

АЛГОРИТМ ПРОСТРАНСТВЕННО-СПЕКТРАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КАМЕРОЙ

© 2025 г. А. А. Золотухина^{1,2,*}, А. С. Мачихин^{1,2}, А. В. Гурылева¹,
Г. В. Нестеров¹, В. В. Тедеева³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-технологический центр
уникального приборостроения Российской академии наук», Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

³Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства —
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального центра
«Владикавказский научный центр Российской академии наук», Михайловское, Россия

*E-mail: zolotukhina.aa@ntcup.ru

Поступила в редакцию 14.11.2024 г.

После доработки 03.12.2024 г.

Принята к публикации 30.12.2024 г.

Видеоспектрометры обеспечивают бесконтактную и высокопроизводительную оценку распределения физико-химических свойств объектов, эффективность которой зависит от точности получаемых прибором данных. Предложена методика коррекции пространственно-спектральных искажений изображений, зарегистрированных видеоспектрометром на основе разделения оптической апертуры.

Ключевые слова: видеоспектрометрия, мультиспектральная камера, калибровка, коррекция искажений, цифровая обработка изображений.

DOI: 10.31857/S0367676525040195, **EDN:** GUIXLW

ВВЕДЕНИЕ

Мультиспектральные камеры или видеоспектрометры с мультиспектральным разрешением востребованы при решении задач сельского хозяйства, экологического мониторинга, биомедицинской и технической диагностики [1]. Наиболее надежное и производительное измерение спектральных и пространственных характеристик объектов с подвижных носителей [2] или анализ быстротекущих процессов [3] гарантируют приборы с единовременной регистрацией нескольких спектральных изображений объектов. Для проведения измерений на основе таких данных необходимо определить параметры коррекции их искажений, вносимых аппаратной частью и условиями съемки, и провести дальнейшую калибровку прибора для унификации выдаваемых им характеристик [4, 5].

В связи с разнообразием физических принципов получения пространственно-спектральных данных [6] не существует единого унифицированного метода калибровки видеоспектрометров и коррекции регистрируемых с их помощью данных. Методики калибровки и коррекции, раз-

работанные для устройства на основе определенной схемы регистрации [7, 8], неприменимы и малоэффективны для коррекции данных прибора, построенного на другом принципе. Ранее авторами был предложен новый принцип осуществления мультиспектральной съемки на основе разделения оптической апертуры [9], выгодно отличающийся от аналогов совокупностью ключевых признаков (количество спектральных каналов, производительность, надежность, адаптируемость к конкретной задаче и т. д.). Целью данной работы является разработка алгоритма калибровки мультиспектральной камеры на основе разделения оптической апертуры и коррекции регистрируемых ей данных.

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ КАМЕРОЙ

Мультиспектральная камера на основе разделения оптической апертуры, разработанная в НТЦ УП РАН, включает в себя мультиспектральный модуль и матричный приемник из-

лучения. Основными элементами мультиспектрального модуля являются оптические системы формирования спектральных изображений (спектральные каналы), каждая из которых состоит из объектива и спектрального фильтра. Такие оптические системы установлены в едином корпусе мультиспектрального модуля перед матричным приемником излучения и одновременно разделенных спектральных изображений. На рис. 1 представлена блок-схема формирования спектральных изображений в мультиспектральной камере, построенной по указанной схеме.

Спектральная съемка, как правило, направлена на определение пространственно-спектрального распределения способности исследуемого объекта отражать падающее излучение, т.е. на определение коэффициента отражения $\rho(x, y, \lambda)$. Данные, полученные с помощью мультиспектральной камеры, представляют собой распределение интенсивности отраженного от наблюдаемого объекта и прошедшего через оптическую систему излучения по двум пространственным (x, y) и одной спек-

тральной (λ) координатам. Регистрируемое пространственно-спектральное распределение интенсивности искажается каждым функциональным блоком прибора, а также зависит от условий съемки, в первую очередь от характера освещенности объекта. Основные источники искажения данных приведены на рис. 1.

Интенсивность отраженного от объекта излучения определяется как $\rho(x, y, \lambda)$, так и распределением освещенности на его поверхности, создаваемым источником излучением. Освещенность $E(x, y, \lambda)$ может иметь как пространственную, так и спектральную неоднородность, и тем самым вносить искажения в вычисляемое распределение $\rho(x, y, \lambda)$. Отраженное от объекта излучения проходит оптическую систему, основные искажения которой в 16-канальной реализации мультиспектральной камеры [10] связаны с наличием дисторсии $D(x', y', \lambda)$ и виньетирования $V(x', y', \lambda)$ у объективов. Такие свойства систем присутствуют из-за широкого поля зрения объективов и снижают достоверность характеристик в большей степени на краях поля зрения. Кроме того, спектральные фильтры также могут иметь

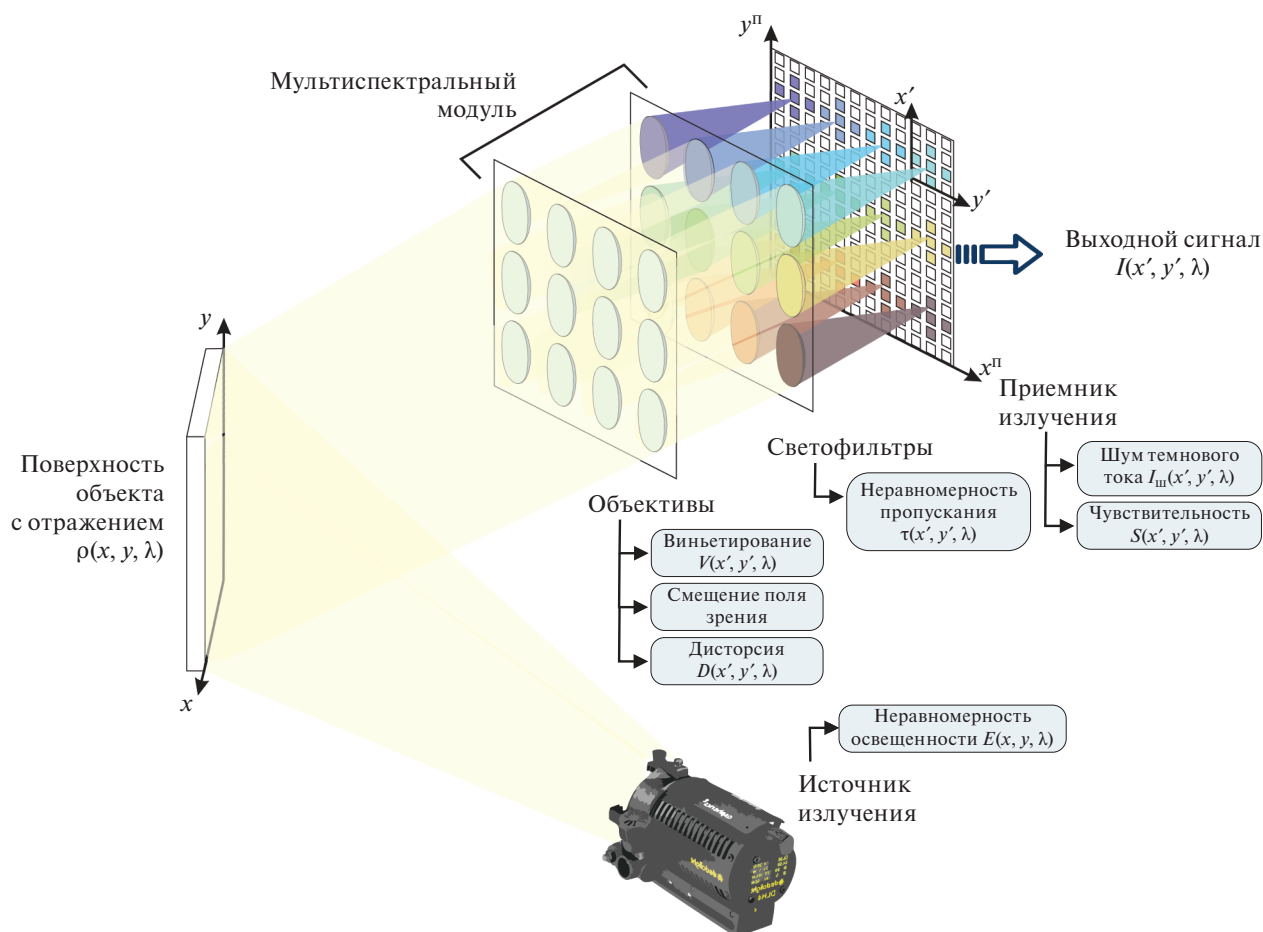


Рис. 1. Иллюстрация регистрации спектральных изображений объекта мультиспектральной камерой на основе разделения оптической апертуры.

спектральную $\tau(\lambda)$ и пространственную $\tau(x', y')$ неоднородность функции пропускания, при этом уникальную для каждого канала.

Использование независимых спектральных каналов со смещением поля зрения может привести к появлению параллакса, что особенно заметно в системах с несколькими приемниками, но имеет меньший эффект в рассматриваемой системе с разделением оптической апертуры. Приемник излучения в составе камеры преобразует падающее на него оптическое излучение в дискретные значения интенсивности на выходе АЦП, которые подвержены влиянию цифровых шумов различной природы $I_{\text{ш}}(x', y', \lambda)$. Кроме того, сигнал искажается из-за пространственной и спектральной неравномерности чувствительности детектора $S(x', y', \lambda)$, что приводит к искажениям спектральных характеристик объектов.

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ И КАЛИБРОВКИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Целью проведения коррекции регистрируемых прибором данных, является вычисление фактического распределения коэффициента отражения поверхности объекта $\rho(x, y, \lambda)$ по зарегистрированному камерой сигналу $I(x', y', \lambda)$ в каждом канале. В ходе коррекции проводится калибровка прибора с применением стандартных объектов с известными характеристиками [11] для определения параметров компенсации искажений. Такими параметрами, как правило, служат поправочные коэффициенты, изменяющие интенсивность пикселей зарегистрированных кадров, а также величины и направления векторов для их локальных и глобальных сдвигов. Далее полученные параметры применяются к реальным данным для устранения возникших при их регистрации пространственно-спектральных артефактов программными средствами.

Зарегистрированный мультиспектральной камерой сигнал включает себя как полезный сигнал $\rho(x, y, \lambda)$, так и искажающие его компоненты различной природы. Для устранения каждого из та-

ких компонентов требуется провести отдельную процедуру калибровки и последующую компенсацию искажений. На рис. 2 представлены основные этапы предлагаемого алгоритма коррекции данных мультиспектральной камеры на основе деления оптической апертуры.

Коррекция шума компонентов приемника излучения может быть произведена вычитанием из корректируемых кадров изображений, полученных при отсутствии излучения, падающего на матричный приемник. При этом необходимо установить такие же значения времени экспонирования и усиления, как были установлены при захвате корректируемых спектральных изображений.

Коррекцию виньетирования предлагается осуществлять с помощью метода поправочных коэффициентов, описанного в работе [11]. Для этого мы произвели регистрацию спектральных изображений выходного окна интегрирующей сферы LabSphere FT-2200-W, обеспечивающей пространственно и спектрально равномерное излучение при изменении его интенсивности с некоторым шагом. Усреднение интенсивностей пикселей полученных изображений и нормировка полученного изображения на максимальное значение позволяет получить матрицу поправочных коэффициентов для каждого спектрального канала.

Коэффициенты для коррекции дисторсии в каждом канале мультиспектрального модуля были получены с помощью спектральных изображений шахматной миры по алгоритму, описанному в работе [12]. Затем для устранения влияния параллакса и совмещения спектральных изображений в отдельных каналах были определены вектора сдвига для каждого канала относительно опорного по зарегистрированным изображениям перекрестья.

Для вычисления пространственного распределения спектрального коэффициента отражения могут быть использованы различные методы радиометрической калибровки [13]. В данной работе был выбран эмпирический метод, позволя-

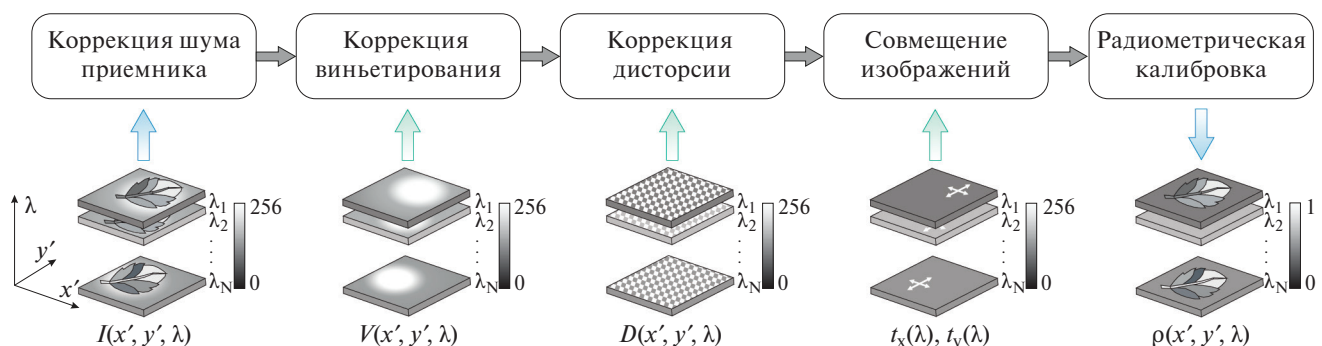


Рис. 2. Алгоритм коррекции данных мультиспектральной камеры.

ющий проводить радиометрическую калибровку как в лабораторных, так и в полевых условиях.

АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА В ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

С целью оценки эффективности предложенного алгоритма коррекции была определена ошибка вычисления спектральных характеристик цветовой мишени. Предварительно мы измерили спектральные коэффициенты отражения каждой области цветовой мишени с помощью спектрофотометра СФ-2000. На рис. 3 приведены спектральный коэффициент отражения, измеренный спектрофотометром (сплошная линия) и вычисленный на основе данных мультиспектральной камеры после коррекции (пунктирная линия). Средняя по спектру относительная ошибка определения $\rho(x, y, \lambda)$ по данным, прошедшим коррекцию, составила 5%, а без применения алгоритма коррекции искажений камеры ошибка определения коэффициента отражения после радиометрической калибровки составляет 38%.

Поскольку одним из основных применений мультиспектральных камер является мониторинг физиологического состояния растительности, предложенный алгоритм коррекции пространственно-спектральных данных был применен к спектральным изображениям посевов. Для этого на территории опытного поля Северо-Кавказского научно-исследовательского института горного и предгорного сельского хозяйства ВНИЦ РАН была проведена съемка

семи сортов сои. По данным мультиспектральной съемки согласно методу, описанному в работе [14], мы получили пространственное распределение содержания общего хлорофилла в листьях (рис. 4), являющегося одним из наиболее востребованных для оценки эффективности фотосинтеза в задачах оптимизации агротехнических операций и фитосанитарном мониторинге [15]. Далее было проведено сравнение значений концентраций общего хлорофилла, полученных в ходе химического лабораторного анализа и по данным мультиспектральной съемки до и после коррекции. Сравнение показало, что коррекция данных позволила снизить ошибку определения концентраций общего хлорофилла по данным мультиспектральной съемки с 47 до 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами предложена методика коррекции данных видеоспектрометра на основе разделения оптической апертуры. Разработанный подход позволяет получить распределение спектрального коэффициента отражения объекта без искажений, вызванных пространственно-спектральными неоднородностями характеристик прибора и освещения. Алгоритм обеспечивает снижение средней относительной ошибки определения спектральных характеристик объекта с 38 до 5%. Полученные результаты способствуют внедрению нового метода мультиспектральной съемки для решения актуальных задач сельского хозяйства, экологического мониторинга и медицинской диагностики.

В части разработки схемы полевого эксперимента и подготовки образцов публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ВНИЦ РАН № 075-01005-23-00. В части разработки методик калибровки прибора и коррекции, регистрируемых им данных. Работа проводилась в рамках выполнения государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010).

Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН) (<https://ckp.ntcup.ru>).

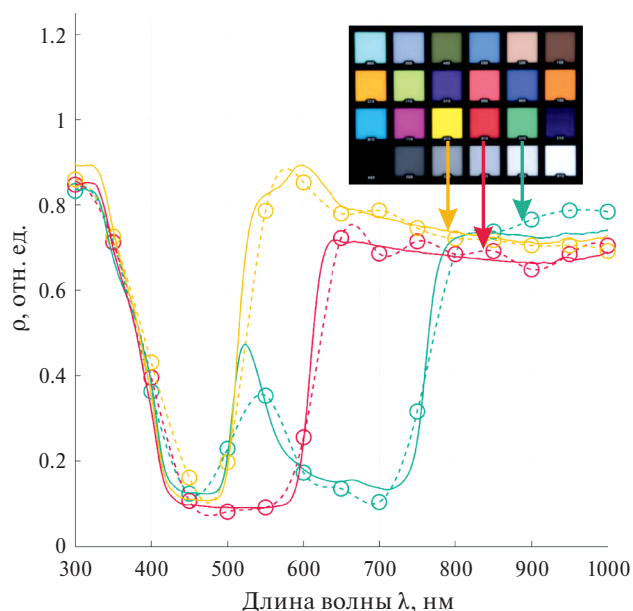


Рис. 3. Спектральный коэффициент отражения отдельных областей цветовой мишени, измеренный спектрофотометром (сплошная линия) и вычисленный на основе данных мультиспектральной камеры после коррекции (пунктирная линия).

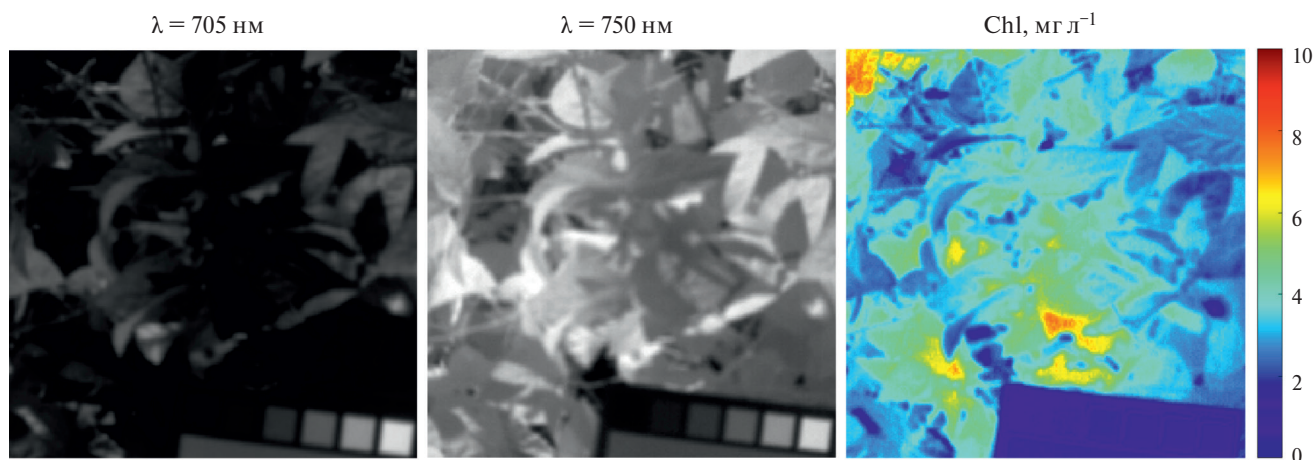


Рис. 4. Иллюстрация спектральных изображений мультиспектральной камеры и рассчитанного по ним пространственного распределения концентрации хлорофилла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garini Y., Young I.T., McNamara G. // Cytometry Part A. 2006. V. 69A. No. 10. P. 735.
2. Deng L., Mao Z., Li X. et al. // ISPRS. 2018. V. 69A. P. 124.
3. Baier M.J., McDonald A.J., Clements K.A. et al. // Proc. Com. Inst. 2021. V. 38. No. 3. P. 4433.
4. Yu X., Sun Y., Fang A. et al. // Proc. 2nd ICSAI (Shanghai, 2014). P. 871.
5. Мачихин А.С., Хохлов Д.Д., Батшеев В.И., Пожар В.Э. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1540; Machikhin A.S., Khokhlov D.D., Batshev V.I., Pozhar V.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 11. P. 1403.
6. Clancy N.T., Jones G., Maier-Hein L. et al. // Med. Image Anal. 2020. V. 63. Art. No. 101699.
7. Henriksen M.B., Garrett J.L., Prentice E.F. et al. // Proc. 10th WHISPERS (Amsterdam, 2019). Art. No. 8921350.
8. Minark R., Langhammer J., Hanus J. // Remote Sens. 2019. V. 11. No. 20. Art. No. 2428.
9. Мачихин А.С., Батшеев В.И., Крюков А.В. Способ одновременной регистрации мультиспектральных изображений. Патент РФ № 2800054, кл. G01J 5/08, G01J 3/02. 2023.
10. Батшеев В.И., Крюков А.В., Мачихин А.С., Золотухина А.А. // Опт. журн. 2023. Т. 90. № 11. С. 113; Batshev V.I., Machikhin A.S., Krioukov A.V., Zolotukhina A.A. // J. Opt. Tech. 2024. V. 90. No. 11. P. 706.
11. Cao H., Gu X., Wei X. et al. // Remote Sens. 2021. V. 12. No. 24. Art. No. 4012.
12. Wu Y., Jiang S., Xu Z. et al. // Front. Optoelectron. 2015. V. 8. No. 3. P. 319.
13. Pu R. Hyperspectral remote sensing: Fundamentals and practices. CRC Press, 2017. 466 p.
14. Zolotukhina A., Machikhin A., Guryleva A. et al. // Remote Sens. 2024. V. 16. Art. No. 1073.
15. Croft H., Chen J.M., Luo X. et al. // Glob. Chang. Biol. 2017. V. 23. No. 9. P. 3524.

Algorithm for spatial-spectral data correction captured by a multispectral camera

A. A. Zolotukhina^{a,b,*}, A. S. Machikhin^{a,b}, A. V. Guryleva^a, G. V. Nesterov^a, V. V. Tedeeva^c

^a*Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342 Russia*

^b*National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, 111250 Russia*

^c*The North Caucasian Research Institute of Mountain and Piedmont Agriculture – the Affiliate of Vladikavkaz
Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Mikhailovskoye, 363110 Russia*

**e-mail: zolotukhina.aa@ntcup.ru*

Imaging spectrometers provide non-contact and high-performance assessment of the physical and chemical object properties distribution, the effectiveness of which depends on the data accuracy obtained by the device. The paper introduces a method to correct spatial-spectral distortions in images captured by the imaging spectrometer based on the optical aperture division.

Keywords: spectral imaging, multispectral camera, calibration, distortion correction, digital image processing.