НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2026, том 36, № 4, с. 80–92 *ISSN 0868-5886*

ФИЗИКА ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 681.7, 53.089.62
EDN: AJNSEW

© А. А. Золотухина, А. М. Зубанкова, А. С. Мачихин, 2026

ПРОСТРАНСТВЕННО-СПЕКТРАЛЬНАЯ КАЛИБРОВКА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИДЕОСИСТЕМЫ С РАЗДЕЛЕНИЕМ АПЕРТУРЫ

Мультиспектральные видеосистемы кадрового типа обеспечивают одновременную регистрацию нескольких спектральных изображений, что позволяет выполнять анализ спектральных свойств объектов с пространственным разрешением в режиме, близком к реальному времени. В данной работе предложена методика пространственно-спектральной калибровки односенсорной мультиспектральной видеосистемы, основанной на пространственном разделении оптической апертуры на несколько спектральных каналов. Алгоритм учитывает определение параметров искажений, вносимых оптической системой и приемником излучения. Калибровка заключается в последовательной съемке нескольких объектов с известными свойствами и вычислении корректирующих коэффициентов на основе цифровой обработки их изображений. После проведения калибровки 8- и 16-канальных мультиспектральных видеокамер с использованием разработанной методики была проведена оценка погрешности определения спектрального коэффициента отражения на основе изображений мер координат цветности. Показано, что разработанная методика снижает погрешность измерений спектров отражения с помощью мультиспектральных видеосистем и обеспечивает корректное сравнение пространственно-спектральных данных, полученных в разное время и/или разными приборами.

Ключевые слова: видеоспектрометрия, мультиспектральная видеосистема, калибровка, цифровая обработка изображений

ВВЕДЕНИЕ

Мультиспектральные видеосистемы (МСВ) кадрового типа, обеспечивающие регистрацию пространственно-спектральных данных без пространственного или спектрального сканирования, перспективны для анализа динамических сцен и установки на подвижные носители. Такие МСВ позволяют повысить скорость сбора данных, сократить их объем и время обработки при решении важных задач: оценке состояния посевов, выявлении дефектов материалов и диагностики биологических тканей. Оптимизация параметров спектральных каналов МСВ [1–3] позволяет сохранить точность оценки исследуемых параметров и повысить воспроизводимость измерений [4] за счет уменьшения влияния шумов и избыточности данных.

МСВ с пространственным разделением оптической апертуры на спектральные каналы [5] позволяют минимизировать массу, габариты и энергопотребление. Выбор спектральных каналов в других схемах МСВ кадрового типа возможен только на стадии проектирования; при этом изменение количества, положений и ширины спектральных каналов недопустимы. При ограниченном числе спектральных каналов отсутствие предварительной оптимизации их параметров может снижать точность восстановления спектров отражения объектов [6]. Аппаратные искажения регистрируемого оптического сигнала обусловлены особенностями оптико-электронного тракта МСВ. Одновременная регистрация нескольких изображений приводит к необходимости разделения пространственной, спектральной и радиометрической информации внутри одной оптической системы с помощью мозаичных фильтров, использования нескольких оптических каналов или разделения апертуры. В результате такого разделения искажения, вносимые оптической системой (ОС), спектральным элементом и приемником излучения (ПИ), оказываются взаимосвязанными и зачастую не могут быть полностью устранены стандартными процедурами. Поэтому в методике калибровки МСВ с физическим принципом формирования спектральных изображений для односенсорных МСВ с мозаичным спектральным фильтром основными задачами являются определение спектральных характеристик каналов и коррекция ошибок реконструкции спектральных изображений из мозаичного кадра [7, 8]. Для мультисенсорных МСВ — геометрическое совмещение изображений, включая компенсацию параллакса и других рассогласований между каналами [9, 10]. Для односенсорных МСВ с разделением оптической апертуры и градиентным

спектральным фильтром — определение функций пропускания отдельных спектральных каналов и учет их пространственной неоднородности [11].

В результате калибровки определяют поправочные коэффициенты, описывающие связь между регистрируемым сигналом и характеристиками эталонов. Применение этих коэффициентов к отсчетам позволяет преобразовать их в физические величины, а именно: в пространственное распределение спектрального коэффициента отражения образца $\rho(x, y, \lambda)$, спектрального коэффициента пропускания $\tau(x, y, \lambda)$ или спектральной яркости объекта $L(x, y, \lambda)$.

Из-за разнообразия конструкций МСВ и физических принципов формирования спектральных изображений общепринятая процедура их калибровки отсутствует. Существующие подходы являются фрагментарными: каждый из них устраняет определенный класс искажений, характерный не только для конкретного типа МСВ, но и зачастую для конкретной модели прибора. Поэтому их непосредственное применение к МСВ с иной оптической схемой ограничено.

ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная апробация методики калибровки односенсорных МСВ с пространственным разделением спектральных каналов для ее применения как средства определения пространственно-спектральных характеристик различных объектов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Пространственно-спектральные данные, регистрируемые МСВ с разделением оптической апертуры [12], представляют собой кадр, содержащий несколько пространственно разнесенных спектральных изображений (рис. 1, а, б). Объектами исследования являлись разработанные в НТЦ УП РАН 8- и 16-канальная МСВ, основанные на таком принципе (Приложение, рис. П). Их основные параметры представлены в табл. 1.

Метод пространственно-спектральной калибровки

Предлагаемая методика калибровки МСВ с пространственным разделением спектральных каналов и последующей коррекции данных представлена на рис. 2. Зарегистрированный сигнал 1 представляет собой интенсивность отраженного от объекта излучения 4, искаженную несколькими факторами. Для того, чтобы провести коррекцию 3, необходимо получить поправочные коэффициенты путем калибровки 2. Для их определения применялись несколько аттестованных объектов: меры диффузного отражения, интегрирующая сфера, нейтральные светофильтры, перестраиваемый монохроматор, тест-объекты и широкополосный источник излучения.

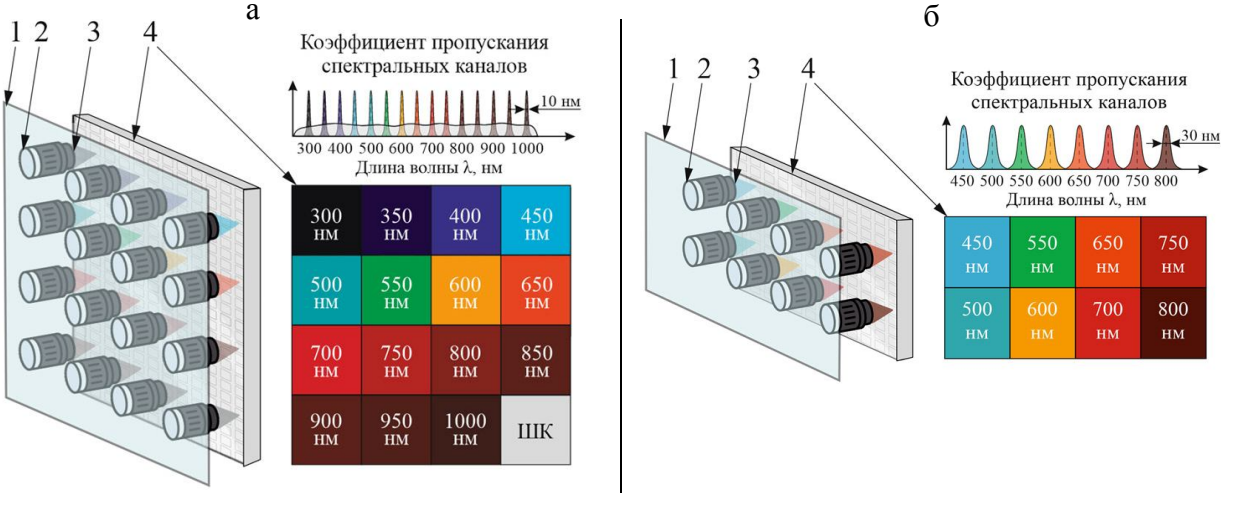

Рис. 1. Схемы односенсорных мультиспектральных видеосистем МС-16В (а) и МС-8В (б).
1 — защитное стекло, 2 — объектив, 3 — светофильтр, 4 — матричный приемник излучения

Табл. 1. Параметры мультиспектральных видеосистем

Модель	МС-8В	МС-16В
Количество спектральных каналов, шт.	8	16
Спектральный диапазон, нм	от 450 до 850	от 300 до 1000
Ширина спектральных каналов, нм	30	10
Поле зрения, градусы	30 × 40	35 × 35
Диапазон резко изображаемого пространства, м	от 1 до ∞	от 1 до ∞
Частота кадров, Гц	18	37
Разрешение, пикс^2	1000 × 1000	500 × 500
Габариты, мм	35 × 35 × 60	68 × 68 × 45
Масса, кг	0.10	0.45

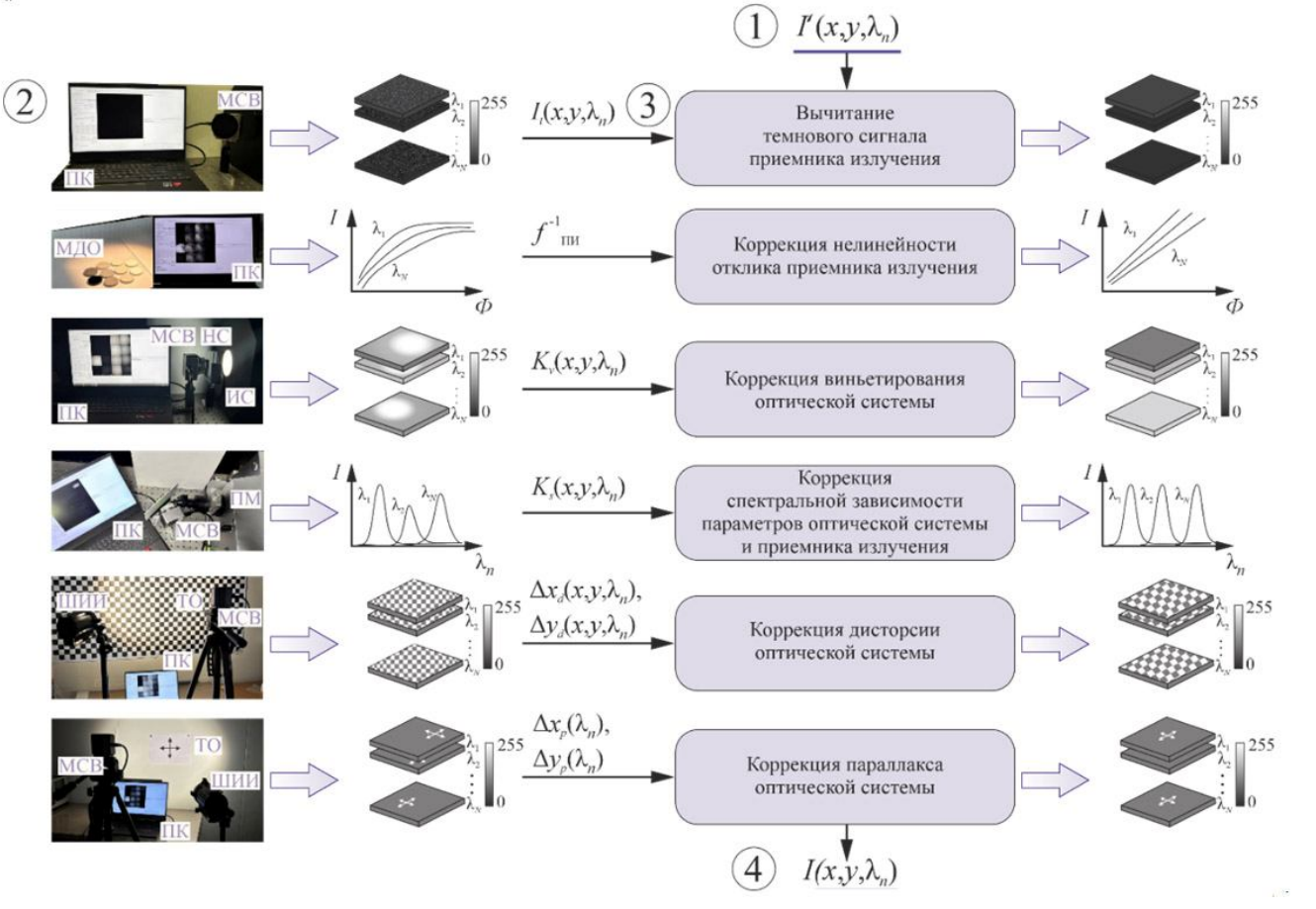

Рис. 2. Блок-схема разработанного алгоритма калибровки МСВ.
1 — зарегистрированный сигнал от объекта, 2 — массив (вертикальный) операций калибровки для получения поправочных коэффициентов, 3 — соответствующий 2 массив операций коррекции сигнала, 4 — восстановленное излучение объекта;
МДО — меры диффузного отражения, НС — нейтральный светофильтр, ИС — интегрирующая сфера, ПМ — перестраиваемый монохроматор, ШИИ — широкополосный источник излучения, ТО — тест-объект, ПК — персональный компьютер

Процедуры калибровки и коррекции основаны на математической модели формирования искаженного спектрального изображения $I'(x, y, \lambda_n)$ в n-м спектральном канале с наложением функции пропускания λ_n:

$$I'(x,y,\lambda_n) = f_{\text{ПИ}}\Big\{K_S(x,y,\lambda_n)\cdot K_v(x,y,\lambda_n)\times \times I\Big[\big(x+\Delta x_p(\lambda_n)+\Delta x_d(x,y,\lambda_n)\big), \big(y+\Delta y_p(\lambda_n)+\Delta y_d(x,y,\lambda_n)\big), \lambda_n\Big]\Big\} + I_t(x,y,\lambda_n), \quad (1)$$

где $I_t(x, y, \lambda_n)$ — темновой сигнал; $f_{\text{ПИ}}$ — функция отклика ПИ, включающая нелинейность преобразования оптического сигнала; $K_s(x, y, \lambda_n)$ — коэффициент, характеризующий спектральную зависимость квантовой эффективности; $K_v(x, y, \lambda_n)$ — коэффициент, характеризующий виньетирование ОС; $\Delta x_d(x, y, \lambda_n)$ и $\Delta y_d(x, y, \lambda_n)$ — коэффициенты, характеризующие влияние дисторсии ОС; $\Delta x_p(\lambda_n)$ и $\Delta y_p(\lambda_n)$ — коэффициенты, характеризующие влияние параллакса спектральных каналов.

Калибровка заключается в последовательной съемке различных тест-объектов с известными свойствами и вычислении корректирующих коэффициентов на основе цифровой обработки их изображений. Применение этих коэффициентов позволяет в реальном времени осуществлять процедуру коррекции зарегистрированных пространственно-спектральных данных и вычислять скорректированные спектральные изображения $I(x, y, \lambda_n)$, по которым могут быть определены спектры отражения $I(\lambda_n)$ исследуемых объектов в произвольных точках (x, y) поля зрения.

Сигнал темнового тока аддитивен [13]. Его учет производится программно. Для этого с помощью МСВ при закрытой крышкой апертуре были зарегистрированы изображения. Последовательным изменением времени экспонирования в диапазоне 21–20021 мкс с шагом 100 мкс получена серия сигналов темнового тока для его последующей коррекции в процессе регистрации изображений исследуемых объектов.

Искажения, обусловленные нелинейностью фоточувствительного элемента и компонентов электронного тракта [14], представляют собой систематическую ошибку, приводящую к снижению точности определения спектральных характеристик объектов. Контролируемое изменение освещенности ПИ в рабочем диапазоне чувствительности позволяет определить зависимость от нее дискретных значений и использовать эту кривую для последующей программной коррекции снимков. При регистрации изображений в узких спектральных каналах эти значения зависят не только от уровня освещенности объекта, но и от его спектральных особенностей. Поэтому для коррекции нелинейного отклика в режиме реального времени используются тест-объекты с градацией отражательной способности [15] — меры диффузного отражения.

Отклик ПИ описывают несколькими типами функций [16, 17]. В первом приближении используется линейная модель, однако для ряда ПИ линейность сохраняется в ограниченном диапазоне значений освещенности, а при приближении к насыщению возникает нелинейность. Поэтому выбор функции коррекции определяется формой экспериментальной калибровочной кривой, числом доступных калибровочных уровней, требуемой точностью и допустимой вычислительной сложностью алгоритма. Определение этих коэффициентов по полученным кривым позволяет программно скорректировать нелинейность отклика ПИ.

Коррекция виньетирования может осуществляться с помощью поправочных коэффициентов [10]. Для определения профиля виньетирования каждого спектрального канала с помощью интегрирующей сферы Labsphere FT-2300-W были получены изображения при изменении интенсивности излучения. На изображении, полученном при однородном освещении, эффект виньетирования соответствует низкой частоте, а случайный шум и шум отклика — высокочастотным шумам. Усреднение полученных поверхностей и нормировка результирующей позволяет получить матрицу поправочных коэффициентов для каждого спектрального канала. Альтернативой методу матриц преобразования является полиномиальная аппроксимация [18] распределения освещенности, обусловленного виньетированием. Однако эффект виньетирования имеет сложный и асимметричный характер, что приводит к отклонениям от аппроксимации и снижает эффективность коррекции с ее помощью.

Спектральную зависимость имеют характеристики чувствительности ПИ и коэффициент пропускания фильтров каждого канала МСВ. Получить эту зависимость с учетом обоих указанных факторов возможно при регистрации монохроматического излучения, что реализовано на основе монохроматора Solar Laser Systems M266 и широкополосного плазменного источника излучения ISTEQ XWS-65. Обработка зарегистрированных данных включала разделение общего изображения на спектральные каналы, выделение освещенной области кадра и усреднение сигнала по всем пикселям области спектрального канала для каждой

длины волны падающего излучения. Полученные спектральные зависимости используются при коррекции спектральных изображений в процессе их регистрации и определении коэффициента отражения исследуемых объектов.

Дисторсия оптических систем МСВ приводит к несовпадению пикселей, соответствующих определенной части объекта, в разных спектральных каналах. Такую аберрацию минимизируют либо при проектировании объективов [19, 20], либо программно путем определения матрицы коэффициентов для смещения пикселей. Коэффициенты для коррекции дисторсии в каждом спектральном канале получены с помощью изображений шахматной миры по алгоритму, описанному в [21].

Для получения спектральных характеристик каждого пространственного элемента объекта с высокой точностью необходимо совместить изображения, полученные в разных спектральных каналах. При идеальном изготовлении мультиспектрального модуля для совмещения изображений достаточно однократно определить матрицу евклидовых преобразований. При этом даже малые погрешности в изготовлении оправы мультиспектрального модуля, приводящие к возникновению угла между оптическими осями объективов, могут повлечь изменение матриц преобразования в зависимости от расстояния до объекта.

Для пространственного совмещения спектральных каналов алгоритм включал предварительную нормировку изображений, контрастирование, сглаживание, выделение градиентной составляющей, поиск и сопоставление характерных признаков. Геометрические преобразования оценивались между соседними по длине волны каналами с последующим последовательным приведением всех изображений к системе координат опорного канала. Для исключения ошибки выполнялась проверка преобразований по величине смещения, масштабу и положению границ изображения. Такой подход обеспечивал автоматическое межканальное совмещение без ручного выбора контрольных точек на изображениях и снижал вклад пространственного рассогласования в погрешность определения коэффициента отражения.

Радиометрическая коррекция проводилась методом плоского поля в лабораторных условиях и эмпирическим методом в полевых условиях[22]. Метод плоского поля основан на съемке однородного эталона с известным коэффициентом отражения, заполняющего поле зрения МСВ. При сохранении одинаковых условий съемки эталона и исследуемого объекта попиксельное отношение спектральных изображений позволяет учесть пространственную неоднородность освещения и регистрации.

Эмпирический метод предполагает размещение в поле зрения МСВ эталонов с известными спектральными характеристиками и определение зависимости между зарегистрированной яркостью и известным коэффициентом отражения. Полученное соотношение затем применяется ко всем пикселям изображения.

Оценка погрешности определения коэффициента отражения в различных зонах поля зрения

Тестовый объект для оценки погрешности определения коэффициента отражения с помощью МСВ должен иметь известные спектральные характеристики, измеренные аттестованным прибором. Такой подход позволяет исключить влияние свойств исследуемого объекта и однозначно связать выявленные отклонения с характеристиками МСВ. В связи с этим в качестве тестового объекта были выбраны меры координат цветности, изготовленные из цветного стекла. Их спектральный коэффициент отражения предварительно измерен на аттестованном спектрофотометре СФ-2000.

Для реализации разработанных алгоритмов калибровки создан экспериментальный стенд (рис. 3) на базе оптического стола и каркаса из металлических профилей для размещения различных тест-объектов. Расстояние от МСВ до тест-объектов регулируется положением центральной части каркаса от 0.3 до 2 м. Подсветка тест-объекта состоит из галогенных и светодиодных источников, наклоны, положения и интенсивности излучения которых регулируются.

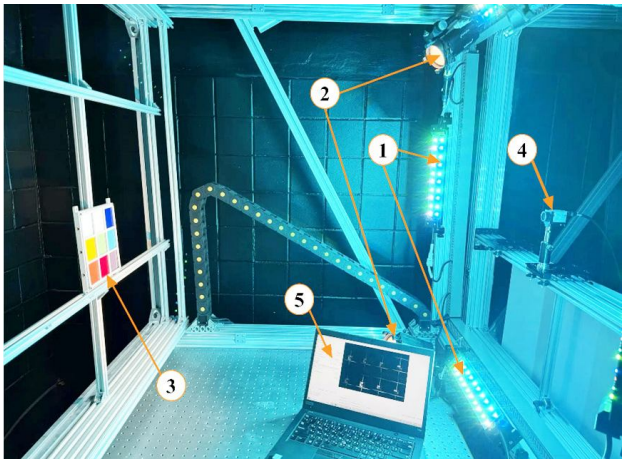

Рис. 3. Внешний вид стенда для калибровки и оценки погрешности определения спектральной зависимости коэффициента отражения
1 — светодиодный источник, 2 — галогенный источник, 3 — меры координат цветности, 4 — МСВ, 5 — персональный компьютер

В качестве метрик для оценки эффективности калибровки использовались абсолютная погрешность, средняя абсолютная погрешность, среднеквадратическая погрешность и нормированная среднеквадратическая погрешность определения коэффициента отражения с помощью МСВ. Абсолютная погрешность рассчитана как разность между значением, полученным с помощью МСВ $R_{i,j}^{\text{МСВ}}$, и эталонным значением $R_{i,j}^{\text{ЭТ}}$, измеренным аттестованным спектрофотометром:

$$A \cdot E_{i,j} = R_{i,j}^{\text{МСВ}} - R_{i,j}^{\text{ЭТ}}, \quad (2)$$

где i — порядковый номер меры координат цветности, j — порядковый номер спектрального канала.

Средняя абсолютная погрешность MAE характеризует средний модуль отклонения результатов МСВ от эталонных значений:

$$\text{MAE}_j = \left(\sum_{i=1}^{N} \left| A \cdot E_{i,j} \right|\right) / N, \quad (3)$$

где N — количество мер координат цветности.

Среднеквадратическая погрешность RMSE является более чувствительной к отдельным значительным ошибкам:

$$\text{RMSE}_j = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N} \left(A \cdot E_{i,j} \right)^2\right) / N}. \quad (4)$$

Нормированная среднеквадратическая погрешность NRMSE используется для оценки погрешности относительно диапазона измеряемой величины:

$$\text{NRMSE}_j = \text{RMSE}_j / (R_{\max,j} - R_{\min,j}) \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $R_{\max,j}$ и $R_{\min,j}$ — максимальное и минимальное значения коэффициента отражения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки распределения погрешности в пределах поля зрения прибора были рассчитаны погрешности определения коэффициента отражения для двух случаев: размещение эталонов в центральной области и на краю кадра. Оценку погрешности проводили для спектральных каналов с центральными длинами волн от 450 до 1000 нм, охватывающих основные диапазоны, применяемые при дистанционном мониторинге. Сводные значения погрешности для отдельных спектральных каналов приведены в табл. 2 и 3.

Табл. 2. Погрешность определения коэффициента отражения с помощью МС-8В

Центральная длина волны, нм	MAE в центре, %	RMSE в центре, %	NRMSE в центре, %	MAE на краю, %	RMSE на краю, %	NRMSE на краю, %
450	2.5	3.4	3.5	2.1	2.1	2.3
500	1.4	1.5	1.4	1.8	1.9	2.4
550	2.2	2.3	3.3	1.9	3.2	3.5
600	4.1	5.2	5.4	2.2	2.8	3.0
650	3.3	3.1	4.4	2.7	2.9	3.1
700	3.4	4.1	5.7	3.4	3.1	3.3
750	4.4	4.4	6.5	2.6	2.9	3.2
800	7.5	8.5	1.4	3.5	6.1	8.4

Табл. 3. Погрешность определения коэффициента отражения с помощью МС-16В

Центральная длина волны, нм	MAE в центре, %	RMSE в центре, %	NRMSE в центре, %	MAE на краю, %	RMSE на краю, %	NRMSE на краю, %
450	5.6	6.7	7.8	4.6	6.8	8.1
500	5.6	5.6	6.8	3.6	4.6	6.5
550	4.2	4.6	4.9	1.7	3.6	4.7
600	4.9	5.6	6.6	1.7	2.5	3.1
650	4.3	4.8	4.7	1.8	1.1	2.0
700	4.1	4.1	5.2	0.8	1.0	1.6
750	4.4	4.3	4.8	1.7	3.7	3.7
800	5.1	6.6	7.7	3.6	5.7	6.7

Табл. 3. *Окончание*

Центральная длина волны, нм	MAE в центре, %	RMSE в центре, %	NRMSE в центре, %	MAE на краю, %	RMSE на краю, %	NRMSE на краю, %
850	6.6	7.6	8.6	7.6	9.7	1.7
900	7.0	8.8	1.7	6.5	8.8	9.5
950	7.6	9.6	10.8	6.6	11.7	12.6
1000	8.6	10.6	12.2	7.5	11.5	12.1

На рис. 4, а, б, и рис. 5, а, б, представлены исходные спектральные изображения мер координат цветности, полученные видеосистемами МС-8В и МС-16В при их расположении в центре и на краю поля зрения. Цифрами обозначены центральная длина волны полос пропускания спектральных каналов, обозначение ШК соответствует широкополосному каналу с чувствительностью во всем рабочем спектральном диапазоне.

На рис. 4, в, г, и рис. 5, в, г, сопоставлены спектральные коэффициенты отражения, рассчитанные после коррекции данных МС-8В и МС-16В (маркеры), и паспортные значения этих коэффициентов (сплошные линии).

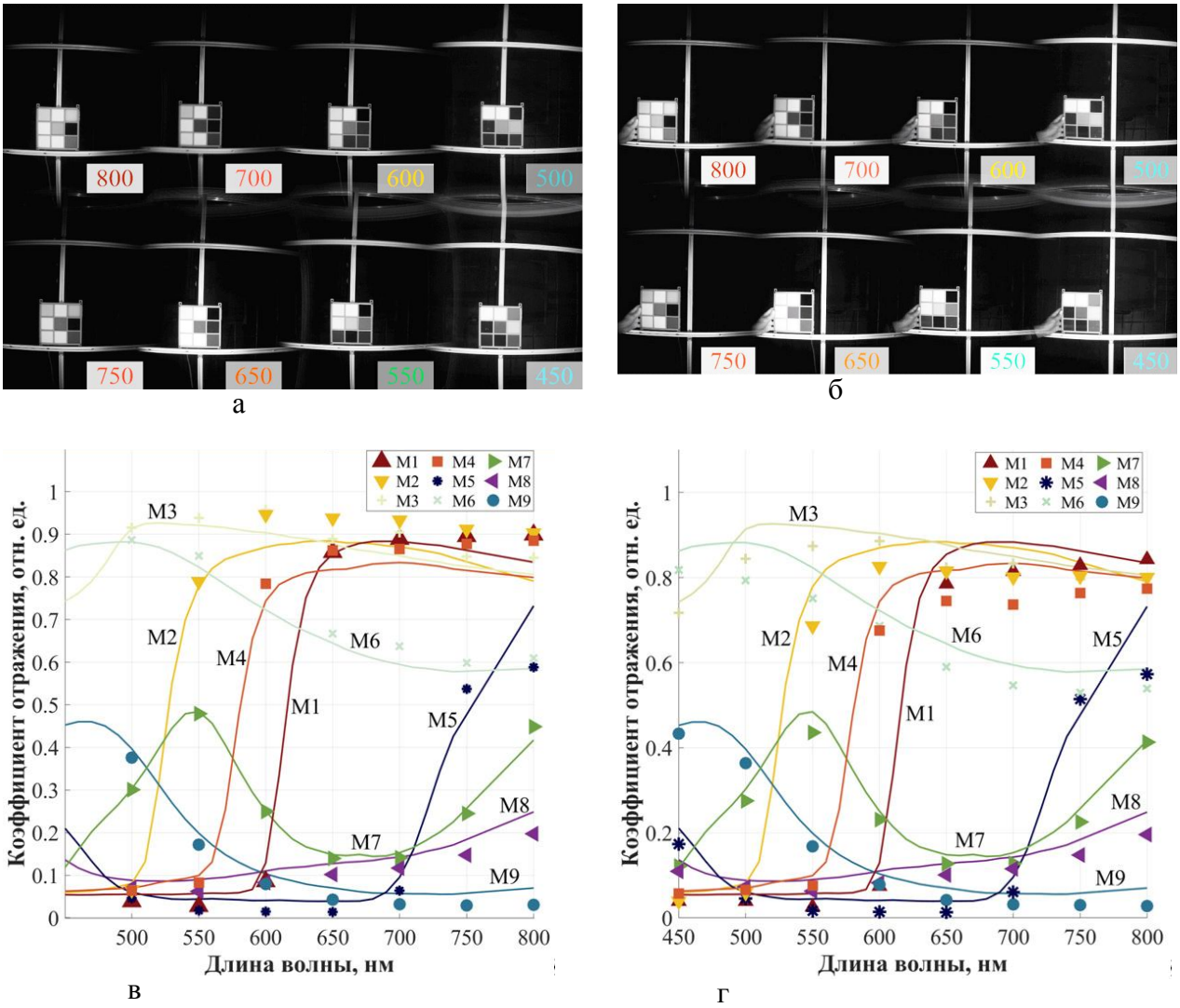

Рис. 4. Спектральные изображения мер координат цветности в центре (а) и на краю (б) поля зрения и коэффициенты отражения, измеренные с помощью МС-8В и аттестованным спектрометром, полученные при размещении мер M1–M9 в центре (в) и на краю (г) поля зрения

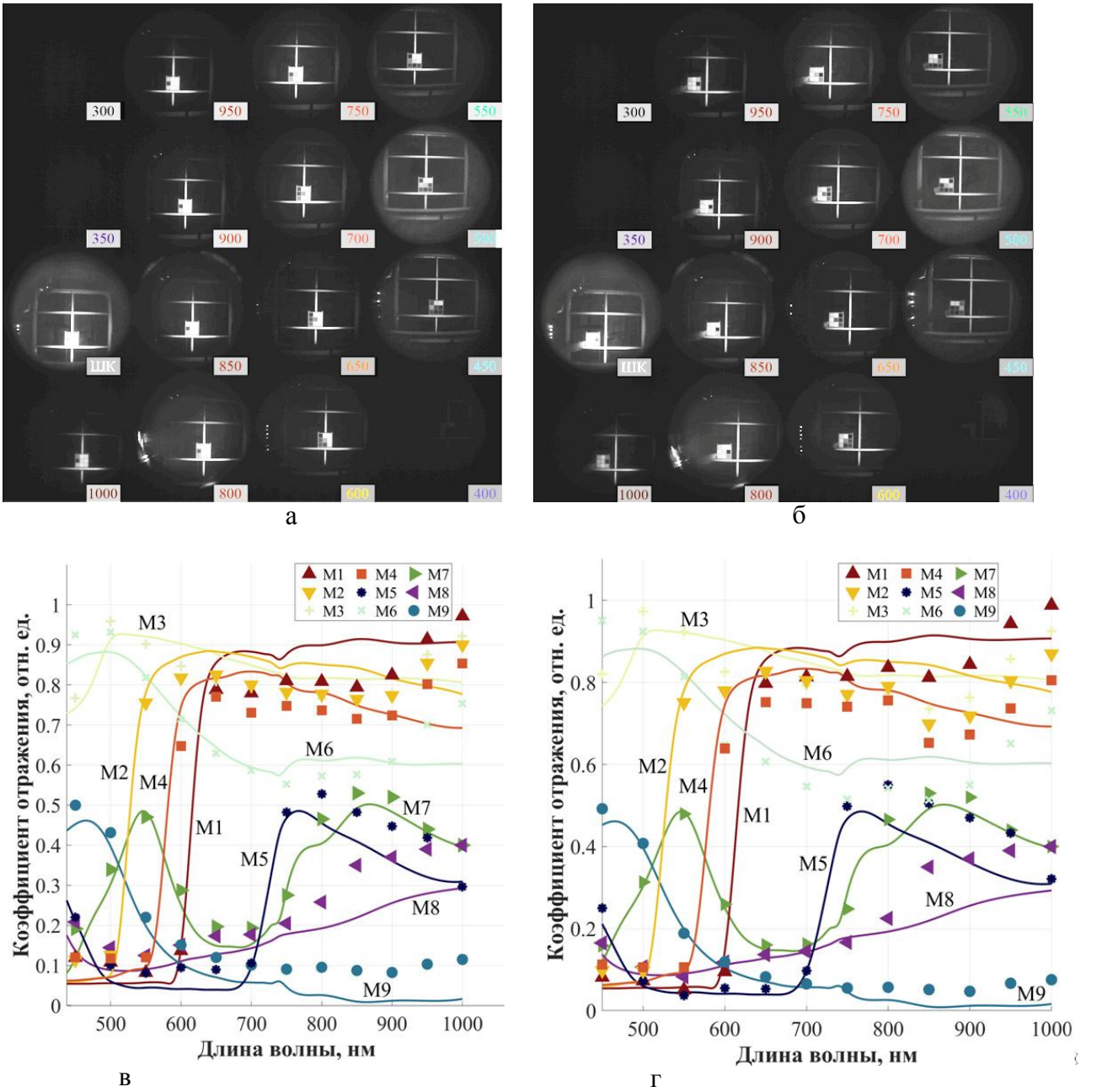

Рис. 5. Спектральные изображения мер координат цветности в центре (а) и на краю (б) поля зрения и коэффициенты отражения, измеренные с помощью МС-16В и аттестованным спектрометром, полученные при размещении мер M1–M9 в центре (в) и на краю (г) поля зрения

Для МС-8В погрешность определения коэффициента отражения в диапазоне от 450 нм до 750 нм остается сравнительно небольшой. При расположении мер в центре кадра значения MAE составляют 1–4%, RMSE — 1–5%, NRMSE — 1–6%. Наибольшее отклонение наблюдается при 800 нм, где MAE, RMSE и NRMSE возрастают соответственно до 7.5%, 8.5% и 10.4%. Перенос объекта из центра к краю поля зрения не приводит к систематическому ухудшению результатов.

Для МС-16В зависимость погрешности от положения спектрального канала выражена сильнее. В коротковолновой области 450–800 нм MAE не превышает 5.6%, RMSE — 6.7%, NRMSE — 7.8 %. Начиная с 800 нм наблюдается устойчивое увеличение погрешности.

В канале 1000 нм значения MAE, RMSE и NRMSE достигают 8.6%, 10.6% и 12.2%, соответственно. На краю поля зрения МС-16В минимальные погрешности наблюдаются в диапазоне длин волн 600–750 нм, особенно в каналах 650–700 нм. В диапазоне 850–1000 нм они возрастают до 7–9% по MAE, 8–12% по RMSE и 9–13% по NRMSE, достигая максимума при 950–1000 нм. Существенное превышение RMSE над MAE в этих каналах указывает на наличие отдельных мер с особенно большими отклонениями коэффициента отражения.

Рост погрешностей в крайних каналах (при 800 нм для МС-8В, а также при 450–500 и 850–1000 нм для МС-16В) может быть связан со снижением чувствительности камер, пропускания спектральных фильтров или мощности освещения на границах рабочего спектрального диапазона. Влияние положения мер координат цветности в поле зрения оказалось менее значительным, чем влияние спектрального диапазона.

Влияние этапов предложенной калибровки на погрешность определения спектрального коэффициента отражения было исследовано с помощью последовательного применения этапов коррекции данных. Последовательность установлена в соответствии с предложенной моделью формирования искаженного сигнала (1), результаты представлены в табл. 4 и 5.

Для МС-8В наиболее заметное уменьшение погрешности происходит после коррекции спектральной зависимости параметров ОС и ПИ: NRMSE снижается с 39.3% до 14.7% в центре и с 40.0% до 17.7% на краю поля зрения. Коррекция нелинейности, виньетирования и дисторсии изменяет результаты незначительно. После коррекции параллакса NRMSE уменьшается до 5.1% в центре и до 3.7% на краю поля зрения.

Для МС-16В коррекции спектральной зависимости и нелинейности последовательно снижают NRMSE до 42.9% в центре и 38.8% на краю поля зрения. При этом коррекция виньетирования приводит к росту погрешностей, особенно в центре поля зрения. Наибольший эффект также обеспечивает коррекция параллакса: итоговая NRMSE составляет 7.5 % в центре и 6.7% на краю поля зрения. Высокие значения погрешности МС-16В до заключительного этапа калибровки могут быть обусловлены значительным параллаксом спектральных каналов. Несовпадение соответствующих областей изображений приводит к формированию спектров из различных областей объекта и маскирует эффект остальных корректирующих.

Определяющими этапами калибровки являются коррекция спектральной зависимости для МС-8В и коррекция параллакса для обеих камер. Итоговая погрешность МС-8В несколько ниже, чем МС-16В.

Табл. 4. Усредненная по каналам погрешность определения коэффициента отражения с помощью МС-8В при последовательном применении коррекции по результатам калибровки

Этап коррекции по результатам калибровки	MAE в центре, %	RMSE в центре, %	NRMSE в центре, %	MAE на краю, %	RMSE на краю, %	NRMSE на краю, %
Применение исходных данных без коррекции	27.8	35.1	42.5	29.2	37.3	45.3
Вычитание темнового сигнала ПИ	25.8	32.4	39.3	26.0	33.0	40.0
Коррекция спектральной зависимости параметров ОС и ПИ	9.2	12.2	14.7	11.4	14.6	17.7
Коррекция нелинейности отклика ПИ	8.6	10.8	13.1	8.9	11.3	13.7
Коррекция виньетирования ОС	8.9	11.2	13.5	8.6	11	13.2
Коррекция дисторсии ОС	8.6	10.6	12.9	8.7	10.9	13.2
Коррекция параллакса ОС	3.6	4.1	5.1	2.5	3.1	3.7

Табл. 5. Усредненная по каналам погрешность определения коэффициента отражения с помощью МС-16В при последовательном применении коррекции по результатам калибровки

Этап коррекции по результатам калибровки	MAE в центре, %	RMSE в центре, %	NRMSE в центре, %	MAE на краю, %	RMSE на краю, %	NRMSE на краю, %
Применение исходных данных без коррекции	40.7	50.1	58.8	38.3	47.8	55.6
Вычитание темнового сигнала ПИ	40.3	49.9	58.1	40.8	50.7	58.7
Коррекция спектральной зависимости параметров ОС и ПИ	36.9	45.4	52.9	34.5	42.2	49.4
Коррекция нелинейности отклика ПИ	32.1	36.8	42.9	29.1	32.6	38.8
Коррекция виньетирования ОС	37.0	45.4	52.9	36.9	45.5	53.2
Коррекция дисторсии ОС	36.9	45.3	52.7	29.1	33.4	38.8
Коррекция параллакса ОС	5.6	6.5	7.5	3.9	5.8	6.7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апробация предложенной методики калибровки односенсорных МСВ с пространственным разделением спектральных каналов показала снижение NRMSE с 42.5 до 5.1% в центре и с 45.3 до 3.7% на краю кадра для МС-8В, а также с 58.8 до 7.5% и с 55.6 до 6.7% соответственно для МС-16В. В общем для МС-8В и МС-16В диапазоне от 450 до 800 нм средняя по спектральным каналам NRMSE камеры МС-8В составила 5.1% в центре и 3.7% на краю кадра, тогда как для МС-16В — 6.1% и 4.6%, соответственно. Для большинства каналов значения погрешности в центре и на краю кадра были сопоставимы: в диапазоне от 450 до 800 нм среднее абсолютное различие по показателям MAE, RMSE и NRMSE составило 1.2% для МС-8В и 1.7% для МС-16В, а максимальное — 3% и 4%, соответственно. Исключение составил диапазон от 850 до 1000 нм, в котором NRMSE для МС-16В возрастала до 9–12% в центре и 10–13% на краю кадра.

Анализ отдельных этапов методики показывает, что наибольшее снижение погрешности МС-8В обеспечивает коррекция спектральной зависимости ОС и ПИ, а для МС-16В определяющим этапом является коррекция параллакса спектральных каналов.

Результаты свидетельствуют о возможности повышения точности измерения спектров отражения с помощью односенсорных спектральных видеосистем с пространственным разделением спектральных каналов, что может расширить область применения и повысить сопоставимость данных, полученных с помощью различных приборов такого типа.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Рис. П. Внешний вид односенсорных мультиспектральных видеосистем МС-16В (а) и МС-8В (б)

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 25-16-00121).

Благодарности

Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН) [НТИРФ ID: 456451, https://ckp.ntcup.ru/].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Martinez B., Leon R., Fabelo H. et al.* Most Relevant Spectral Bands Identification for Brain Cancer Detection Using Hyperspectral Imaging // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 24. Id. 5481. DOI: 10.3390/s19245481
2. *Nesterov G.V., Guryleva A.V., Zolotukhina A.A. et al.* Seed purity assessment by means of spectral imaging // Computer Optics. 2025. Vol. 49, no. 3. P. 461–469. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1512
3. *Козик В.И., Нежевенко Е.С.* Сокращение размерности системы признаков при классификации гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли с помощью нейронных сетей // Автометрия. 2022. Т. 58, № 1. С. 5–12. DOI: 10.15372/AUT20220101
4. *Jin J., Wu M., Song G., Wang Q.* Genetic Algorithm Captured the Informative Bands for Partial Least Squares Regression Better on Retrieving Leaf Nitrogen from Hyperspectral Reflectance // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, no. 20. Id. 5204. DOI: 10.3390/rs14205204
5. *Батшев В.И., Крюков А.В., Мачихин А.С., Золотухина А.А.* Оптическая система мультиспектральной видеокамеры // Оптический журнал. 2023. Т. 90, № 11. С. 113–123. DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-11-113-123
6. *Niu S., Wu G., Li X.* Spectral Filter Selection Based on Human Color Vision for Spectral Reflectance Recovery // Sensors. 2023. Vol. 23, no. 11. Id. 5225. DOI: 10.3390/s23115225
7. *Hahn R., Hämmerling F.-E., Haist T. et al.* Detailed characterization of a mosaic-based hyperspectral snapshot imager // Optical Engineering. 2020. Vol. 59, no. 12. Id. 125102. DOI: 10.1117/1.OE.59.12.125102
8. *Kitanovski V., Thomas J.-B., Hardeberg J.Y.* Reflectance estimation from snapshot multispectral images captured under unknown illumination // Color and Imaging Conference. 2021. Vol. 29. P. 264–269. URL: https://jbthomas.org/Conferences/2021aCIC.pdf
9. *Mamaghani B., Salvaggio C.* Multispectral Sensor Calibration and Characterization for sUAS Remote Sensing // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 20. Id. 4453. DOI: 10.3390/s19204453
10. *Cao H., Gu X., Wei X. et al.* Lookup Table Approach for Radiometric Calibration of Miniaturized Multispectral Camera Mounted on an Unmanned Aerial Vehicle // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, no. 24. Id. 4012. DOI: 10.3390/rs12244012
11. *Wunsch L., Hubold M., Nestler R., Notni G.* Realisation of an Application Specific Multispectral Snapshot-Imaging System Based on Multi-Aperture-Technology and Multispectral Machine Learning Loops // Sensors. 2024. Vol. 24, no. 24. Id. 7984. DOI: 10.3390/s24247984
12. *Мачихин А.С., Батшев В.И., Крюков А.В.* Способ одновременной регистрации мультиспектральных изображений. Патент РФ № 2800054 C1. 2023. Опубл. 17.07.2023. URL: https://regtz.ru/check-patent/
13. *Porter W.C., Kopp B., Dunlap J.C. et al.* Dark current measurements in a CMOS imager // Proceedings of SPIE. 2008. Vol. 6816. Id. 68160K. DOI: 10.1117/12.769079
14. *Nehir M., Frank C., Aßmann S., Achterberg E.P.* Improving Optical Measurements: Non-Linearity Compensation of Compact Charge-Coupled Device (CCD) Spectrometers // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 12. Id. 2833. DOI: 10.3390/s19122833
15. *Deng L., Mao Z., Li X. et al.* UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. Vol. 146. P. 124–136. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008
16. *Schindler K., Wolf J., Krabbe A.* Characterization of InGaAs-based cameras for astronomical applications using a new VIS-NIR-SWIR detector test bench // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9145. Id. 91450X. DOI: 10.1117/12.2057052
17. *Miao Y., Yamaguchi M.* Photometric Calibration for Stereo Camera with Gamma-like Response Function in Direct Visual Odometry // Sensors. 2021. Vol. 21, no. 21. Id. 7048. DOI: 10.3390/s21217048
18. *Bal A., Palus H.* Image Vignetting Correction Using a Deformable Radial Polynomial Model // Sensors. 2023. Vol. 23, no. 3. Id. 1157. DOI: 10.3390/s23031157
19. *Cao Y., Yao Y., Lu L.* Design of a double-telecentric machine vision lens with continuously adjustable magnification and low distortion // Applied Optics. 2025. Vol. 64, no. 13. P. 3456–3464. DOI: 10.1364/AO.557850
20. *Zhuang Z., Parent J., Roulet P., Thibault S.* Freeform wide-angle camera lens enabling mitigable distortion // Applied Optics. 2022. Vol. 61, no. 18. P. 5449–5456. DOI: 10.1364/AO.456127
21. *Wu Y., Jiang S., Xu Z. et al.* Lens distortion correction based on one chessboard pattern image // Frontiers of Optoelectronics. 2015. Vol. 8, no. 3. P. 319–328. DOI: 10.1007/s12200-015-0453-7
22. *Pu R.* Hyperspectral remote sensing: Fundamentals and practices. CRC Press, 2017. 466 p.

NAUCHNOE PRIBOROSTROENIE, 2026, Vol. 36, No. 4, pp. 80–92 *ISSN 0868-5886*

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

Материал поступил в редакцию 21.07.2026

Контакты: *Золотухина Анастасия Александровна*,
zolotukhina.aa@ntcup.ru

SPATIOSPECTRAL CALIBRATION OF MULTI-APERTURE SPECTRAL IMAGERS

A. A. Zolotukhina, A. M. Zubankova, A. S. Machikhin

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Snapshot multispectral imaging systems simultaneously acquire multiple spectral images, enabling high-spatial-resolution analysis of object spectral characteristics with near-real-time performance. This study presents a method for spatial–spectral calibration of a single-sensor multispectral camera based on spatial division of the optical aperture into multiple spectral channels. The proposed calibration approach accounts for distortions introduced by both the optical system and the imaging sensor. The procedure involves sequentially imaging reference targets with known spectral properties and calculating correction coefficients via digital image processing. The developed methodology was applied to the calibration of 8- and 16-channel multispectral cameras, followed by an evaluation of reflectance measurement accuracy using color reference targets. The results demonstrate that the proposed method effectively reduces errors in reflectance spectrum estimation and enables reliable comparison of spatial-spectral data acquired at different times and/or using different instruments.

Keywords: spectral imaging, multispectral imaging system, spatial-spectral calibration, digital image processing

REFERENCES

1. Martinez B., Leon R., Fabelo H. et al. Most Relevant Spectral Bands Identification for Brain Cancer Detection Using Hyperspectral Imaging. *Sensors,* 2019, vol. 19, no. 24, id. 5481. DOI: 10.3390/s19245481
2. Nesterov G.V., Guryleva A.V., Zolotukhina A.A. et al. Seed purity assessment by means of spectral imaging. *Computer Optics,* 2025, vol. 49, no. 3, pp. 461–469. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1512
3. Kozik V.I., Nezhevenko E.S. [Feature System Dimensionality Reduction in Classification of Hyperspectral Earth Remote Sensing Data by Neural Networks]. *Avtometriya* [Autometry], 2022, vol. 58, no. 1, pp. 5–12. DOI: 10.15372/AUT20220101 (In Russ.).
4. Jin J., Wu M., Song G., Wang Q. Genetic Algorithm Captured the Informative Bands for Partial Least Squares Regression Better on Retrieving Leaf Nitrogen from Hyperspectral Reflectance. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, no. 20, id. 5204. DOI: 10.3390/rs14205204
5. Batshev V.I., Kryukov A.V., Machichin A.S., Zolotuchina A.A. [Multispectral videocamera optical system]. *Opticheskiy zhurnal* [Optical journal], 2023, vol. 90, no. 11, pp. 113–123. DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-11-113-123 (In Russ.).
6. Niu S., Wu G., Li X. Spectral Filter Selection Based on Human Color Vision for Spectral Reflectance Recovery. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 11, id. 5225. DOI: 10.3390/s23115225
7. Hahn R., Hämmerling F.-E., Haist T. et al. Detailed characterization of a mosaic-based hyperspectral snapshot imager. *Optical Engineering*, 2020, vol. 59, no. 12, id. 125102. DOI: 10.1117/1.OE.59.12.125102
8. Kitanovski V., Thomas J.-B., Hardeberg J.Y. Reflectance estimation from snapshot multispectral images captured under unknown illumination. *Color and Imaging Conference*, 2021, vol. 29, pp. 264–269. URL: https://jbthomas.org/Conferences/2021aCIC.pdf
9. Mamaghani B., Salvaggio C. Multispectral Sensor Calibration and Characterization for sUAS Remote Sensing.

Sensors, 2019, vol. 19, no. 20, id. 4453. DOI: 10.3390/s19204453
10. Cao H., Gu X., Wei X. et al. Lookup Table Approach for Radiometric Calibration of Miniaturized Multispectral Camera Mounted on an Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 24, id. 4012. DOI: 10.3390/rs12244012
11. Wunsch L., Hubold M., Nestler R., Notni G. Realisation of an Application Specific Multispectral Snapshot-Imaging System Based on Multi-Aperture-Technology and Multispectral Machine Learning Loops. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 24, id. 7984. DOI: 10.3390/s24247984
12. Machichin A.S., Batshev V.I., Kryukov A.V. *Sposob odnovremennoy registrazii mul'tispektral'nych izobrazheniy* [Method for simultaneous registration of multispectral images], Patent RF no. 2800054 C1, 2023. Opubl. 17.07.2023. URL: https://regtz.ru/check-patent/ (In Russ.).
13. Porter W.C., Kopp B., Dunlap J.C. et al. Dark current measurements in a CMOS imager. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6816, id. 68160K. DOI: 10.1117/12.769079
14. Nehir M., Frank C., Aßmann S., Achterberg E.P. Improving Optical Measurements: Non-Linearity Compensation of Compact Charge-Coupled Device (CCD) Spectrometers. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 12, id. 2833. DOI: 10.3390/s19122833
15. Deng L., Mao Z., Li X. et al. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, vol. 146, pp. 124–136. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008
16. Schindler K., Wolf J., Krabbe A. Characterization of InGaAs-based cameras for astronomical applications using a new VIS-NIR-SWIR detector test bench. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9145, id. 91450X. DOI: 10.1117/12.2057052
17. Miao Y., Yamaguchi M. Photometric Calibration for Stereo Camera with Gamma-like Response Function in Direct Visual Odometry. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 21, id. 7048. DOI: 10.3390/s21217048
18. Bal A., Palus H. Image Vignetting Correction Using a Deformable Radial Polynomial Model. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 3, id. 1157. DOI: 10.3390/s23031157
19. Cao Y., Yao Y., Lu L. Design of a double-telecentric machine vision lens with continuously adjustable magnification and low distortion. *Applied Optics*, 2025, vol. 64, no. 13, pp. 3456–3464. DOI: 10.1364/AO.557850
20. Zhuang Z., Parent J., Roulet P., Thibault S. Freeform wide-angle camera lens enabling mitigable distortion. *Applied Optics*, 2022, vol. 61, no. 18, pp. 5449–5456. DOI: 10.1364/AO.456127
21. Wu Y., Jiang S., Xu Z. et al. Lens distortion correction based on one chessboard pattern image. *Frontiers of Optoelectronics*, 2015, vol. 8, no. 3, pp. 319–328. DOI: 10.1007/s12200-015-0453-7
22. Pu R. *Hyperspectral remote sensing: Fundamentals and practices*. CRC Press, 2017, 466 p.

Contacts: *Zolotukhina Anastasia Alexandrovna,*
zolotukhina.aa@ntcup.ru

The article was received by the editorial office on 21.07.2026