций, разделяющих весь спектр на составляющие части. При этом одновременно можно достичь двух целей: с одной стороны калибруется исследуемая ОЭС, с другой — определяются спектральные характеристики и спектрозональные параметры пропускания оптики самого спектроанализирующего прибора (САП).

Формальная постановка задачи. Рассмотрены методы, расчеты и измерения спектральных характеристик элементов ОЭС, в основе которых лежит следующее выражение [14]:

$$U = \int_{\lambda_n}^{\lambda_b} \Phi_\lambda(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $\Phi_\lambda(\lambda)$ — спектральная плотность потока излучения источника оптического сигнала в пределах выделяемого диапазона длин волн; U — сигнал приемника оптического излучения, обладающего спектральной чувствительностью $S(\lambda)$ в пределах этого же диапазона длин волн; $\tau(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания оптической трассы между источником и приемником; (λ_n, λ_b) — минимальный спектральный промежуток между длинами волн λ_n и λ_b , за пределами которого подынтегральное выражение $\Phi_\lambda(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda)$ равно нулю.

Базовые соотношения. Выражение (1) описывает сигнал на выходе некоторой ОЭС, на вход которой поступает оптическое излучение источника со спек-

тральной плотностью $\Phi_\lambda(\lambda)$. Если величина $\Phi_\lambda(\lambda)$ в пределах спектрального промежутка (λ_n, λ_b) постоянна и равна спектральной плотности потока излучения на длине волны λ_{cp} $\Phi_\lambda(\lambda_{cp})$, при этом $\lambda_{cp} = \frac{\lambda_n + \lambda_b}{2}$, то появляется возможность корректного измерения. В этом случае соотношение (1) может быть преобразовано в следующий вид:

$$\Phi_\lambda(\lambda_{cp}) = \frac{U}{\int_{\lambda_n}^{\lambda_b} \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda}. \quad (2)$$

Здесь полезно заметить, что интеграл, стоящий в знаменателе дроби (2), по сути, представляет собой некоторую чувствительность данной ОЭС именно к спектральной плотности потока излучения на своем входе, которую можно откалибровать. Для этого на вход рассматриваемой ОЭС следует подать излучение опорного источника оптического излучения с постоянной и известной спектральной плотностью $\Phi_\lambda^0(\lambda_{cp})$ в пределах спектрального промежутка (λ_n, λ_b) . Соответствующий сигнал U^0 определится формулой (1) и составит:

$$U^0 = \Phi_\lambda^0(\lambda_{cp}) \int_{\lambda_n}^{\lambda_b} \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Из (2) и (3) получим формулу для расчета искомой спектральной плотности падающего на вход ОЭС потока излучения:

$$\Phi_\lambda(\lambda_{cp}) = \Phi_\lambda^0(\lambda_{cp}) \frac{U}{U^0}. \quad (4)$$

Классический подход и его ограничения. Выражения (1)–(4) описывают известный метод измерения спектральной характеристики потоков оптического излучения с использованием черного тела [18]. Однако требование постоянства спектральной характеристики источника излучения в пределах спектрального промежутка (λ_n, λ_b) не позволяет его расширить, например, с целью увеличения отношения сигнала к шуму при подобных измерениях. Это связано с тем, что непостоянство (флуктуации) спектральных характеристик источников излучения как исследуемого, так и опорного, в пределах рабочего промежутка (λ_n, λ_b) влечет за собой появление соответствующих методических неопределенностей результата измерения, которыми невозможно пренебречь.

С целью исключения указанных неопределенностей предлагается новый подход к данным измерениям. Для его описания обратимся к выражению (1). Допустим, что измеряемая спектральная характеристика $\Phi_\lambda(\lambda)$ на промежутке (λ_n, λ_b) — переменная, но при этом она изменяется линейно:

$$\Phi_\lambda(\lambda) = a\lambda + b, \text{ где } \lambda_n < \lambda < \lambda_b, \quad (5)$$

$$\text{где } a = \frac{\Phi_\lambda(\lambda_b) - \Phi_\lambda(\lambda_n)}{\lambda_b - \lambda_n}; \quad b = \frac{\Phi_\lambda(\lambda_n)\lambda_b - \Phi_\lambda(\lambda_b)\lambda_n}{\lambda_b - \lambda_n}.$$

Подставив (5) в (1), получим:

$$\begin{aligned}
 U &= \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} (a\lambda + b)\tau(\lambda)S(\lambda)d\lambda = a \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \lambda\tau(\lambda)S(\lambda)d\lambda + \\
 &+ b \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \tau(\lambda)S(\lambda)d\lambda = \\
 &= \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \tau(\lambda)S(\lambda)d\lambda \left[a \frac{\int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \lambda\tau(\lambda)\Phi_\lambda(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \tau(\lambda)\Phi_\lambda(\lambda)d\lambda} + b \right] = S\Phi_\lambda(\lambda_1), \\
 \text{где } S &= \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \tau(\lambda)S(\lambda)d\lambda; \lambda_1 = \frac{\int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \lambda\tau(\lambda)\Phi_\lambda(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \tau(\lambda)\Phi_\lambda(\lambda)d\lambda}.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Предлагаемый подход: учет линейной зависимости. Предположим, что спектральная характеристика опорного источника $\Phi_\lambda^0(\lambda)$ на промежутке (λ_H, λ_B) изменяется линейно. Исходя из этого, применим формулу (6) для вычисления сигнала опорного источника:

$$U^0 = S\Phi_\lambda^0(\lambda_1). \tag{7}$$

Из (6) и (7) получим формулу для расчета искомой спектральной плотности:

$$\Phi_\lambda(\lambda_1) = \Phi_\lambda^0(\lambda_1) \frac{U}{U^0},$$

где

$$\lambda_1 = \frac{\int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \lambda\tau(\lambda)\Phi_\lambda(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \tau(\lambda)\Phi_\lambda(\lambda)d\lambda}, \tag{8}$$

аналогично выражению (6).

В результате требование постоянства спектральной характеристики источников в пределах спектрального промежутка (λ_H, λ_B) снято. Теперь появилась необходимость расчетного или экспериментального определения величины λ_1 , которую называют спектральной координатой [14]. В данном случае функция $\tau(\lambda)S(\lambda)$ является спектральной характеристикой чувствительности ОЭС, используемой для данных измерений.

Покажем принадлежность λ_1 спектральному промежутку (λ_H, λ_B) . Для этого обратимся к интегралу (1) и применим к нему теорему о среднем [20]:

$$U = \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \Phi_\lambda(\lambda)\tau(\lambda)S(\lambda)d\lambda = S\Phi_\lambda(\vartheta), \tag{9}$$

где ϑ принадлежит промежутку (λ_H, λ_B) и $S = \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \tau(\lambda)S(\lambda)d\lambda$.

Формула (9) справедлива в самом общем случае.

Сопоставляя (6) и (9), нетрудно видеть, что $\Phi_\lambda(\vartheta) = \Phi_\lambda(\lambda_1)$. Для линейной функции $\Phi_\lambda(\lambda)$ из равенства ее значений следует равенство соответствующих значений аргумента, т. е. $\lambda_1 = \vartheta$ и принадлежит промежутку (λ_H, λ_B) , что и требовалось показать.

Отметим, что λ_1 является координатой центра масс плоской фигуры, ограниченной сверху графиком функции $\tau(\lambda)S(\lambda)$, снизу — осью абсцисс на промежутке (λ_H, λ_B) . Если график данной функции симметричен относительно середины данного промежутка, то:

$$\lambda_1 = \frac{1}{2}(\lambda_H + \lambda_B). \tag{10}$$

Применив формулы (8) и (4), можно провести измерение спектральной плотности потока излучения в двух вариантах без методических неопределенностей при соблюдении соответствующих условий. Для первого варианта это постоянство спектральных характеристик измеряемого и опорного источников в рабочем спектральном промежутке, а для второго — это их линейность на том же промежутке.

Однако эти условия могут не соблюдаться. Потому необходимо провести анализ влияния данных факторов на методическую неопределенность результата измерения для обоих вариантов.

Пусть для первого варианта относительные изменения спектральных характеристик измеряемого и опорного источников не превышают следующих величин соответственно:

$$\frac{\Delta\Phi_\lambda(\lambda)}{\Phi_\lambda(\lambda_{cp})} \leq \delta; \frac{\Delta\Phi_\lambda^0(\lambda)}{\Phi_\lambda^0(\lambda_{cp})} \leq \delta^0, \tag{11}$$

где λ принадлежит промежутку (λ_H, λ_B) .

Уровень сигнала ОЭС при воздействии на нее опорного источника получим аналогично (9). Для этого обратимся к интегралу (1) и применим к нему теорему о среднем:

$$U^0 = \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \Phi_\lambda^0(\lambda)\tau(\lambda)S(\lambda)d\lambda = S\Phi_\lambda^0(\vartheta^0), \tag{12}$$

где ϑ^0 принадлежит промежутку (λ_H, λ_B) и $S = \int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \tau(\lambda)S(\lambda)d\lambda$.

Из (9) и (12) получим следующее соотношение:

$$\Phi_\lambda(\vartheta) = \Phi_\lambda^0(\vartheta^0) \frac{U}{U^0}, \tag{13}$$

где ϑ и ϑ^0 принадлежат промежутку (λ_H, λ_B) .

Полученная формула (13) является точной, но непригодной для расчета по причине неизвестных ϑ и ϑ^0 . Для вычислений применим формулу (4) с оценкой возникших неопределенностей, для которых получим необходимые соотношения. Для этого введем следующие обозначения:

$$\Delta\Phi = \Phi_\lambda(\vartheta) - \Phi_\lambda(\lambda_{cp}); \Delta\Phi^0 = \Phi_\lambda^0(\vartheta^0) - \Phi_\lambda^0(\lambda_{cp}). \tag{14}$$

Используя обозначения (14), придадим соотношению (13) следующий вид:

$$\Phi_\lambda(\lambda_{cp}) = \Phi_\lambda^0(\lambda_{cp}) \frac{U}{U^0} + \Delta\Phi^0 \frac{U}{U^0} - \Delta\Phi. \tag{15}$$

Второе и третье слагаемые в правой части равенства (15) являются фактическими отклонениями измеряемой величины $\Phi_\lambda(\lambda_{cp})$ от результата измерения $\Phi_\lambda^0(\lambda_{cp}) \frac{U}{U^0}$, вызванными непостоянством спектральной характеристики опорного и измеряемого источников.

Из (11) следует, что:

$$\frac{|\Delta\Phi|}{\Phi_\lambda(\lambda_{cp})} \leq \delta, \quad (16)$$

$$\frac{|\Delta\Phi^0|}{\Phi_\lambda^0(\lambda_{cp})} \leq \delta^0. \quad (17)$$

Умножив числитель и знаменатель дроби в левой части (17) на положительную величину $\frac{U}{U^0}$, получим:

$$\frac{|\Delta\Phi^0| \frac{U}{U^0}}{\Phi_\lambda^0(\lambda_{cp}) \frac{U}{U^0}} \leq \delta^0. \quad (18)$$

Из (15) следует, что $\Phi_\lambda(\lambda_{cp}) \cong \Phi_\lambda^0(\lambda_{cp}) \frac{U}{U^0}$, поэтому выражение (18) приобретает окончательный вид:

$$\frac{|\Delta\Phi^0| \frac{U}{U^0}}{\Phi_\lambda(\lambda_{cp})} \leq \delta^0. \quad (19)$$

Полученные формулы (16) и (19) показывают, что относительные неопределенности результата измерения спектральной плотности $\Phi_\lambda(\lambda_{cp})$ не превышают величин δ и δ^0 , являющихся, в соответствии с (11), максимальными относительными изменениями спектральных характеристик измеряемого и опорного источников, на промежутке (λ_n, λ_B) .

В результате, на основании предложенного подхода, получены соотношения для оценки методических неопределенностей по первому варианту измерений.

Анализ неопределенностей. Для оценки методических неопределенностей по второму варианту необходимо определиться с оценкой нелинейности спектральных характеристик обоих источников на промежутке (λ_n, λ_B) .

На рис. 1 показана мера нелинейности спектральной характеристики потока излучения $\Phi_\lambda(\lambda)$ на промежутке (λ_n, λ_B) , за которую принята величина h , представляющая собой расстояние в направлении оси ординат между двумя параллельными прямыми, зажимающими график спектральной характеристики $\Phi_\lambda(\lambda)$ на промежутке (λ_n, λ_B) . Прямой линии, находящейся сверху от графика $\Phi_\lambda(\lambda)$, соответствует функция $\Phi^B(\lambda)$, а линии, находящейся снизу от $\Phi_\lambda(\lambda)$ соответствует линейная функция $\Phi^H(\lambda)$.

Из рис. 1 следует двойное неравенство:

$$\Phi^H(\lambda) \leq \Phi_\lambda(\lambda) \leq \Phi^B(\lambda), \quad (20)$$

которое справедливо для всех λ , принадлежащих промежутку (λ_n, λ_B) .

Из выражения (20) следует двойное интегральное неравенство:

$$\int_{\lambda_n}^{\lambda_B} \Phi^H(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda \leq \int_{\lambda_n}^{\lambda_B} \Phi_\lambda(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda \leq \int_{\lambda_n}^{\lambda_B} \Phi^B(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda. \quad (21)$$

Функции $\Phi^H(\lambda)$ и $\Phi^B(\lambda)$ — линейные, поэтому применим формулу (6) к крайним интегралам неравенства (21). К среднему интегралу неравенства (21) применим теорему о среднем (9) и разделим его на величину:

$$S = \int_{\lambda_n}^{\lambda_B} \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda.$$

Тогда получим:

$$\Phi^H(\lambda_1) \leq \Phi_\lambda(\vartheta) \leq \Phi^B(\lambda_1), \quad (22)$$

где $\lambda_1 = \frac{\int_{\lambda_n}^{\lambda_B} \lambda \tau(\lambda) \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_n}^{\lambda_B} \tau(\lambda) \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda}$ и ϑ принадлежат промежутку (λ_n, λ_B) .

Из неравенства (20) следует:

$$\Phi^H(\lambda_1) \leq \Phi_\lambda(\lambda_1) \leq \Phi^B(\lambda_1). \quad (23)$$

Умножив неравенство (23) на минус единицу и сложив полученный результат с (22), запишем:

$$|\Phi_\lambda(\vartheta) - \Phi_\lambda(\lambda_1)| \leq \Phi^B(\lambda_1) - \Phi^H(\lambda_1) = h. \quad (24)$$

На рис. 2 показано графическое пояснение к выводу формулы (24).

Точки В и F ограничивают отрезок, содержащий измеряемую величину $\Phi_\lambda(\lambda_1)$ и результат измерения $\Phi_\lambda(\vartheta)$. Точка В имеет координаты λ_1 и $\Phi^B(\lambda_1)$, а точка F — координаты λ_1 и $\Phi^H(\lambda_1)$.

Поясним важность соотношения (24) на следующем примере.

Пусть имеем ОЭС с откалиброванными параметрами:

$$S = \int_{\lambda_n}^{\lambda_B} \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda; \lambda_1 = \frac{\int_{\lambda_n}^{\lambda_B} \lambda \tau(\lambda) \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_n}^{\lambda_B} \tau(\lambda) \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda}.$$

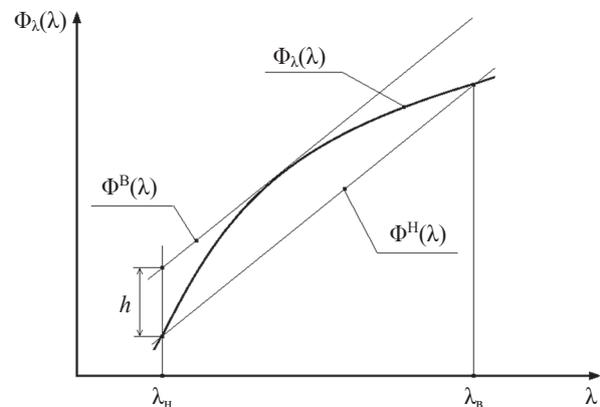


Рис. 1. Графическое построение, поясняющее принятую в настоящей работе меру h нелинейности характеристики $\Phi_\lambda(\lambda)$ на промежутке (λ_n, λ_B)

Fig. 1. Graphical illustration to describe the nonlinearity h of the characteristics $\Phi_\lambda(\lambda)$ at the interval (λ_n, λ_B)

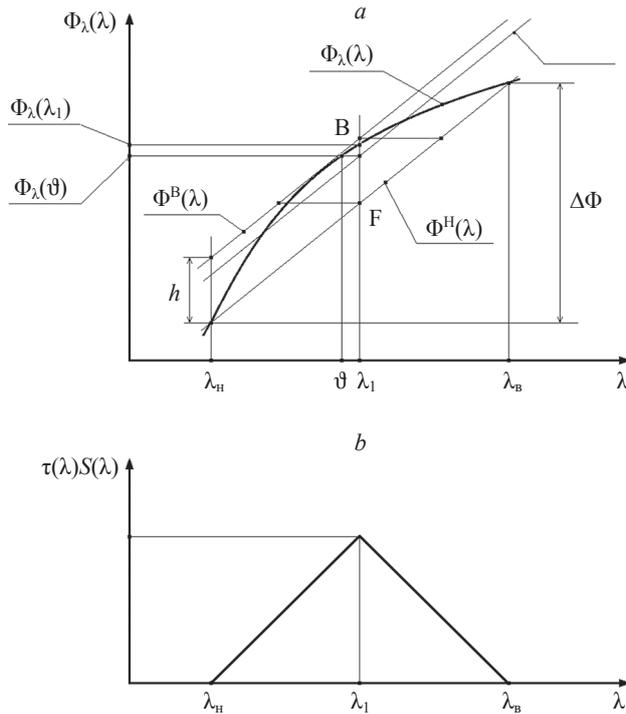


Рис. 2. Графическое пояснение к выводу формулы (24) на примере измерения спектральной плотности потока излучения $\Phi_\lambda(\lambda_1)$ на длине волны λ_1 в случае плавно нелинейно изменяющейся спектральной характеристики потока излучения: график спектрального распределения потока излучения (а), график спектральной характеристики чувствительности оптико-электронной системы (б)

Fig. 2. Graphical illustration of formula (24) derivation based on the example of optical flux spectral density $\Phi_\lambda(\lambda_1)$ measurement at the wavelength λ_1 in case of continuous curve nonlinearly spectral characteristic $\Phi_\lambda(\lambda)$ (а) and certain optics-electronic system spectral sensitivity characteristic $\tau(\lambda)S(\lambda)$ (б)

Спектральная характеристика чувствительности данной ОЭС имеет форму равнобедренного треугольника и приведена на рис. 2, б. Такие ОЭС в работах [6, 21] называют спектрометрами, с помощью которых можно измерить спектральную плотность $\Phi_\lambda(\lambda_1)$ потока излучения некоторого источника. В этом случае λ_1 рассчитывается в соответствии с формулой (10).

Если спектральная характеристика источника на $\Phi_\lambda(\lambda)$ на промежутке (λ_n, λ_b) не линейна, тогда в соответствии с формулой (9) имеем $\Phi_\lambda(\vartheta) = \frac{U}{S}$ — результат измерения величины $\Phi_\lambda(\lambda_1)$.

При этом формула (24) гарантирует, что $|\Phi_\lambda(\vartheta) - \Phi_\lambda(\lambda_1)| \leq h$.

Таким образом, методическая неопределенность результата измерения не превышает меру нелинейности измеряемой спектральной характеристики на (λ_n, λ_b) .

На рис. 2, а представлен пример плавной, монотонно возрастающей характеристики $\Phi_\lambda(\lambda)$, для которой разница $|\Phi_\lambda(\vartheta) - \Phi_\lambda(\lambda_1)|$ гораздо меньше h .

Изменим характеристику $\Phi_\lambda(\lambda)$ в пределах отрезка BF (рис. 3). Уровень $\Phi_\lambda(\vartheta)$ практически не изменился. Однако разность $\Phi_\lambda(\vartheta) - \Phi_\lambda(\lambda_1)$ поменяла знак и значительно увеличилась по модулю. При этом ϑ оказалась больше λ_1 . Видно, что, прижимая основной график

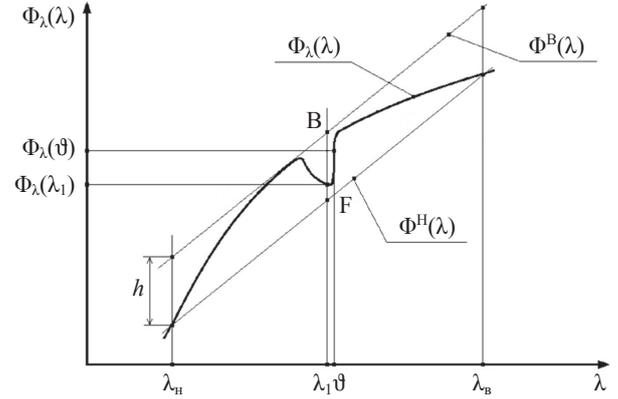


Рис. 3. Графическое пояснение вывода формулы (24) в случае измерения спектральной характеристики потока излучения, сильно изменяющейся в окрестности длины волны λ_1

Fig. 3. Graphical illustration of formula (24) derivation based on example of measurement of optical flux highly changeable spectral characteristic at the wavelength λ_1

функции $\Phi_\lambda(\lambda)$ к прямой $\Phi^B(\lambda)$, уровень $\Phi_\lambda(\vartheta)$ приближается к точке В. С другой стороны, одновременно сужая и вытягивая средний выступ графика $\Phi_\lambda(\lambda)$ к точке F, уровень $\Phi_\lambda(\lambda_1)$ также приближается к точке F. В результате этих действий появляется вариант измеряемой характеристики, для которой отклонение результата измерения от измеряемой величины положительно и достигает максимального значения равного h .

Аналогичным образом можно показать, что отклонение результата измерения от измеряемой величины может быть отрицательным и достигать по модулю максимального значения близкого к h . Соответствующий вариант измеряемой характеристики на промежутке (λ_n, λ_b) будет иметь график, близкий к $\Phi^H(\lambda_1)$ и в районе отрезка BF узкий выступ в сторону точки В.

Формула (24) справедлива также для описания потока излучения опорного источника и имеет вид:

$$|\Phi_\lambda^0(\vartheta) - \Phi_\lambda^0(\lambda_1)| \leq h^0, \quad (25)$$

где h^0 — нелинейность спектральной характеристики излучения опорного источника на промежутке (λ_n, λ_b) .

Получив ключевые формулы (24) и (25), найдем связь неопределенности результата измерения спектральной плотности $\Phi_\lambda(\lambda_1)$ с нелинейностями h и h^0 спектральных характеристик измеряемого и опорного источников для второго варианта.

Для этого введем следующие обозначения аналогичные обозначениям (14):

$$\Delta\Phi_1 = \Phi_\lambda(\vartheta) - \Phi_\lambda(\lambda_1); \Delta\Phi_1^0 = \Phi_\lambda^0(\vartheta) - \Phi_\lambda^0(\lambda_1). \quad (26)$$

Отсюда получим:

$$\Phi_\lambda(\vartheta) = \Phi_\lambda(\lambda_1) + \Delta\Phi_1; \Phi_\lambda^0(\vartheta) = \Phi_\lambda^0(\lambda_1) + \Delta\Phi_1^0. \quad (27)$$

Формула (13) справедлива для обоих вариантов, поэтому, подставив в нее (27), получим, после несложных преобразований, соотношение, аналогичное (15) для второго варианта,

$$\Phi_{\lambda}(\lambda_1) = \Phi_{\lambda}^0(\lambda_1) \frac{U}{U^0} + \Delta\Phi_1^0 \frac{U}{U^0} - \Delta\Phi_1. \quad (28)$$

Второе и третье слагаемые в правой части равенства (28) являются фактическими отклонениями измеряемой величины $\Phi_{\lambda}(\lambda_1)$ от результата измерения $\Phi_{\lambda}^0(\lambda_1) \frac{U}{U^0}$, вызванными нелинейностью спектральной характеристики опорного и измеряемого источников.

Модуль отношения третьего слагаемого (28) к измеряемой величине $\Phi_{\lambda}(\lambda_1)$ в соответствии с (24) и (26) удовлетворяет неравенству:

$$\left| \frac{\Delta\Phi_1}{\Phi_{\lambda}(\lambda_1)} \right| \leq \frac{h}{\Phi_{\lambda}(\lambda_1)} = \gamma, \quad (29)$$

где γ — относительная нелинейность спектральной характеристики измеряемого источника.

Модуль отношения второго слагаемого (28) к измеряемой величине $\Phi_{\lambda}(\lambda_1)$ в соответствии с (25) и (26) удовлетворяет следующему неравенству:

$$\left| \frac{\Delta\Phi_1^0 \frac{U}{U^0}}{\Phi_{\lambda}(\lambda_1)} \right| \cong \left| \frac{\Delta\Phi_1^0 \frac{U}{U^0}}{\Phi_{\lambda}^0(\lambda_1) \frac{U}{U^0}} \right| = \left| \frac{\Delta\Phi_1^0}{\Phi_{\lambda}^0(\lambda_1)} \right| \leq \frac{h^0}{\Phi_{\lambda}^0(\lambda_1)} = \gamma^0, \quad (30)$$

где γ^0 — относительная нелинейность спектральной характеристики опорного источника.

Полученные формулы (29) и (30) показывают, что относительные неопределенности результата измерения спектральной плотности $\Phi_{\lambda}(\lambda_{cp})$ по второму варианту не превышают соответствующих величин γ и γ^0 .

На практике относительные изменения спектральных характеристик на спектральных промежутках, как правило, гораздо больше относительных нелинейностей, поэтому в большинстве случаев измерения по второму варианту гораздо точнее, чем по первому.

Основные результаты

Приведем конкретные примеры измерения спектральных характеристик ОЭС.

Пример 1. Измерение спектральной плотности энергетической яркости такого источника оптического излучения как глобар (стержень из порошкообразного карбида кремния, использующийся при нагревании как источник ИК излучения) [22] в нормальном к излучающей поверхности направлении, на длине волны 3,7 мкм, при температуре глобара 1400 °С. В качестве опорного источника оптического излучения используем черное тело при температуре 800 °С. Положим, что спектральная характеристика чувствительности измерительной ОЭС имеет треугольную форму с максимумом на длине волны 3,7 мкм и протяженность — 0,1 мкм.

Рассчитали относительные изменения и нелинейности спектральных характеристик источников, используя формулу Планка для излучения абсолютно черного тела [21]. В результате этих вычислений получены следующие значения:

— для глобара $\delta = 6,6\%$ и $\gamma = 0,06\%$;

— для черного тела $\delta^0 = 3,4\%$ и $\gamma^0 = 0,01\%$.

Эти значения, подставленные в формулы (16), (19), (29) и (30), показывают, что методические неопределенности результата данного измерения при новом подходе оказываются, по крайней мере, на два порядка меньше, чем при традиционных методах измерения.

Пример 2. Измерение спектральной чувствительности ОЭС на экспериментальной установке, подробно описанной в [14]. Сигнал ОЭС описывается интегралом (1) при условии, что функция $S(\lambda)$ считается линейной в пределах спектрального промежутка $(\lambda_{ч}, \lambda_{в})$, а произведение $\Phi_{\lambda}(\lambda)\tau(\lambda)$ зависит от длины волны. Сложность расчета связана с тем, что $\tau(\lambda)$ включает в себя пропускание атмосферной трассы длиной около 10 м. В соответствии с предлагаемой теорией соотношение (1) можно представить в виде:

$$U = \Phi S(\lambda_1), \quad (31)$$

$$\text{где } \Phi = \int_{\lambda_{ч}}^{\lambda_{в}} \tau(\lambda)\Phi_{\lambda}(\lambda)d\lambda; \lambda_1 = \frac{\int_{\lambda_{ч}}^{\lambda_{в}} \lambda\tau(\lambda)\Phi_{\lambda}(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_{ч}}^{\lambda_{в}} \tau(\lambda)\Phi_{\lambda}(\lambda)d\lambda}.$$

Из формулы (31) следует, что для определения $S(\lambda_1)$ необходимо измерить три величины: U — сигнал ОЭС; Φ — спектрозональный поток, непосредственно воздействующий на ОЭС; λ_1 — спектральную координату потока Φ .

Спектросональный поток в данном случае [14] измеряется посредством опорного фотоприемного устройства (ОФУ). Для измерения λ_1 служит откалиброванный САП. Испытуемая ОЭС, ОФУ и САП работают поочередно и устанавливаются так, чтобы длина атмосферного хода лучей от источника до приемника, во всех трех случаях, была одинакова.

Косвенное измерение λ_1 основано на спектрограмме потока Φ , вырабатываемой САП. При этом используются методы численного интегрирования данной спектрограммы для определения ее спектральной координаты. Отметим, что спектральные координаты потока и соответствующей спектрограммы оказываются равны с достаточной для практики точностью при соблюдении некоторых условий. Важно, чтобы аппаратная функция САП была симметричной и неизменной в пределах спектрального промежутка $(\lambda_{ч}, \lambda_{в})$. При несоблюдении этих условий возникает методическая неопределенность измерения λ_1 , которую, впрочем, можно оценить.

Пример 3. Измерение спектрального пропускания. По аналогии с примером 2, можно описать процедуру измерения спектральной характеристики пропускания $\tau(\lambda)$ оптической системы, входящей в подынтегральное выражение (1).

Обсуждение

Главное преимущество предлагаемого метода — исключение необходимости учета спектрального пропускания атмосферы в измерительном тракте, что является основным источником неопределенности в

традиционных методах, особенно в ИК диапазоне. Это кардинально упрощает и ускоряет процедуру калибровки, а также повышает ее точность.

Метод позволяет представить спектрозональные фотометрические величины посредством двух параметров: уровня потока и его спектральной координаты. Это существенно сокращает объем необходимых данных и упрощает их обработку.

Эффективность метода зависит от отношения относительной нелинейности измеряемой характеристики к ее относительному изменению. В большинстве практических случаев нелинейность значительно меньше изменения, что обеспечивает высокую эффективность метода. В окрестностях экстремумов, где эти величины могут быть сравнимы, метод остается применимым, но точность снижается.

По сравнению с существующими решениями, требующими сложных компенсационных измерений или ограничивающимися диапазонами высокой прозрачности атмосферы, предлагаемый подход является более универсальным и метрологически обоснованным.

Заключение

Разработан новый подход к измерениям и расчетам спектральных характеристик селективных элементов оптико-электронных систем, основанный на использовании спектрозональных потоков излучения и их спек-

тральных координат. Подход позволяет исключить влияние переменных параметров атмосферы на результаты измерений, что особенно актуально для инфракрасного диапазона. Диапазон применения данного метода весьма широк. Он применим для измерения спектральной плотности излучения источников, спектральной чувствительности приемников и спектрального пропускания оптических систем. При этом эффективность подхода зависит от отношения относительной нелинейности измеряемой характеристики к ее относительному изменению. В большинстве случаев первая величина гораздо меньше второй и эффективность высокая. В некоторых случаях возможно равенство этих величин (например, в окрестностях экстремальных точек), тогда метод все равно применим, но снижение методической неопределенности не будет происходить.

Теоретически обоснована и подтверждена на примерах более высокая точность метода по сравнению с традиционными подходами.

Главным положительным моментом метода является возможность представления сложных спектральных распределений двумя интегральными величинами — уровнем потока излучения и его спектральной координатой, что открывает новые возможности для метрологического обеспечения широкого спектра оптико-электронных систем в промышленности, науке и экологии.

Литература

1. Григорьев А.В., Демин А.В., Сечак Е.Н. Многоспектральная оптико-электронная система // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25. № 1. С. 1–8. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2025-25-1-1-8>
2. Manakov A. Evaluation of computational radiometric and spectral sensor calibration techniques // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9896. P. 98960O. <https://doi.org/10.1117/12.2228071>
3. Pospelov G.V., Savin S.V. Optimization of the operating spectral band of optoelectronic devices for detecting point objects against the background of outer space // *Journal of Optical Technology*. 2018. V. 85. N 7. P. 416–418. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000416>
4. Vasil'ev V.N., Gridin A.S., Dmitriev I.Yu., Sinel'shchikov V.V., Tomeev K.A. Device for the functional monitoring of the through path of a scanning optoelectronic device with a large-format multi-element radiation detector // *Journal of Optical Technology*. 2019. V. 86. N 8. P. 466–470. <https://doi.org/10.1364/jot.86.000466>
5. Eckart M., Adams J., Boyce K., Brown G., Chiao M., Fujimoto R., et al. Ground calibration of the Astro-H (Hitomi) soft x-ray spectrometer // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9905. P. 99053W. <https://doi.org/10.1117/12.2233053>
6. Кукушкин Д.Е., Сазоненко Д.А., Бахолдин А.В., Красавцев В.М. Моделирование спектральных систем. Часть первая. СПб: Университет ИТМО, 2021. С. 5.
7. Горбунов Г.Г., Демин А.В., Никифоров В.О., Савицкий А.М., Скворцов Ю.С., Соколовский М.Н., Трегуб В.П. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. № 10. С. 75–82.
8. Гектин Ю.М., Зорин С.М., Трофимов Д.О. Способ измерения спектральных характеристик в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах и установка, реализующая этот способ. Патент RU 2710382C1. Опубликовано: 26.12.2019 Бюл. № 36.
9. Feng F., Huo D., Zhang Z., Lou Y., Wang S., Gu Z., et al. Symbiotic evolution of photonics and artificial intelligence: a comprehensive review // *Advanced Photonics*. 2025. V. 7. N 2. P. 024001. <https://doi.org/10.1117/1.ap.7.2.024001>
10. Markushin G.N., Korotaev V.V., Koshelev A.V., Samokhina I.A., Vasilev A.S., Timofeev A.N., Vasileva A.V., Yaryshev S.N. Dual-band

References

1. Grigoriev A.V., Demin A.V., Sechak E.N. Multispectral optoelectronic system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 1–8. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2025-25-1-1-8>
2. Manakov A. Evaluation of computational radiometric and spectral sensor calibration techniques. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9896, pp. 98960O. <https://doi.org/10.1117/12.2228071>
3. Pospelov G.V., Savin S.V. Optimization of the operating spectral band of optoelectronic devices for detecting point objects against the background of outer space. *Journal of Optical Technology*, 2018, vol. 85, no. 7, pp. 416–418. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000416>
4. Vasil'ev V.N., Gridin A.S., Dmitriev I.Yu., Sinel'shchikov V.V., Tomeev K.A. Device for the functional monitoring of the through path of a scanning optoelectronic device with a large-format multi-element radiation detector. *Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, no. 8, pp. 466–470. <https://doi.org/10.1364/jot.86.000466>
5. Eckart M., Adams J., Boyce K., Brown G., Chiao M., Fujimoto R., et al. Ground calibration of the Astro-H (Hitomi) soft x-ray spectrometer. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9905, pp. 99053W. <https://doi.org/10.1117/12.2233053>
6. Kukushkin D.E., Sazonenko D.A., Bakholdin A.V., Krasavtsev V.M. *Spectral Systems Modelling*. Part I. St. Petersburg, ITMO University, 2021, pp. 5. (in Russian)
7. Gorbunov G.G., Demin A.V., Nikiforov V.O., Savitskii A.M., Skvortsov Y.S., Sokol'skii M.N., Tregub V.P. Hyperspectral apparatus for remote probing of the earth. *Journal of Optical Technology*, 2009, vol. 76, no. 10, pp. 651–656. <https://doi.org/10.1364/JOT.76.000651>
8. Gektin Y.M., Zorin S.M., Trofimov D.O. Method of measuring spectral characteristics in the visible and infrared spectral ranges and an apparatus which realizes said method. Patent RU 2710382C1, 2019. (in Russian)
9. Feng F., Huo D., Zhang Z., Lou Y., Wang S., Gu Z., et al. Symbiotic evolution of photonics and artificial intelligence: a comprehensive review. *Advanced Photonics*, 2025, vol. 7, no. 2, pp. 024001. <https://doi.org/10.1117/1.ap.7.2.024001>
10. Markushin G.N., Korotaev V.V., Koshelev A.V., Samokhina I.A., Vasilev A.S., Timofeev A.N., Vasileva A.V., Yaryshev S.N. Dual-band

- optoelectronic poaching detection systems // *Journal of Optical Technology*, 2022, V. 89, N 9, P. 528–536. <https://doi.org/10.1364/jot.89.000528>
11. Iureva R.A., Timko A.S., Maltseva N.K., Raskin E.O., Chernaya A.S. Optoelectronic methods and tools for pipeline's internal surface diagnosis // *Proceedings of SPIE*, 2018, V. 10690, P. 106901R. <https://doi.org/10.1117/12.2306567>
 12. Sun Y., Liang R. High-resolution, Full-freedom spectral tunable light source for skin discrimination // *Proc. of the 14th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication*, 2024.
 13. Osipov V.M., Borisova N.F. Taking absorbed infrared radiation into account during the testing and certification of optoelectronic equipment // *Journal of Optical Technology*, 2019, V. 86, N 8, P. 471–475. <https://doi.org/10.1364/jot.86.000471>
 14. Ильинский А.В., Мальцева Н.К. Метод многоспектральной имитации излучения точечных объектов // *Оптический журнал*, 2010, Т. 77, № 2, С. 74–78.
 15. Maltseva N.K., Ilinskii A.V. Providing the uniform field of illumination in wide spectral and dynamic ranges // *Proceedings of SPIE*, 2020, V. 11483, P. 114830B. <https://doi.org/10.1117/12.2575618>
 16. Butler J.J., Brown S.W., Saunders R.D., Johnson B.C., Biggar S.F., Zalewski E.F., et al. Radiometric measurement comparison on the integrating sphere source used to calibrate the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and the Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2003, V. 108, N 3, P. 199–228. <https://doi.org/10.6028/jres.108.020>
 17. Scharpf D., Holt J., Durell C.N., Mascia P., Dann M., Dobrowski L., Rabade S. A new solar spectrum source for absolute radiometric calibration of advanced multispectral sensors and hyperspectral imagers // *Proceedings of SPIE*, 2024, V. 13143, P. 1314307. <https://doi.org/10.1117/12.3026762>
 18. Scheiding S., Driescher H., Walter I., Hanbuch K., Paul M., Hartmann M., Scheiding M. Compact blackbody calibration sources for in-flight calibration of spaceborne infrared instruments // *Proceedings of SPIE*, 2017, V. 10563, P. 105635P. <https://doi.org/10.1117/12.2304132>
 19. Трофимов Д.О., Гектин Ю.М., Зорин С.М., Зайцев А.А. Метрологические и методические аспекты спектрально-энергетических калибровок оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2018, Т. 5, № 2, С. 26–33. <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2018.5.2.26.33>
 20. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 1. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. С. 224–225.
 21. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. СПб: Лань, 2022. С. 258–264.
 22. Носенко Т.Н., Ситникова В.Е., Стрельникова И.Е., Фокина М.И. Практикум по колебательной спектроскопии: учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2021. С. 16.
 - optoelectronic poaching detection systems. *Journal of Optical Technology*, 2022, vol. 89, no. 9, pp. 528–536. <https://doi.org/10.1364/jot.89.000528>
 11. Iureva R.A., Timko A.S., Maltseva N.K., Raskin E.O., Chernaya A.S. Optoelectronic methods and tools for pipeline's internal surface diagnosis. *Proceedings of SPIE*, 2018, vol. 10690, pp. 106901R. <https://doi.org/10.1117/12.2306567>
 12. Sun Y., Liang R. High-resolution, Full-freedom spectral tunable light source for skin discrimination. *Proc. of the 14th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication*, 2024.
 13. Osipov V.M., Borisova N.F. Taking absorbed infrared radiation into account during the testing and certification of optoelectronic equipment. *Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, no. 8, pp. 471–475. <https://doi.org/10.1364/jot.86.000471>
 14. Ilinskii A.V., Mal'tseva N.K. Method of multispectral simulation of the radiation of point objects. *Journal of Optical Technology*, 2010, vol. 77, no. 2, pp. 137–140. <https://doi.org/10.1364/jot.77.000137>
 15. Maltseva N.K., Ilinskii A.V. Providing the uniform field of illumination in wide spectral and dynamic ranges. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11483, pp. 114830B. <https://doi.org/10.1117/12.2575618>
 16. Butler J.J., Brown S.W., Saunders R.D., Johnson B.C., Biggar S.F., Zalewski E.F., et al. Radiometric measurement comparison on the integrating sphere source used to calibrate the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and the Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+). *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2003, vol. 108, no. 3, pp. 199–228. <https://doi.org/10.6028/jres.108.020>
 17. Scharpf D., Holt J., Durell C.N., Mascia P., Dann M., Dobrowski L., Rabade S. A new solar spectrum source for absolute radiometric calibration of advanced multispectral sensors and hyperspectral imagers. *Proceedings of SPIE*, 2024, vol. 13143, pp. 1314307. <https://doi.org/10.1117/12.3026762>
 18. Scheiding S., Driescher H., Walter I., Hanbuch K., Paul M., Hartmann M., Scheiding M. Compact blackbody calibration sources for in-flight calibration of spaceborne infrared instruments. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10563, pp. 105635P. <https://doi.org/10.1117/12.2304132>
 19. Trofimov D.O., Gektin Yu.M., Zorin S.M., Zaitsev A.A. Metrological and methodical aspects of spectral-energetic calibrations of optoelectronic ERS equipment. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 26–33. (in Russian). <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2018.5.2.26.33>
 20. Smirnov V.I. *High Mathematics Course*. Vol. 1. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniko-teoreticheskoy literatury, 1954, pp. 224–225. (in Russian)
 21. Miroshnikov M.M. *Optical-Electronic Devices. Theoretical Aspects*. St. Petersburg, Lanbook, 2022, pp. 258–264. (in Russian)
 22. Nosenko T.N., Sitnikova V.E., Strel'nikova I.E., Fokina M.I. *Practicum on Vibrational Spectroscopy*. St. Petersburg, ITMO University, 2021, pp. 16. (in Russian)

Авторы

Ильинский Александр Владимирович — заместитель директора научно-образовательного центра «Музей истории Университета ИТМО», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0005-6413-6411>, avilinskii@itmo.ru
Мальцева Надежда Константиновна — кандидат технических наук, директор научно-образовательного центра «Музей истории Университета ИТМО», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0004-4515-0261>, nkmaltceva@itmo.ru
Раскин Евгений Олегович — директор по молодежной политике, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7830-6841>, raskin@itmo.ru

Authors

Alexander V. Ilinskii — Vice-Director, Scientific Educational Center “ITMO University History Museum”, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0005-6413-6411>, avilinskii@itmo.ru
Nadezhda K. Maltseva — PhD, Director, Scientific Educational Center “ITMO University History Museum”, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0004-4515-0261>, nkmaltceva@itmo.ru
Eugene O. Raskin — Director for Youth Policy, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7830-6841>, raskin@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 25.07.2025
 Одобрена после рецензирования 10.10.2025
 Принята к печати 25.11.2025

Received 25.07.2025
 Approved after reviewing 10.10.2025
 Accepted 25.11.2025



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»