

УДК 681.511.22, 535.66

## **Учёт пространственной неравномерности освещения при обработке мультиспектральных изображений**

Арапов С. Ю. \*, Дубинин И. С., Арапова С. П.

*Уральский федеральный университет,  
ул. Мира, 32, Р041, Екатеринбург, Россия, 620002*

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос точности восстановления спектрального коэффициента отражения. Предложен метод минимизации влияния неравномерности освещения в поле кадра на результаты обработки мультиспектральных изображений. Коррекция фотометрических данных в каналах мультиспектрального изображения осуществляется масштабированием по значениям уровней белого и чёрного. Уровень чёрного определяется экстраполяцией тоновых значений нейтральной серой шкалы.

**Ключевые слова:** мультиспектральное изображение, уровень чёрного, спектр отражения, цветовое отличие.

## **Consideration of the spatial non-uniformity of illumination in the processing of multispectral images**

Arapov S. Yu. \*, Dubinin I. S., Arapova S. P.

*Ural Federal University, Mira, 32, R041, Ekaterinburg, Russia, 620002*

**Abstract.** The article discusses the question of accuracy of reconstruction of the spectral reflectance. The proposed method minimize the influence of non-uniformity illumination in the field frame on the results of multispectral image processing. Correction of photometric data in the channels of the multispectral image is scaling by the values of the black and white levels. The black level is determined by extrapolation of the tonal values of neutral gray scale.

**Keywords:** multispectral image, black level, reflectance spectra, color difference.

## Введение

Восстановление спектрального состава светового излучения по данным мультиспектральной съёмки (МСС) относится к классу обратных задач, для которых характерна неустойчивость получаемых решений. Методы работы с подобными задачами хорошо известны и описаны в литературе, например, в монографиях [1, 2]. Основной причиной такого рода сложностей в практических задачах связано с обилием вариантов искомого спектрального распределения, которые приводят к одному и тому же мультиспектральному изображению. Очевидно, что это приводит к требованию повышенной точности тоновых значений в мультиспектральном изображении (МСИ).

Задача восстановления спектрального коэффициента отражения, рассмотренная в работах [3–8], обладает дополнительной спецификой, по сравнению с другими приложениями МСС, например [9]. Тоновые значения в пикселях МСИ определяются спектральным и пространственным распределением светового потока через объектив мультиспектральной камеры (МСК) процессе МСС, который формируется за счёт отражения от объектов съёмки.

В то же время коэффициент отражения по определению — свойство объекта съёмки, и никак не зависит от его освещения. Следовательно, учёт распределения освещения по поверхности исследуемого объекта становится неизбежным требованием.

В работах [5, 6, 10] была получена приемлемая точность реконструкции спектров без учёта неравномерности, но это редкое исключение. В упомянутых работах удалось организовать практически равномерное освещение сцены. В работах [8, 11] точность восстановления спектров сложно признать удовлетворительной. Анализ фотометрических данных с матрицы фотокамеры из RAW-файлов показал заметную неравномерность, а в случае импульсного освещения — ещё и неодинаковость импульсов.

Проблема учёта неравномерности рассматривалась в работах [3, 4]. Она обусловлена конструкцией осветителя и всей установки в целом, так и виньетированием в оптической системе камеры. Для корректного решения требуется дополнительная априорная информация. Обычно в технологический процесс съёмки включают съёмку белого носителя для определения тоновых значений опорного белого. Дополнительно делается чёрный кадр с закрытой крышкой камеры.

В то же время уровень тонового значения, соответствующего чёрному теоретически может быть определён путём экстраполяции тоновых значений (ТЗ) известных полей шкалы. Таким образом целью данной работы является разработка и экспериментальная проверка метода компенсации неравномерности освещения без использования «чёрного кадра» в задаче определения спектров отражения.

## 1. Методика эксперимента

Мультиспектральная фотосъёмочная установка, на которой проводилась экспериментальная часть данной работы, представлена на рис. 1 а. Она состоит из осветителя на основе галогенной лампы накаливания с интерференционным фильтром (ГЛНИФ), вакуумного стола для фиксации объектов съёмки и цифровой фотокамеры (ЦФК) с держателем для светофильтров, смена которых происходит вручную. Сочетания сменных фильтров и фильтров матрицы ЦФК образуют фильтры «виртуальных сенсоров» МСК. На рис. 1, б, в приведены их спектральные характеристики, а также спектр осветителя.



**Рис. 1.** Система мультиспектральной съёмки: а) взаимное расположение основных компонентов (1 — осветитель, 2 — вакуумный стол с тестовой шкалой (ТШ), 3 — ЦФК с держателем светофильтров); б) спектр осветителя на основе ГЛН с интерференционным фильтром; в) спектральные чувствительности 11-ти виртуальных сенсоров системы

Стабилизированный источник питания в осветителе и инерционность ГЛНИФ исключают флуктуации светового потока (экспозиции) в последовательности кадров, характерные для импульсного освещения [4]. Спектральные и фотометрические свойства ГЛНИФ Decostar 51 Cool Blue подробно рассмотрены в [12]. Вакуумный стол фиксирует объект-оттиск в определённой плоскости и устраняет его локальные деформации, тем самым улучшая фокусировку и равномерность распределения освещения.

Эксперимент заключается в последовательной съёмке экспериментальных объектов через набор фильтров. ЦФК работает в ручном режиме с фиксированным временем экспозиции. Экспериментальные объекты — тестовая шкала профилирования (ТШ) из 1944 полей (идентичная использованной в работах [8, 11]),

незапечатанный лист бумаги аналогичного формата и стандартная шкала ColorChecker (CCh) из 24 полей. По аналогии с [8, 11] для контроля влияния автотипной структуры оттиска ТШ распечатывалась в трёх форматах А4, А5, А6. МСС различных форматов проводилась при фиксированном освещении, положение камеры — изменялось, что, естественно, вносило изменения в распределение освещённости по полю кадра.

## 2. Экстраполяционное определение уровня чёрного

Наличие отличного от нуля уровня ТЗ, соответствующего низкому световому потоку неспособному к регистрации, характерная особенность CMOS-сенсоров ЦФК. Автоматическое вычитание этого «уровня чёрного» из ТЗ обычно происходит одновременно с конвертацией снимков из RAW в стандартные графические форматы. Точность этой процедуры как правило недостаточна для последующего использования данных в решении обратных задач [1]. В работах [3, 4] для нахождения уровня чёрного использован специально отснятый кадр с объективом закрытым крышкой.

Особенностью данной работы является определение уровня чёрного путём экстраполяции тоновых значений полей стандартной шкалы (шести нейтральных серых полей CCh, с 19-го по 24-е). МСК — линейное устройство, в этом случае для произвольного канала в МСИ можно записать систему уравнений:

$$\begin{cases} \langle t_i^{gs} \rangle = a_i r_i^{gs} + b, \\ i = \overline{1, 6} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\langle t_i^{gs} \rangle$  — усреднённое тоновое значение пикселей из зоны взятой в пределах  $i$ -го поля нейтральной серой шкалы (gray scale),  $b$  — уровень чёрного,  $r_i^{gs}$  — теоретический уровень регистрируемой сенсором доли светового потока, отражённого от  $i$ -го поля,  $a_i$  — коэффициент включающий локальную освещённость  $i$ -го поля и, одновременно, стыкующий размерность  $\langle t_i^{gs} \rangle$  и  $b$ . Рассчитать  $r_i^{gs}$  можно по спектрам источника освещения, коэффициента отражения  $i$ -го поля и спектральной чувствительности сенсора, соответствующего каналу МСИ.

Из набора уравнений (1) можно было бы легко найти наилучшую квадратичную оценку уровня чёрного  $b$  для случая абсолютно равномерного освещения всех точек объекта и отсутствия виньетирования объектива, когда  $a_i$  равны между собой. Однако на практике это не так и  $a_i$  так же являются неизвестными. В этом случае число переменных в системе (1) превышает число уравнений и её необходимо дополнить.

Это можно сделать, записав аналогичные (1) уравнения для тех же зон мультиспектрального снимка незапечатанного листа:

$$\begin{cases} \langle t_i^{wp} \rangle = a_i r_i^{wp} + b, \\ i = \overline{1, 6} \end{cases} \quad (2)$$

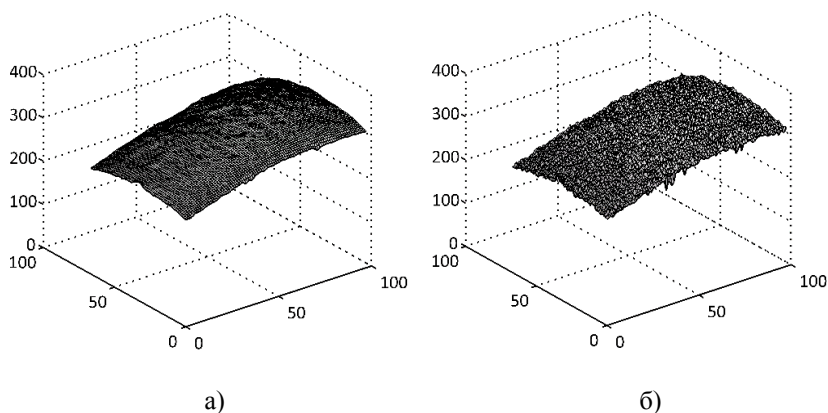
где  $\langle t_i^{wp} \rangle$  — усреднённое тоновое значение пикселей из зоны изображения, аналогичной зоне в уравнении (1) (wp — white paper) и  $r_i^{wp}$  — так же теоретический же теоретический же теоретический же теоретический же теоретический же теоретический уровень регистрируемой сенсором доли светового потока. Все  $r_i^{wp}$  в (2) априори одинаковы, и для простоты можно обозначить  $r_i^{wp}$ , а  $a_i$  в (1) и (2) одинаковы, поскольку освещённость в каждой конкретной точке снимаемого поля считается постоянной для всей экспериментальной серии кадров, независимо от смены объектов. Тогда уравнения (1) и (2) объединяются в избыточную систему. В матричном виде эта система выглядит так:

$$\begin{bmatrix} r_1^{gs} & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & r_6^{gs} & 1 \\ r^{wp} & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & r^{wp} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_6 \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle t_1^{gs} \rangle \\ \vdots \\ \langle t_6^{gs} \rangle \\ \langle t_1^{wp} \rangle \\ \vdots \\ \langle t_6^{wp} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

Нахождение наилучшей квадратичной оценки уровня чёрного  $b$  из системы уравнений (3) не составляет труда. Значения  $a_i$  для дальнейших расчётов не нужны и могут быть просто проигнорированы.

### 3. Технология обработки изображений

Технология обработки МСИ с учётом поставленной цели модернизирована по сравнению с [8]. После конвертации всех изображений из RAW-формата ЦФК, с отключёнными автоматическим вычитанием чёрного и гамма-коррекцией, производится совмещение выбранных слоёв в МСИ. Затем следует коррекция неравномерности. Для этого из всех тоновых значений МСИ вычитается определённый из (3) уровень чёрного, а полученные значения умножаются на поправочный коэффициент, зависящий от освещённости в данной точке поля. Он определяется по тоновым значениям из МСИ незапечатанного листа рис. 2, а.



**Рис. 2.** Пример распределения тоновых значений по площади кадра:  
а) без сглаживания; б) после сглаживания

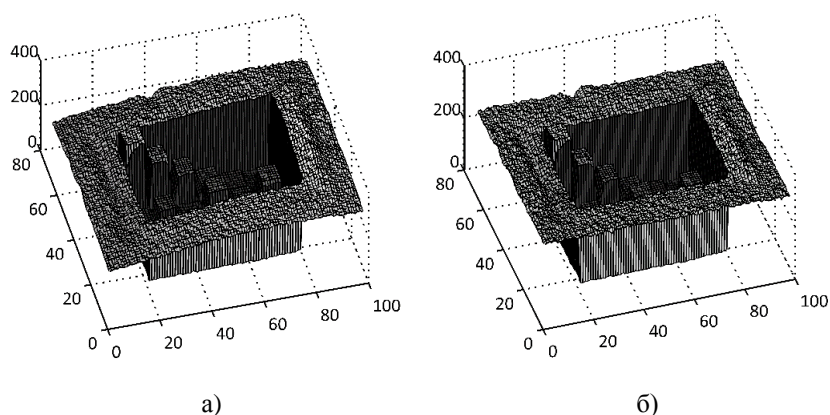
На рис. 2 видна неравномерность, также заметны шумы. Перед расчётом индивидуальных поправочных коэффициентов для каждого пикселя требуется сглаживание. В противном случае умножение тоновых значений приведёт к повышению уровня шумов и искажению распределения. На рис. 2, б приведён пример распределения ТЗ после сглаживания, которое проводилось путём простейшей фильтрации усреднением по квадратному окну вокруг каждого пикселя.

Индивидуальная коррекция для каждого пикселя  $c_{ij}$  рассчитывается по формуле:

$$c_{ij} = \frac{\langle t_{ij}^{wps} \rangle}{t_{ij}^{wps}} \quad (4)$$

где  $i, j$  — индексы, определяющие положение пикселя в выбранном слое МСИ,  $t_i^{wps}$  — соответствующее ТЗ из сглаженного (white paper smoothed) изображения (рис. 2 б), а усреднение  $\langle t_i^{wps} \rangle$  — производится по всему слою МСИ.

На рис. 3 приведены примеры распределения ТЗ в соответствующем слое МСИ шкалы ССh до и после выравнивания, которое произведено умножением ТЗ каждого пикселя на  $c_{ij}$ .



**Рис. 3.** Пример распределения тоновых значений по площади кадра:  
а) без сглаживания; б) после сглаживания

Дальнейшая обработка выравненных МСИ осуществляется по стандартной схеме, изложенной в работе [8].

#### 4. Результаты

В таблице 1 приведено сравнение результатов данной работы с предшествующими в отношении цветовых различий. В первом пункте таблицы приведены результаты аппроксимации спектров отражения с помощью использованного при реконструкции функционального базиса [13]. В работах [6, 8, 10] этот базис хорошо зарекомендовал себя при решении аналогичных задач. Точность результатов, полученных с его помощью в ряде практических случаев, не ниже чем при полиномиальной аппроксимации [14], и даже при использовании главных компонент [6]. Приведённые данные взяты из работы [8], Их можно считать естественным пределом точности решения нашей задачи реконструкции.

Поскольку эксперименты по мультиспектральной съёмке с освещением ГЛНИФ проводились нами впервые, для сравнения взяты результаты съёмки на том же оборудовании, но с импульсным освещением [8]. Из сравнения пунктов 2 и 3 табл. 1, очевидно, что результаты обладают сопоставимым уровнем точности в отношении средних значений  $\Delta E_{ab}$  и несколько уступают по максимальным. Однако результаты данной работы, по сравнению с остальными, получены при существенно меньшем объёме калибровочного набора — шесть полей вместо нескольких десятков. Таким образом применение предложенной технологии коррекции ТЗ можно считать оправданным.

Таблица 1. Сравнительная оценка цветовых различий между реконструированными и контрольными спектрами в работах

№ п/п	Источник информации	Тип освещения	Калибровка (шкала / кол. полей)	Цветовое различие, $\Delta E_{ab}$				
				Шкала CCh		Тестовая шкала (ТШ)		
				средн	макс	формат	средн	макс
1	Аппроксимация, работа[8]	Ксеноновая вспышка	CCh / 24	0,17	0,39	—	0,22	0,59
2	Данная работа	ГЛНИФ	CCh / 6	1,54	4,19	A4	6,39	23,43
				1,98	5,47	A5	5,00	24,55
				1,66	4,94	A6	4,29	27,67
3	Работа [8]	Ксеноновая вспышка	CCh / 24	1,39	2,69	A4	6,99	17,30
			ТШ / 44	—	—		5,75	18,32
			ТШ / 144	—	—		3,91	14,76
			ТШ / 244	—	—		3,68	15,68
			ТШ / 44	—	—	A6	7,51	28,67
			ТШ / 144	—	—		4,10	16,23
			ТШ / 244	—	—		4,35	14,00
4	Работа [4]	ГЛН	—	1,48*	2,70*	TE221**	2,13*	7,35*

\* — для оценки цветового различия использовалась формула  $\Delta E_{00}$ ;

\*\* — стандартная цветовая шкала TE221, содержит 283 поля.

Следует так же отметить, что приведённые значения цветовых различий с некоторой долей условности можно считать сопоставимыми с работой [4] (п. 4 в табл. 1). Непосредственное сравнение затруднено тем, что использование  $\Delta E_{00}$  формулы в некоторых случаях даёт меньшие цветовые различия по сравнению с  $\Delta E_{ab}$ , особенно в насыщенных цветах. Это в свою очередь ведёт к снижению в первую очередь максимального, а также среднего значения в табл. 1. Кроме того стандартная шкала TE221 не является автотипным оттиском. Так же из [4] не ясен объём калибровочного набора полей, так как основное внимание уделяется устранению неодинаковости энергий импульсов вспышки.



## Выводы

Предложенная методика коррекции тоновых значений в мультиспектральном изображении дала положительный эффект. Калибровочный набор сокращён с нескольких десятков до шести полей стандартной шкалы, при сопоставимом уровне точности. Достигнутый прогресс позволяет надеяться на получение решений, пригодных для промышленного применения. Это возможно при дальнейшем совершенствовании экспериментального оборудования и метода обработки данных.

## Список литературы

1. Теребиж В. Ю. Введение в статистическую теорию обратных задач. М.: Физматлит, 2005. 376 с.
2. Bertero M., Boccacci P. Introduction to Inverse Problems in Imaging. 1 edition. Bristol, UK ; Philadelphia, Pa: CRC Press, 1998. 352 p.
3. Imai F. H., Rosen M. R., Berns R. S. Comparison of Spectrally Narrow-Band Capture Versus Wide-Band with a Priori Sample Analysis for Spectral Reflectance Estimation // Color Imaging Conf. 2000. Vol. 2000, № 1. P. 234–241.
4. Brauers J., Helling S., Aach T. Multispectral Image Acquisition with Flash Light Sources // J. Imaging Sci. Technol. 2009. Vol. 53, № 3.
5. Арапов С. Ю., Арапова С. П., Тягунов А. Г. Экспериментальный комплекс мультиспектральной фотосъёмки на основе стандартной цифровой камеры // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2014. № 5. С. 45–54.
6. Псевдоинверсная обработка данных мультиспектральной фотосъёмки в стационарных зонах изображения / А. Ш. Сыдихов [и др.] // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления»: сборник докладов (Екатеринбург, УрФУ, 15 декабря 2014 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 179–185.
7. Мультиспектральная фотосъёмка с помощью стандартной цифровой фотокамеры / Е. Н. Шавкутенко [и др.] // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления»: сборник докладов (Екатеринбург, УрФУ 15 декабря 2014 г.). Екатеринбург: УрФУ. 2015. С. 127–134.
8. Применение мультиспектральной фотосъёмки для считывания шкал цветового контроля процесса печати / С. Ю. Арапов [и др.] // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (САИ-2016): сборник научных трудов по материалам I Международной конференции (УрФУ, Екатеринбург, 5–6 мая 2016 г.). Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2016. С. 17–22.

9. Мультиспектральная фоторегистрация кларификационного эффекта при RGB-светодиодном освещении / С. Ю. Арапов [и др.] // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (САИ-2016): сборник научных трудов по материалам I Международной конференции (УрФУ, Екатеринбург, 5–6 мая 2016 г.). Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2016. С. 11–16.
10. Оценка погрешности реконструкции спектров отражения тестовых полей по данным мультиспектральной фотосъемки / С. Ю. Арапов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2015. № 3. С. 68–77.
11. Мультиспектральная фотосъемка с использованием многоканального светодиодного кластера / С. Ю. Арапов [и др.] // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (САИ-2016): сборник научных трудов по материалам I Международной конференции (УрФУ, Екатеринбург, 5–6 мая 2016 г.). Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2016. С. 7–10.
12. Арапов С. Ю., Арапова С. П., Тарасов Д. А. Оценка применимости лампы Decostar 51 CoolBlue 50W 360 (Osram) в качестве специализированного источника излучения в полиграфии // Светотехника. 2015. № 4. Р. 67–68.
13. Моделирование спектров отражения на основе базиса из функций типа интеграла ошибок / С. Ю. Арапов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2012. № 6. С. 017–029.
14. Моделирование спектров отражения суперпозицией полиномов / Д. А. Тарасов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2012. № 5. С. 059–066.