

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-11-79-89

УДК 535.8

Пространственно-спектральная коррекция акустооптического видеоспектрометра

Милана Олеговна Шарикова^{1✉}, Иван Алексеевич Баландин²,
Владислав Игоревич Батшев³, Алексей Борисович Козлов⁴

^{1, 2, 3, 4}Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁴Научно-исследовательский институт «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, Россия

¹sharikova.mo@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>

²balandin.ia@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-2120-0186>

³batshev.vi@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

⁴kozlov@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-5378-2064>

Аннотация

Предмет исследования. Пространственно-спектральные искажения, возникающие при акустооптической дифракции, которые необходимо учитывать при построении оптической системы и калибровке акустооптического прибора. **Цель работы.** Пространственно-спектральная коррекция видеоспектрометров на основе акустооптических перестраиваемых фильтров, разработка методики выравнивания коэффициента пропускания во всем рабочем спектральном диапазоне. **Метод.** Для получения неискаженных данных требуется корректировать как спектральные, так и пространственные неоднородности. Процедура калибровки состояла из аппаратной настройки акустооптического прибора и программно-математической коррекции. Управление функцией пропускания фильтра осуществляется двумя параметрами: частотой и мощностью ультразвука, которые в свою очередь определяются частотой и эффективной амплитудой электрического сигнала. Частота определяет положение функции пропускания, т.е. длину волны работы акустооптического фильтра. Амплитуда задает мощность ультразвука, которая определяет интенсивность прошедшего через фильтр излучения. Полный учет неравномерности коэффициента пропускания во всем спектральном диапазоне достигается постобработкой. **Основные результаты.** Предложена методика выравнивания мощности излучения за счет изменения подаваемой мощности ультразвука. Разработанное программное обеспечение позволяет минимизировать искажения, вносимые акустооптическими фильтрами, с целью визуальной оценки информации. Методика апробирована на видеоспектрометре ближнего инфракрасного диапазона с двойной акустооптической фильтрацией. **Практическая значимость.** Представленный метод дает возможность проводить аппаратную калибровку гиперспектральных устройств на основе акустооптических фильтров, а также осуществлять программную коррекцию отображаемых результатов в реальном времени. Разработанный метод универсален и подходит и для других видеоспектрометров на основе акустооптической фильтрации. Он позволит поднять акустооптические методы на более высокий уровень как в надежности полученных данных, так и в удобстве использования таких приборов.

Ключевые слова: акустооптика, акустооптический фильтр, акустооптический видеоспектрометр, гиперспектральная визуализация, пространственно-спектральная калибровка

Благодарность: работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НТЦ УП РАН.

Ссылка для цитирования: Шарикова М.О., Баландин И.А., Батшев В.И., Козлов А.Б. Пространственно-спектральная коррекция акустооптического видеоспектрометра // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 79–89. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-79-89>

Код OCIS: 230.1040

Spatial and spectral correction of acousto-optical videospectrometer

MILANA O. SHARIKOVA¹✉, IVAN A. BALANDIN²,
VLADISLAV I. BATSHEV³, ALEXEY B. KOZLOV⁴

^{1, 2, 3, 4}Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁴Stelmakh Polyus Research Institute, Moscow, Russia

¹sharikova.mo@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>

²balandin.ia@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-2120-0186>

³batshev.vi@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

⁴kozlov@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-5378-2064>

Abstract

Subject of study. Spatial-spectral distortions arising from acousto-optic diffraction, which must be taken into account when constructing an optical system and calibrating an acousto-optical device.

Aim of study. Spatial and spectral calibration of videospectrometers based on acousto-optical tunable filters. Technique for equalizing the transmittance of the acousto-optical tunable filter in the entire working spectral range. **Method.** To obtain undistorted data, it is necessary to correct both spectral and spatial inhomogeneities. The calibration procedure consisted of hardware spectral tuning of the acousto-optical device and software-mathematical correction. The transmission function of the acousto-optical tunable filter is controlled by two parameters: frequency and power of ultrasound, which in turn are determined by the frequency and effective amplitude of the electrical signal. The frequency determines the position of the transmission function, that is, the wavelength of the acousto-optical tunable filter. The amplitude sets the ultrasound power, which determines the intensity of the radiation passed through the acousto-optical tunable filter. Full consideration of the non-uniformity of the transmission coefficient in the entire spectral range is achieved by post-processing. **Main results.** A technique for leveling the radiation power by changing the supplied ultrasound power is proposed. The developed software makes it possible to minimize the distortions introduced by acousto-optical tunable filters in order to visually evaluate information. The technique was tested on a near-infrared videospectrometer with double acousto-optic filtering. **Practical significance.** The presented method makes it possible to carry out hardware calibration of hyperspectral devices based on acousto-optical tunable filters, as well as to implement software correction of the displayed results in real time. The developed method is universal and suitable for other videospectrometers based on acousto-optic filtering. It will allow raising acousto-optic methods to a higher level both in the reliability of the data obtained and in the convenience of using such devices.

Keywords: acousto-optics, acousto-optical tunable filter, acousto-optical videospectrometer, hyperspectral imaging, spatial and spectral calibration

Acknowledgment: the work was carried out within the framework of the State Assignment of the STC UP RAS (project FFNS-2022-0010). The results were obtained using the equipment of the Center for Collective Use of the STC UP RAS.

For citation: Sharikova M.O., Balandin I.A., Batshev V.I., Kozlov A.B. Spatial and spectral correction of acousto-optical videospectrometer [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 11. P. 79–89. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-79-89>

OCIS code: 230.1040

ВВЕДЕНИЕ

Видеоспектрометрия, или гиперспектральная визуализация, является мощным неинвазивным методом для решения задач контрастного выделения объектов, обладающих определенными физико-химическими свойствами. Видеоспектрометры — это оптико-электронные приборы для регистрации куба пространственно-спектральных данных, что дает возможность проводить спектральные и пространственные измерения в различных областях применения: дистанционное зондирование [1], биомедицинская диагностика [2], неразрушающий контроль и др. [3, 4].

Гиперспектральная визуализация реализуется разными видами сканирования — по пространству и/или по спектру [5]. Акустооптические фильтры (АОФ) обеспечивают спектральную перестройку. Благодаря тому, что данные спектральные элементы являются полностью программно-управляемыми — без механического сканирования, в акустооптических (АО) видеоспектрометрах есть возможность выборочно регистрировать изображения лишь в интересующих интервалах длин волн. Это позволяет увеличить скорость сбора данных и уменьшить их объем. По этим и другим причинам АО устройства получают все большее распространение.

Пользователю таких приборов важна точность полученной с его помощью информации. И важной процедурой, определяющей точность, является калибровка или коррекция в зависимости от задачи. Ранее были реализованы различные методы калибровок и коррекций АО приборов: метод коррекции спектральных искажений [6], геометрическая [7], пространственно-спектральная [8], радиометрическая калибровки [9, 10] и др. [11–13]. Но все эти методы используются уже в постобработке. Задача настоящей работы — минимизирование искажений, вносимых АО прибором, с целью визуальной оценки информации в реальном времени. Для этого разработана методика калибровки, которая проводится один раз сразу после изготовления прибора, по результатам которой выполняется программная коррекция всех отображаемых результатов: корректируется значение интенсивности в каждом пикселе изображения на каждой длине волны.

Таким образом, целью работы, результаты которой изложены в статье, являлись пространственно-спектральная коррекция видеоспектрометров на основе АО перестраиваемых фильтров и разработка методики выравнивания коэффициента пропускания АОФ во всем рабочем спектральном диапазоне.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Принцип действия АОФ основан на брэгговской дифракции света на динамической звуковой решетке [14, 15]. Управление фильтрацией излучения осуществляется изменением частоты и мощности ультразвука. Преимуществами таких фильтров являются высокое быстродействие, достаточно широкий спектральный диапазон, высокое пространственное и спектральное разрешение, малые масса и габарит. Но при построении оптической схемы и калибровке прибора необходимо учитывать пространственно-спектральные искажения, возникающие при АО дифракции.

Описанная ниже процедура коррекции разработана для калибровки видеоспектрометра ближнего инфракрасного (ИК) диапазона с двойной АО фильтрацией с параллельным ходом лучей через АОФ [16]. В нашем случае поле зрения АОФ не превышает его «квазимонохроматическую» угловую апертуру ($2\text{--}4^\circ$), а оптическая схема рассчитана таким образом, чтобы аберрации были минимизированы [17]. Первое обеспечивает монохроматичность изображения, так как исключает наличие спектральных неоднородностей по полю, а второе сводит пространственные искажения, связанные с оптическими аберрациями, к минимуму.

В случае, если спектральное устройство имеет угловое поле АОФ, превышающее размер его классической («квазимонохроматической») угловой апертуры, то в процедуру калибровки необходимо включить метод коррекции пространственно-спектральной неоднородности пропускания АОФ, описанный в работе [18].

Разработанная методика применена к прибору [19], работающему в ближнем ИК диапазоне (850–1600 нм) и формирующему изображение далеко расположенных объектов в пределах углового поля 15° с пространствен-

ным разрешением около 200×150 элементов. Акустооптический фильтр данного видеоспектрометра состоит из двух идентичных АО ячеек (АОЯ), однако из-за их конструктивных особенностей они имеют различные перестроенные характеристики. Поэтому используется двухканальный синтезатор-усилитель, который через программное обеспечение (ПО) получает команды из файла управления. В данном файле сопоставлены значения требуемой длины волны λ , подаваемых на АОЯ частот f_1 , f_2 и эффективных амплитуд A_1 , A_2 электрического сигнала, которые задают мощности акустических сигналов P_1 , P_2 . Такой файл формируется индивидуально для каждой АОЯ.

Спектральные изображения формируются на матричном приемнике излучения. В качестве

приемника используется охлаждаемый сенсор *Sony IMX 990-AABA-C*, входящий в состав видеокамеры *SWIR1300KMA* фирмы *ToupTek*.

Представленная ниже методика калибровки универсальна и может применяться для любых АО видеоспектрометров, обладающих различными техническими характеристиками.

Основными факторами пространственно-спектральных искажений являются

1) несовпадение расчетной перестроенной характеристики $\lambda(f)$ с реальной, а также различие этих зависимостей для двух используемых АОЯ,

2) спектральная неоднородность коэффициента АО дифракции, под которым понимается количество энергии в пучке, вышедшем из АОФ, по отношению к падающему,

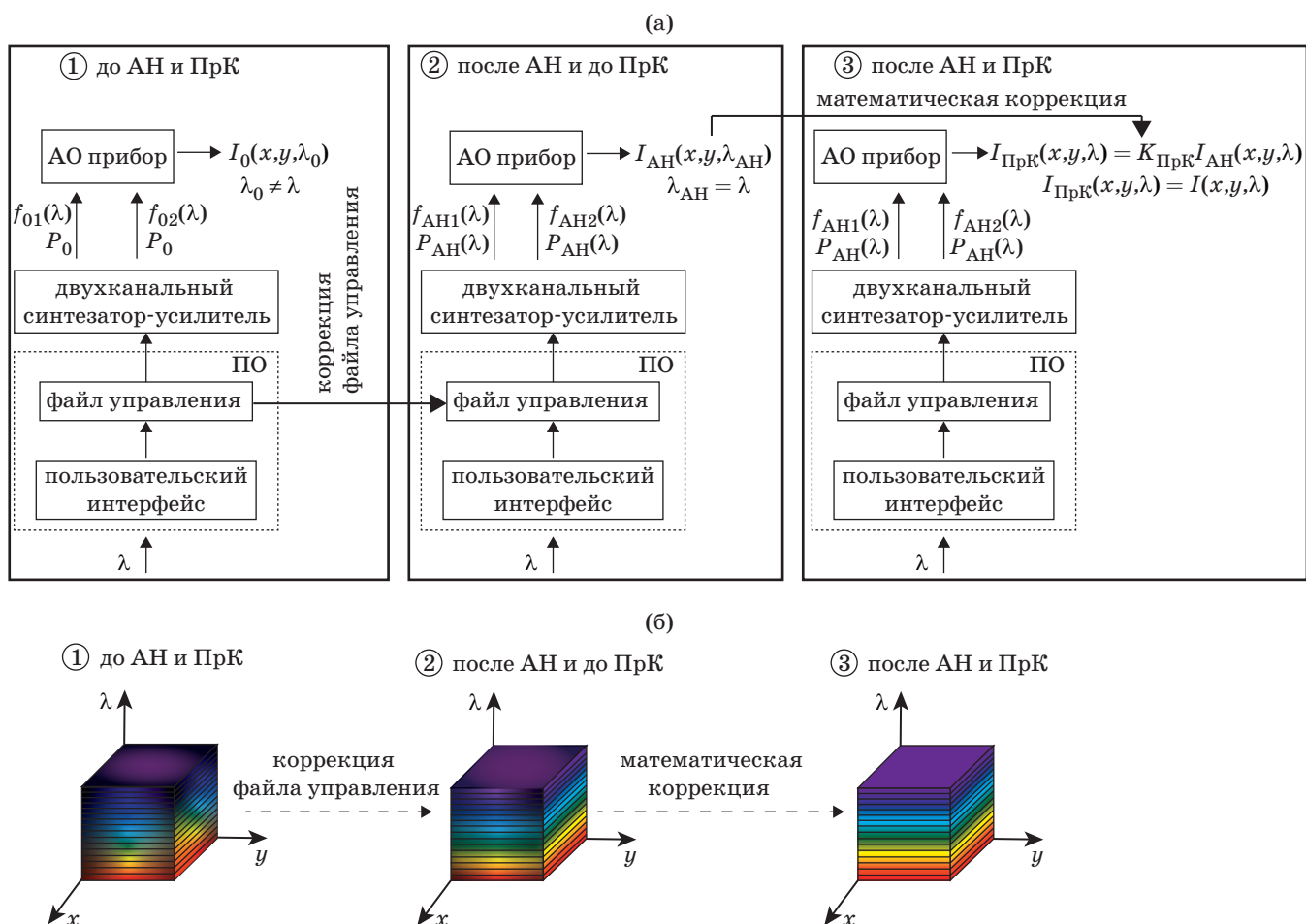


Рис. 1. Этапы пространственно-спектральной коррекции (а). АН — аппаратная настройка, ПрК — программная коррекция, ПО — программное обеспечение. Демонстрация преобразования гиперспектрального куба данных в результате комплексной коррекции (б)

Fig. 1. (a) Stages of spatial-spectral correction. АН is hardware customization, ПрК is software correction, ПО is software. (б) Demonstration of the transformation of the hyperspectral data cube as a result of complex correction

3) нелинейная зависимость коэффициента АО дифракции от подаваемой мощности ультразвука,

4) пространственная неоднородность коэффициента пропускания оптической системы,

5) спектральная чувствительность приемника излучения.

Перечисленные факторы учтены в методике. На рис. 1а приведен алгоритм пространственно-спектральной коррекции данных, который более подробно будет описан далее. Он состоит из аппаратной настройки (АН) АО прибора и последующей программной коррекции (ПрК) данных.

Изначально пользователь, задавая требуемые длины волн в ПО АО видеоспектрометра, получает изображения, соответствующие близким, но не истинным длинам волн $\lambda_0 \neq \lambda$ (из-за обозначенных выше факторов 1 и 3), и с неинформативными интенсивностями в каждом пикселе $I_0(x, y, \lambda_0)$ (из-за факторов 2, 4, 5), т.е. в каждом пикселе получается некорректная спектральная информация об объекте. Это происходит в первую очередь из-за некорректного файла управления. Этап коррекции файла в данной методике называется АН (НС), результатом ее работы является то, что выделяемая длина волны $\lambda_{НС}$ становится равной требуемой λ , а интенсивности в каждом пикселе изображения $I_{НС}(x, y, \lambda_{НС})$ становятся близкими к корректным $I(x, y, \lambda)$. Затем на этапе ПрК (SC) осуществляется математическая коррекция пространственно-спектральных данных, полученных после АН. В результате работы АО видеоспектрометра пользователь получает верные пространственно-спектральные данные $I_{SC}(x, y, \lambda) = I_0(x, y, \lambda_0)$. На рис. 1б представлено графическое представление описанных этапов коррекции на примере гиперспектральных кубов.

ПРОСТРАНСТВЕННО-СПЕКТРАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ

Для получения неискаженных данных требуется корректировать как спектральные, так и пространственные неоднородности.

Основными параметрами для управления функцией пропускания АОФ являются частота и мощность ультразвука, которые в свою очередь определяются акустической частотой f

и эффективной амплитудой A электрического сигнала соответственно. Частота ультразвука определяет положение функции пропускания, т.е. длину волны работы АОФ $\lambda(f)$. Амплитуда задает мощность ультразвука $P(A)$, которая определяет интенсивность дифрагированного излучения $I(A)$. В случае двойного АОФ количество параметров f и A увеличивается в 2 раза, так как в фильтрации участвуют две АОЯ.

Эти параметры записаны в файле управления. Каждой длине волны соответствуют частота f_1 и амплитуда A_1 , относящиеся к первой АОЯ, и частота f_2 и амплитуда A_2 , относящиеся ко второй. Для удобства $A_1 = A_2$. Определение корректных параметров файла управления происходит на этапе АН.

Аппаратная настройка

Первым шагом в АН прибора является процедура совмещения окон пропускания обеих АОЯ (рис. 2). Для этого был разработан двухканальный синтезатор-усилитель высокочастотного сигнала с возможностью задания разных частот ультразвука в разных каналах f_1 и f_2 . На рис. 2а представлены окна пропускания АОЯ до выполнения АН, а рис. 2б демонстрирует результат корректного совмещения окон пропускания, что дает наибольшую интенсивность и конкретную длину волны оптического сигнала при двойной АО фильтрации.

Данная процедура синхронизации перестроенных характеристик двух АОЯ $\lambda(f_{НС})$ проводилась на калибровочном стенде, в котором в качестве источника использован перестраиваемый монохроматор *Solar M266* на основе плазмы, а приемного устройства — спектрометр *Ocean Insight FLAMENIR* (рис. 2в, г).

На первом шаге АН в файл управления записываются верные акустические частоты $f_{НС1}$ и $f_{НС2}$, подаваемые на двойной АОФ.

Одна из главных задач коррекции — выравнивание коэффициента пропускания АОФ во всем рабочем спектральном диапазоне (850–1600 нм), так как обычно АОФ имеет неравномерную спектральную характеристику пропускания $\tau(\lambda)$. Функция пропускания АОФ зависит от подаваемой акустической мощности, которую задает эффективная амплитуда $P(A)$ (рис. 3а). Данный этап АН заключается в получении зависимостей $I(A)$ на разных длинах волн и определении значений A_{\max} (рис. 3б). Далее измеряется спектральная

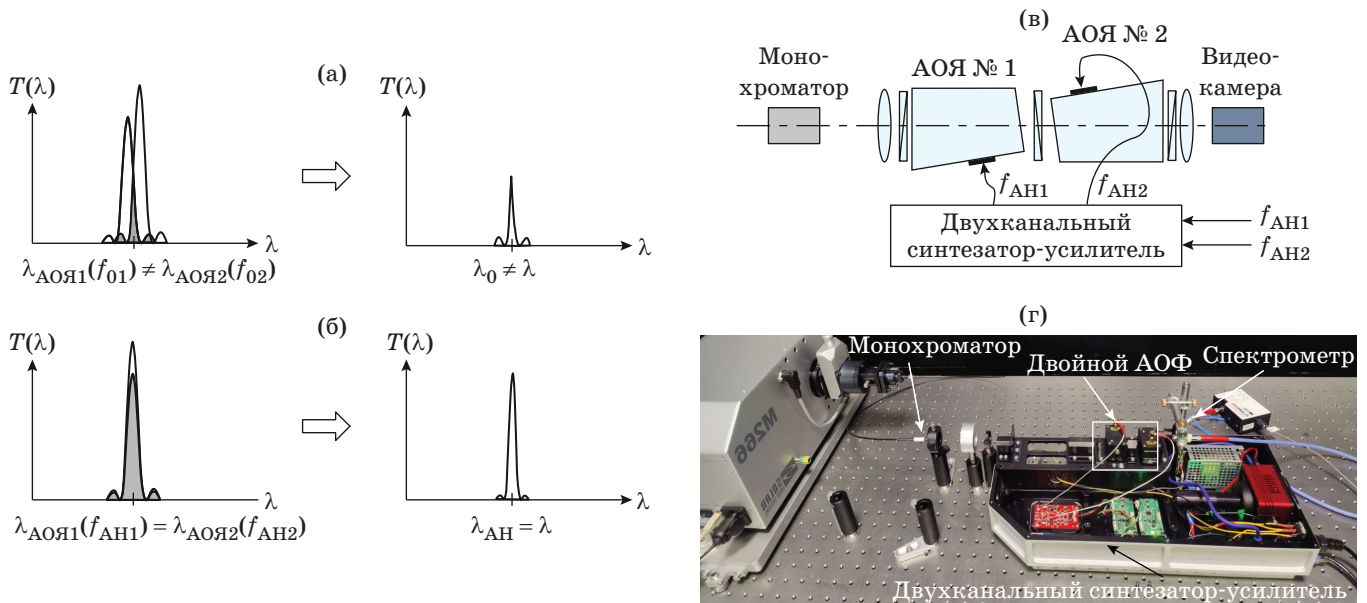


Рис. 2. Процедура синхронизации перестроочных характеристик двух АОЯ $\lambda(f_{\text{АН}})$. Результаты неправильного (а) и правильного (б) совмещения окон пропускания двух разных АОФ. Схема (в) и фото (г) калибровочного стенда

Fig. 2. Procedure for synchronization of tuning characteristics of two acousto-optical cells $\lambda(f_{\text{АН}})$. Results of (a) incorrect and (b) correct matching of transmission windows of two different acousto-optical tunable filters. (v) Scheme and (g) photo of the calibration stand. АН — hardware customization, АОЯ — acousto-optical cell

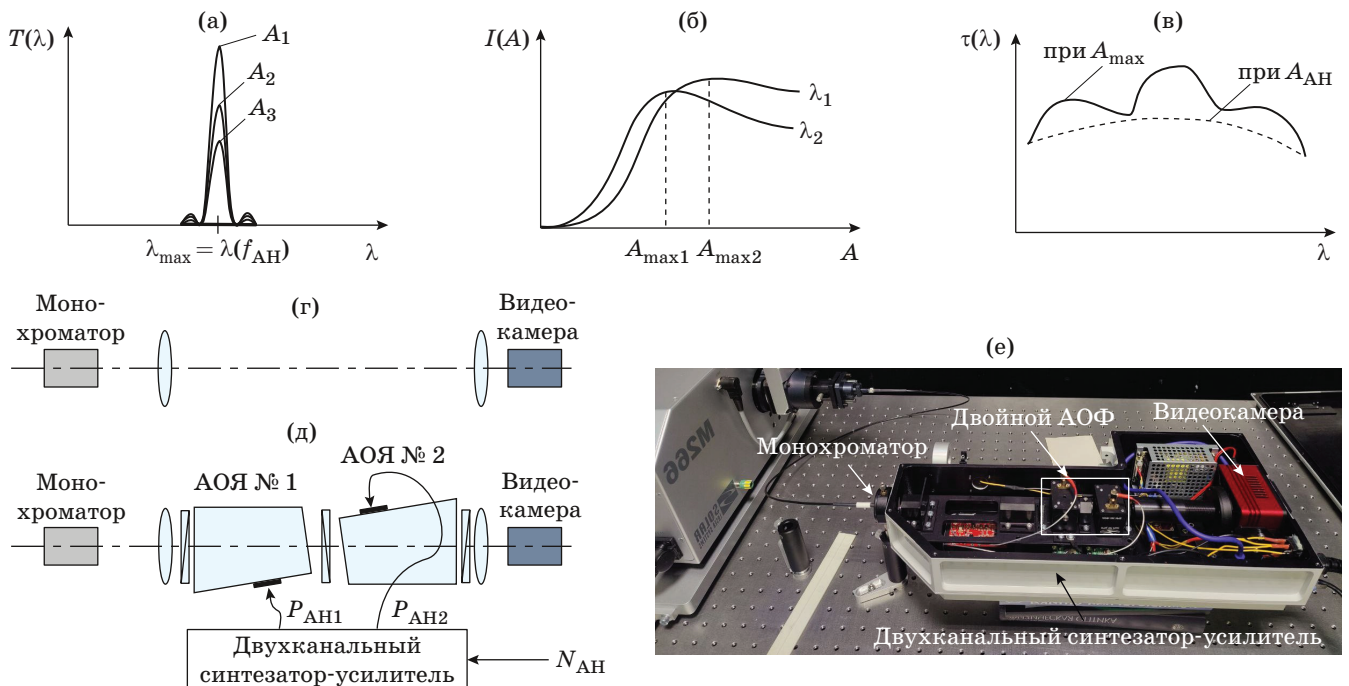


Рис. 3. Алгоритм АН для выравнивания спектральной характеристики пропускания АО фильтрации (а), (б), (в). Для определения $\tau(\lambda)$ (в) использовались две схемы получения изображений: с двойным АО фильтром (д) и без него (г). Фото калибровочного стенда второго этапа АН (е)

Fig. 3. (a) (б), (в) Hardware customization algorithm for leveling the spectral transmission characteristic of acousto-optical filtering. To determine $\tau(\lambda)$ (в) two imaging schemes were used: (д) with a double acousto-optical tunable filter and (г) without it. (е) Photo of the calibration stand of the second stage of hardware customization. АОФ is acousto-optical tunable filter

характеристика пропускания АОФ во всем рабочем диапазоне $\tau(\lambda)$, построенная при $A = A_{\max}$ (рис. 3в),

$$\tau(\lambda, A_{\max}) = \frac{I_{w/o \text{ АОФ}}(\lambda, A_{\max})}{I_{w/o \text{ АОФ}}(\lambda)},$$

где $I_{w/o \text{ АОФ}}(\lambda)$ — спектр источника, полученный в схеме без двойного АОФ (рис. 3г), $I_{w/o \text{ АОФ}}(\lambda)$ — спектр, полученный посредством АО видеоспектрометра, частью которого является двойной АОФ (рис. 3д). Таким образом, по приведенной формуле измеряется именно коэффициент пропускания АОФ, а другие факторы, например, спектральная чувствительность приемника излучения, не учитываются. Затем коэффициент пропускания АОФ выравнивается путем подбора значений $A \rightarrow A_{\text{НС}}$ (рис. 3в).

На данном этапе АН в качестве приемника использовалась видеокамера АО видеоспектрометра. Упрощенная схема и фотография прибора в открытом виде представлены на рис. 3д, е. При съемке по схеме без АО фильтрации (рис. 3г) вынимался только двойной АОФ, а все остальные элементы оставались на месте.

Таким образом, выполнено аппаратное выравнивание коэффициента пропускания, которое является заключительным шагом АН.

В результате действий, описанных в данном разделе, достигнута цель АН — создан файл управления, при использовании которого в ПО выделяемая длина волны $\lambda_{\text{НС}}$ становится равной λ , а интенсивности в каждом пикселе изображения $I_{\text{НС}}(x, y, \lambda_{\text{НС}})$ становятся близкими к корректным $I(x, y, \lambda)$.

Программная коррекция

Компенсация пространственных неоднородностей коэффициента передачи оптического тракта осуществлялась путем получения изображения равномерно освещенного объекта $I_{\text{sph}}(x, y)$. В качестве такого объекта служило выходное окно интегрирующей сферы, облученной галогенными источниками (рис. 4).

Вычислены корректировочные пространственные коэффициенты K_{pr} для каждого пиксела по формуле

$$K_{\text{pr}}(x, y) = \frac{\max(I_{\text{sph}}(x, y))}{I_{\text{sph}}(x, y)}.$$

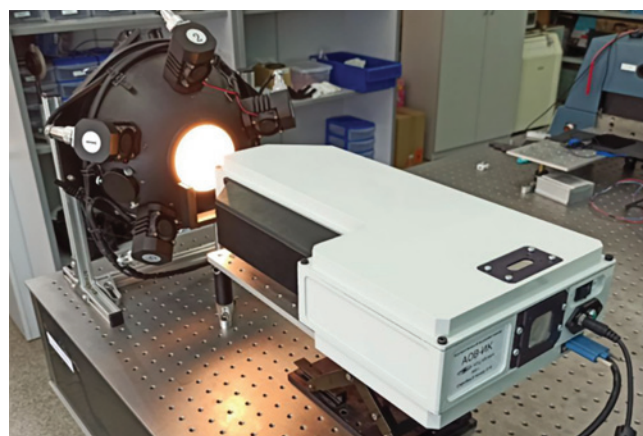


Рис. 4. Пространственная коррекция по полю с помощью интегрирующей сферы

Fig. 4. Spatial field correction using an integrating sphere

Параметры каждого изображения, получаемого АО видеоспектрометром, в реальном времени умножаются на полученную матрицу коэффициентов

$$I_{\text{pr}}(x, y, \lambda) = K_{\text{pr}}(x, y) I_{\text{НС}}(x, y, \lambda).$$

После выполнения всех описанных процедур результатом работы АО видеоспектрометра является регистрация пространственно-спектрального распределения интенсивности, содержащего информацию как об объекте, так и об облучающем его источнике (произведение спектров источника и объекта).

Поскольку прибор может использоваться с разными источниками излучения, то для определения спектра объекта в ПО предусмотрена возможность деления регистрируемого спектра на спектр источника.

Для этого в начале каждой серии экспериментов пользователю необходимо зарегистрировать изображения эталонного (равномерно рассеивающего во всем спектре) объекта $I_{\text{ref}}(x, y)$. В ПО вычисляются следующие спектральные коэффициенты:

$$K_{\text{sp}}(\lambda) = \frac{\max(I_{\text{ref}}(\lambda))}{I_{\text{ref}}(\lambda)},$$

после чего интенсивность исследуемого объекта вычисляется по формуле

$$I_{\text{SC}}(x, y, \lambda) = I_{\text{sp}}(x, y, \lambda) = K_{\text{sp}}(\lambda) I_{\text{pr}}(x, y, \lambda).$$

За счет такой «быстрой» постобработки происходят окончательное выравнивание коэффициента пропускания во всем спектральном диапазоне и учет спектра излучения источника.

Данная программно-математическая коррекция происходит в реальном времени и

пользователь сразу видит скорректированное изображение и спектр исследуемого объекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описанная процедура пространственно-спектральной коррекции апробирована на видео-

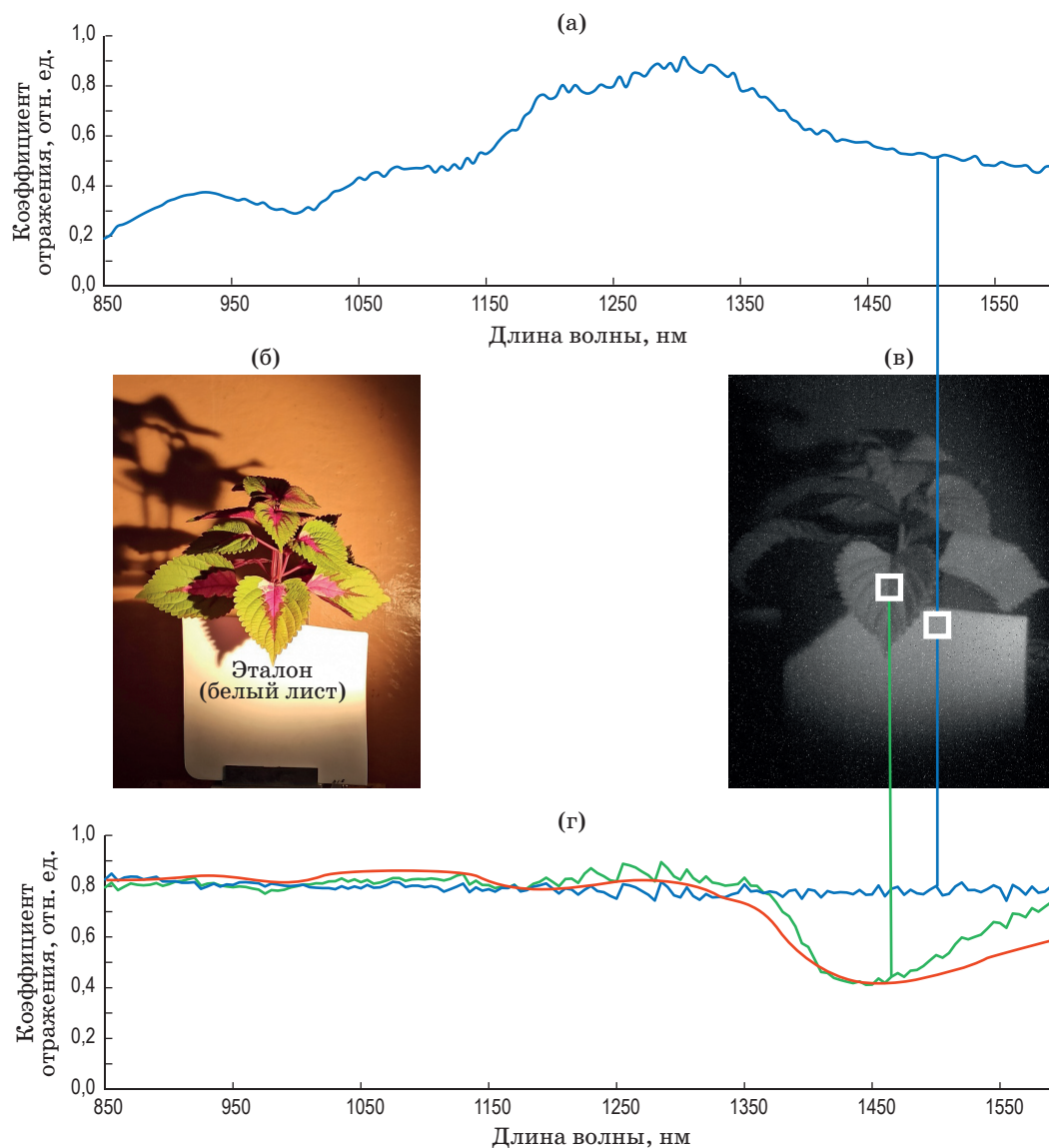


Рис. 5. Спектр эталона до калибровок (а), фотография исследуемого объекта с эталоном в кадре (б), один из кадров с АО видеоспектрометра с выделенными областями для анализа спектров (в), спектры интересующих областей после калибровок (г). Синие кривые — спектры эталонного объекта (листа белой бумаги) до коррекции (а) и после нее (г). Зеленая кривая — спектр исследуемого объекта. Красная кривая — справочный спектр растительности [1]

Fig. 5. (a) Spectrum of the standard (sheet of white paper) before calibrations, (б) photo of the object under study with the reference in the frame, (в) one of the frames from the acousto-optic videospectrometer with selected regions for spectrum analysis, (г) spectra of the regions of interest after calibrations. The blue curves are the spectra of the reference object (a) before and (г) after correction. The green curve is the spectrum of the object under study. The red curve is the reference spectrum of vegetation [1]

спектрометре ближнего ИК диапазона с двойной АО фильтрацией.

В ПО для управления АО видеоспектрометром были внесены данные, полученные при калибровке, после этого выполнено экспериментальное исследование АО прибора.

На рис. 5 приведены результаты эксперимента, демонстрирующие эффективность комплексной калибровки. Видно, что данная методика позволяет минимизировать искажения, вносимые прибором, с целью визуальной оценки информации. Из рис. 5 а, г видно, что спектр выровнялся, а, следовательно, спектр исследуемого объекта (рис. 5б, в) стал более информативным для первичной оценки. Это подтверждает совпадение экспериментальной кривой со справочной кривой спектра растительности [1].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hennessy A., Clarke K., Lewis M. Hyperspectral classification of plants: A review of waveband selection generalisability // *Remote Sens.* 2020. V. 12. № 1. P. 113. <https://doi.org/10.3390/rs12010113>
2. Carrasco O., Gomez R.B., Chainani A., et al. Hyperspectral imaging applied to medical diagnoses and food safety // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5097. P. 215–221. <https://doi.org/10.1117/12.502589>
3. Fischer C., Kakoulli I. Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: Current research and potential applications // *Stud. Conserv.* 2006. V. 51. P. 3–16. <https://doi.org/10.1179/sic.2006.51.Supplement-1.3>
4. Gowen A.A., O'Donnell C.P., Cullen P.J., et al. Hyperspectral imaging — an emerging process analytical tool for food quality and safety control // *Trends Food Sci. Technol.* 2007. V. 18. № 12. P. 590–598. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.06.001>
5. Li Q., He X., Wang Y., et al. Review of spectral imaging technology in biomedical engineering: Achievements and challenges // *J. Biomed. Opt.* 2013. V. 18. № 10. P. 100901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.10.100901>
6. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Метод коррекции спектральных искажений для спектрометра изображений // *Приборы и техника эксперимента.* 2009. № 6. С. 92–98
7. Spiclin Z., Katrasnik J., Bürmen M., et al. Geometric calibration of a hyperspectral imaging system // *Appl. Opt.* 2010. V. 49. № 15. P. 2813–2818. <https://doi.org/10.1364/AO.49.002813>
8. Мачихин А.С., Шурыгин А.В., Пожар В.Э. Пространственно-спектральная калибровка акустооптического спектрометра // *Приборы и техника эксперимента.* 2016. № 5. С. 70–76. <https://doi.org/10.7868/S003281621604025X>
9. Katrašnik J., Pernuš F., Likar B. Radiometric calibration and noise estimation of acousto-optic tunable filter hyperspectral imaging systems // *Appl. Opt.* 2013.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный метод дает возможность проводить аппаратную калибровку гиперспектральных устройств на основе АОФ, а также осуществлять программную коррекцию отображаемых результатов в реальном времени. Предложена методика выравнивания мощности излучения за счет изменения подаваемой мощности ультразвука. Разработанное ПО позволяет минимизировать искажения, вносимые АОФ, с целью визуальной оценки информации. Методика апробирована на видеоспектрометре ближнего ИК диапазона с двойной АО фильтрацией.

Разработанный метод универсален, подходит и для других видеоспектрометров на основе АО фильтрации. Он позволит повысить информативность АО методов и удобство использования таких АО приборов.

REFERENCES

1. Hennessy A., Clarke K., Lewis M. Hyperspectral classification of plants: A review of waveband selection generalisability // *Remote Sens.* 2020. V. 12. № 1. P. 113. <https://doi.org/10.3390/rs12010113>
2. Carrasco O., Gomez R.B., Chainani A., et al. Hyperspectral imaging applied to medical diagnoses and food safety // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5097. P. 215–221. <https://doi.org/10.1117/12.502589>
3. Fischer C., Kakoulli I. Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: Current research and potential applications // *Stud. Conserv.* 2006. V. 51. P. 3–16. <https://doi.org/10.1179/sic.2006.51.Supplement-1.3>
4. Gowen A.A., O'Donnell C.P., Cullen P.J., et al. Hyperspectral imaging — an emerging process analytical tool for food quality and safety control // *Trends Food Sci. Technol.* 2007. V. 18. № 12. P. 590–598. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.06.001>
5. Li Q., He X., Wang Y., et al. Review of spectral imaging technology in biomedical engineering: Achievements and challenges // *J. Biomed. Opt.* 2013. V. 18. № 10. P. 100901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.10.100901>
6. Machikhin A.S., Pozhar V.E. Spectral distortion correction method for image spectrometer [in Russian] // *Instruments and Experimental Technique.* 2009. № 6. P. 92–98.
7. Spiclin Z., Katrasnik J., Bürmen M., et al. Geometric calibration of a hyperspectral imaging system // *Appl. Opt.* 2010. V. 49. № 15. P. 2813–2818. <https://doi.org/10.1364/AO.49.002813>
8. Machikhin A.S., Shurygin A.V., Pozhar V.E. Spatial and spectral calibration of an acousto-optical spectrometer // *Instrum. Exp. Tech.* 2016. № 59. P. 692–697. <https://doi.org/10.1134/S0020441216040217>
9. Katrašnik J., Pernuš F., Likar B. Radiometric calibration and noise estimation of acousto-optic tunable filter hyperspectral imaging systems // *Appl. Opt.* 2013.

- V. 52. № 15. P. 3526–3537. <https://doi.org/10.1364/AO.52.003526>
10. Healey G.E., Kondepudy R. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation // *IEEE. Trans. Pattern. Anal.* 1994. V. 16. № 3. P. 267–276. <https://doi.org/10.1109/34.276126>
 11. Bürmen M., Pernuš F., Likar B. Spectral characterization of near-infrared acousto-optic tunable filter (AOTF) hyperspectral imaging systems using standard calibration materials // *Appl. Spectrosc.* 2011. V. 65. № 4. P. 393–401. <https://doi.org/10.1366/10-05987>
 12. Yu K., Guo Q., Zhao H., Cheng C. et al. The calibration methods of geometric parameters of crystal for mid-infrared acousto-optic tunable filter-based imaging systems design // *Materials.* 2023. V. 16. № 6. P. 2341. <https://doi.org/10.3390/ma16062341>
 13. Rui X., Zhiping H., Hu Z., et al. Calibration of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter (AOTF) // *Proc. SPIE.* 2012. V. 8527. P. 85270S. <https://doi.org/10.1117/12.977434>
 14. Goutzoulis A., Pape D.R., Kulakov S. Design and fabrication of acousto-optic devices. USA, Boca Raton, FL: CRC Press, 1994. 520 p.
 15. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И. и др. Теория и практика современной акустооптики. М.: МИСиС, 2015. 458 с.
 16. Batshev V., Machikhin A., Gorevoy A., et al. Spectral imaging experiments with various optical schemes based on the same AOTF // *Materials.* 2021. № 14. P. 2984. <https://doi.org/10.3390/ma14112984>
 17. Мачихин А.С., Батшев В.И., Пожар В.Э. и др. Минимизация аберраций акустооптического видеоспектрометра ближнего инфракрасного диапазона путём оптимизации параметров перестраиваемого фильтра // *Оптический журнал.* 2019. Т. 86. № 12. С. 59–64. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-12-59-64>
 18. Gorevoy A., Machikhin A., Martynov G., Pozhar V., et al. Computational technique for field-of-view expansion in AOTF-based imagers // *Opt. Lett.* 2022. V. 47. № 3. P. 585–588. <https://doi.org/10.1364/OL.438374>
 19. Баландин И.А., Шарикова М.О., Батшев В.И. и др. Видеоспектрометр ближнего инфракрасного диапазона с использованием двойного акустооптического фильтра // Тез. докл. XVII междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков» — ОМИП-2023. Москва, Россия. 26–30 июня 2023. С. 451–455.
 - V. 52. № 15. P. 3526–3537. <https://doi.org/10.1364/AO.52.003526>
 10. Healey G.E., Kondepudy R. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation // *IEEE. Trans. Pattern. Anal.* 1994. V. 16. № 3. P. 267–276. <https://doi.org/10.1109/34.276126>
 11. Bürmen M., Pernuš F., Likar B. Spectral characterization of near-infrared acousto-optic tunable filter (AOTF) hyperspectral imaging systems using standard calibration materials // *Appl. Spectrosc.* 2011. V. 65. № 4. P. 393–401. <https://doi.org/10.1366/10-05987>
 12. Yu K., Guo Q., Zhao H., et al. The calibration methods of geometric parameters of crystal for mid-infrared acousto-optic tunable filter-based imaging systems design // *Materials.* 2023. V. 16. № 6. P. 2341. <https://doi.org/10.3390/ma16062341>
 13. Rui X., Zhiping H., Hu Z., et al. Calibration of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter (AOTF) // *Proc. SPIE.* 2012. V. 8527. P. 85270S. <https://doi.org/10.1117/12.977434>
 14. Goutzoulis A., Pape D.R., Kulakov S. Design and fabrication of acousto-optic devices. USA, Boca Raton, FL: CRC Press, 1994. 520 p.
 15. Molchanov V.Ya., Kitaev Yu.I., Kolesnikov A.I., et al. Theory and practice of modern acousto-optics [in Russian]. Moscow: MISiS Publ., 2015. 458 p.
 16. Batshev V., Machikhin A., Gorevoy A., et al. Spectral imaging experiments with various optical schemes based on the same AOTF // *Materials.* 2021. № 14. P. 2984. <https://doi.org/10.3390/ma14112984>
 17. Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E., et al. Minimizing aberrations of a near-infrared acousto-optic video spectrometer by optimizing the tunable filter parameters // *J. Opt. Technol.* 2019. V. 86. P. 794–798. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000794>
 18. Gorevoy A., Machikhin A., Martynov G., et al. Computational technique for field-of-view expansion in AOTF-based imagers // *Opt. Lett.* 2022. V. 47. № 3. P. 585–588. <https://doi.org/10.1364/OL.438374>
 19. Balandin I.A., Sharikova M.O., Batshev V.I., et al. SWIR videospectrometer based on tandem AOTF [in Russian] // XVII Internat. Conf. Optical Methods of Flow Investigation — OMFI-2023 (Abstracts of reports). Moscow, Russia. June 26–30, 2023. P. 451–455.

АВТОРЫ

Милана Олеговна Шарикова — аспирант, младший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57218281289; <https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>; sharikova.mo@ntcup.ru

Иван Алексеевич Баландин — аспирант, младший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57195684462; <https://orcid.org/0000-0003-2120-0186>; balandin.ia@ntcup.ru

Владислав Игоревич Батшев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-технологический

AUTHORS

Milana O. Sharikova — PhD student, Junior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57218281289; <https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>; sharikova.mo@ntcup.ru

Ivan A. Balandin — PhD student, Junior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57195684462; <https://orcid.org/0000-0003-2120-0186>; balandin.ia@ntcup.ru

Vladislav I. Batshev — PhD (Engineering), Senior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique

центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; batshev.vi@ntcup.ru

Алексей Борисович Козлов — научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; начальник лаборатории, НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57209523302; <https://orcid.org/0000-0002-5378-2064>; kozlov@ntcup.ru

Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russia; Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; batshev.vi@ntcup.ru

Alexey B. Kozlov — Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russia; Head of laboratory, Stelmakh Polyus Research Institute, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57209523302; <https://orcid.org/0000-0002-5378-2064>; kozlov@ntcup.ru

Статья поступила в редакцию 01.06.2023
Одобрена после рецензирования 01.08.2023
Принята к печати 26.09.2023

The article was submitted to the editorial office 01.06.2023
Approved after review 01.08.2023
Accepted for publication 26.09.2023