

# МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ ФОТОСЪЁМКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКАНАЛЬНОГО СВЕТОДИОДНОГО КЛАСТЕРА

Арапов С.Ю., Дубинин И.С., Арапова С.П., Мезенцева С.Г.  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
пр. Мира, 32, Екатеринбург, Свердловская обл., 620002, Россия,  
тел.: (343) 375-46-30, e-mail: arapov66@yandex.ru

*Аннотация* — Представлены результаты эксперимента по применению светодиодного кластера для мультиспектральной фотосъёмки без использования светофильтров. Рассмотрены преимущества и недостатки данного способа по отношению к традиционной съёмке через систему фильтров. Указаны источники возникновения случайной и систематической погрешностей. Обсуждаются перспективы использования данного способа мультиспектральной съёмки при создании контрольно-измерительной аппаратуры для полиграфии.

## MULTISPECTRAL PHOTOGRAPHY USING MULTI-CHANNEL LED CLUSTER1

Arapov S.Yu., Dubinin, I.S., Arapova S.P., Mezentseva S.G  
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin  
pr. Mira, 32, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, 620002, Russian Federation  
ph.: (343) 375-46-30, e-mail: arapov66@yandex.ru

*Abstract* — The results presented of an experiment of multispectral imaging the using led clusters without the use of filters. The advantages and disadvantages of this method relative to conventional survey through the filter system. The sources of random and systematic errors demonstrated. Discusses the prospects of using this method of multispectral imagery in creating instrumentation for printing.

### I. Введение

Активное исследование возможностей мультиспектральной съёмки (МСС) для решения большого круга практических задач началось в 90-е годы, одновременно с широким распространением цифровых фотокамер (ЦФК) снабжённых полупроводниковыми сенсорами. ЦФК быстро стали доступным средством регистрации изображений, а персональные компьютеры дали большие возможности по их обработке.

Для МСС использовались как монохроматические [1–3], так и трихроматические камеры [4] в комплексе с поглощающими или интерференционными светофильтрами.

В последнее время появились и начали развиваться исследования с использованием новых систем МСС, основанных на использовании мультиспектрального освещения светоизлучающими диодами (СИД) [5–7].

Интерес к таким решениям обусловлен рядом преимуществ. Освещение снимаемых объектов СИД легко управляется электронными средствами. Это позволяет отказаться от механических систем смены фильтров и даёт дополнительные возможности управления экспозицией. Для стандартных трихроматических камер [7] становится возможной скоростная съёмка, основанная на сочетании спектральных характеристик фильтров сенсора и СИД с целью получения из каждого отснятого кадра сразу трёх слоёв мультиспектрального изображения (МСИ). Теоретически системы МСС на основе СИД могут конкурировать по спектральному разрешению со своими предшественниками на интерференционных фильтрах. Следует отметить, что наиболее распространённый в повседневной репродукционной и полиграфической практике спектрофотометр i1Pro (X-Rite) обладает невысоким физическим спектральным разрешением (10 нм).

В то же время для систем МСС на основе СИД имеются ограничения. Необходимость полной изоляции от внешнего освещения во время экспозиции ограничивает размеры снимаемых объектов и исключает съёмку вне помещений. Дополнительные сложности связаны с требованием достижения равномерной освещённости снимаемой поверхности [6, 7]. Вопросы улучшения точности реконструкции спектров по данным МСС на основе СИД во многом схожи с аналогичными при использовании узкозональных фильтрующих элементов [3, 8]. В работе [8] показано, что несмотря на теоретически больший по сравнению широкополосными системами потенциал, узкополосные системы МСС не всегда дают лучшую точность реконструкции спектров.

По-видимому, основными направлениями где оптимально использование МСС на основе СИД, являются лабораторные исследования, медицинская диагностика и специализированные системы технологического контроля, в том числе в полиграфическом производстве.

Целью данной работы является выявление и исследование факторов, определяющих точность экспериментальных результатов реконструкции спектров отражения по данным МСС с применением СИД.

### II. Схема и технология проведения эксперимента

Основной элемент фотосъёмочной установки — мультиспектральный светодиодный кластер (МСК) с девятью независимыми спектральными каналами, управляемый с помощью разработанного программного обеспечения. Спектральные характеристики МСК и его возможности обсуждались в работе [9].

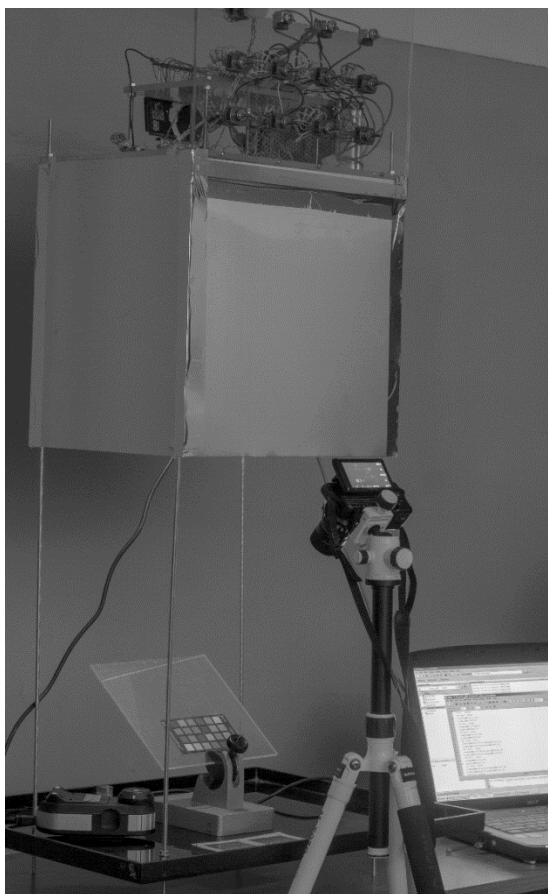


Рис. 1. Мультиспектральная фотосъёмочная установка: 1 — управляемый мультиспектральный СИД-кластер, 2 — ЦФК Sony NEX-5N на штативе, 3 — подставка для фотографируемых образцов, 4 — шкала ColorChecker®, 5 — спектрофотометр i1Pro, 6 — компьютер для управления СИД-кластером и спектрофотометром.

Съёмка производится закреплённой на независимом штативе ЦФК Sony NEX-5N с репродукционным объективом Vega-11Y (50 F 2,8). Для данной камеры известны спектральные характеристики сенсора, и она хорошо зарекомендовала себя в предыдущих исследованиях [10]. Внешний вид мультиспектральной фотосъёмочной установки представлен на рис. 1.

Для размещения печатных оттисков и стандартных тестовых шкал в освещаемой МСК зоне предусмотрено плоская подставка с возможностью регулировки по углу наклона. Съёмка производится по нормали, а освещение — под углом  $45^\circ$  к поверхности подставки. Таким образом ход лучей в эксперименте приближен к стандартной геометрии  $45^\circ/0$ , рекомендованной для спектральных измерений в полиграфии. Использование альтернативной геометрии  $0/45^\circ$  с горизонтальным расположением объектов так же возможно, но требует применения Tilt-объектива для устранения перспективных искажений [6].

Спектральные измерения использующихся в работе шкал и освещения производятся спектрофотометром i1Pro (X-Rite) в комплексе с открытым программным обеспечением Argyll CMS. Такое сочетание даёт возможность регистрации спектров в интервале 370–730 нм. Возможно использование режима «высокого разрешения» с шагом дискретизации по длине волны 3,33 нм, что приближается

к рекомендациям международной комиссии по освещению (МКО) при работе со спектрами СИД. В то же время, спектральные характеристики имеющейся ЦФК известны с шагом в 10 нм и такая же дискретизация принята в полиграфии для измерения спектров отражения, поэтому режим «высокого разрешения» не используется. Всего в данной работе рассматривается 29 спектральных зон в интервале 400–680 нм, поскольку за пределами указанного интервала чувствительность ЦФК близка к нулю. В результате в МСК не используется один ультрафиолетовый спектральный канал. Итоговые спектральные характеристики фотосъёмочной установки представлены на рис. 2.

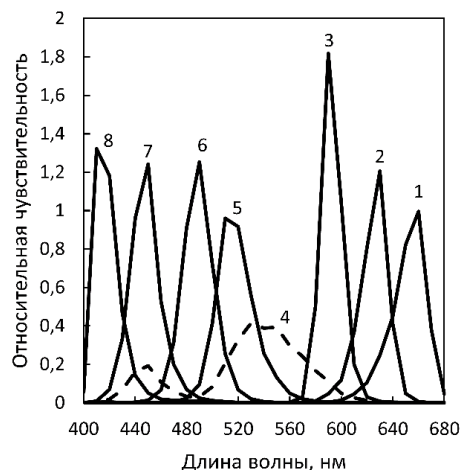


Рис. 2. Спектральные характеристики виртуальных сенсоров фотосъёмочной установки. Сенсоры 1–8 пронумерованы начиная с длинноволновых, в том же порядке как они используются в расчетах.

Основной экспериментальный объект — стандартная тестовая шкала ColorChecker® (CCh), состоящая из 24 полей. Шкала располагается на подставке, расположенной перпендикулярно оптической оси объектива камеры, после чего производится настройка экспозиции с целью устранения превышения динамического диапазона сенсора. Все настройки камеры переводятся в ручной режим, чтобы избежать неконтролируемого вмешательства автоматики. Настройка резкости изображения осуществляется заранее, путём перемещения камеры, поскольку репродукционный объектив Vega-11Y не обладает возможностью фокусировки.

Съёмочный процесс заключается в последовательном переключении каналов МСК с заранее настроенными уровнями яркости, оптимизированными для дальнейшей обработки, и съёмки шкалы с записью в формате RAW. Затем на место шкалы помещается спектрофотометр и производится повторный цикл переключения каналов МСК с замером спектральной облучённости.

Обработка RAW файлов осуществляется в пакетном режиме (с помощью bat-файла) утилитой 4channels из открытого пакета программ LibRAW: `4channels -B <имяфайла>.argw`, где ключ -B означает отключение вычитания уровня чёрного. Из полученных таким образом tiff-файлов, соответствующих группам байеровских пикселей R, G1, G2, B, отбираются необходимые, и объединяются в многослойное мультиспектральное изображение (МСИ). Совмещение слоёв

производится по контрастным элементам, присутствующим на шкале.

Затем следуют расчёты теоретических тоновых значений пикселей калибровочной шкалы для каждого сенсора (слоя МСИ) и сопоставление их с экспериментальными на калибровочной диаграмме (рис. 3). Калибровочная диаграмма позволяет оценить «качество» полученной системы, её линейность, наличие шумов и искажений.

После этого становится возможным заключительный этап — определение конвертирующей матрицы и реконструкция спектров отражения. Реконструированные спектры позволяют рассчитать цветовые координаты полей и проанализировать погрешность их определения по отношению к контрольным значениям

### III. Расчётные методы обработки полученных снимков

Калибровочная диаграмма мультиспектральной фотосъёмочной установки представлена на рис. 3. Вид диаграммы существенно отличается от приведённой в работе [10], где используются широкозональные сенсоры. Все сенсоры за исключением восьмого демонстрируют практически одинаковое поведение, при этом наблюдается значительно больший чем в [10] разброс точек. Уровень чёрного практически совпадает для всех сенсоров.

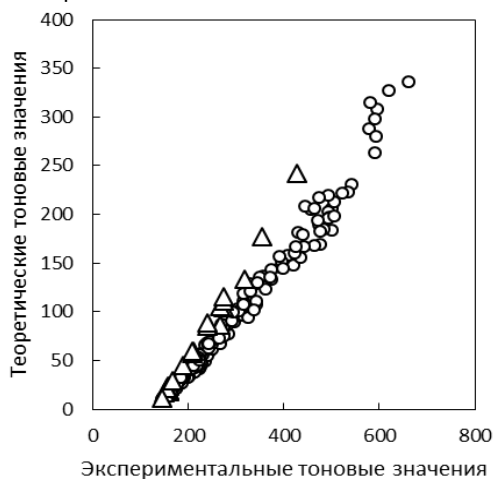


Рис. 3 Калибровочная диаграмма сенсоров фотосъёмочной установки,  $\Delta$  — сенсор 8,  $\circ$  — остальные сенсоры. Пересечение прямых с осью абсцисс дают значения уровня чёрного.

Вид калибровочной зависимости (рис. 3) говорит о невысоком качестве калибровки. Вероятнее всего большой разброс точек означает, что в спектральных данных ЦФК присутствуют ошибки, которые нивелируются в широкозональной технологии.

Другой проблемой данного эксперимента является недостаток мультиспектральной информации.

В работе используются 8 сенсоров (в [10, 11] — 14 сенсоров). Использование базиса из восьми функций (Базис-8) как в [10–12] в этом случае приводит к отсутствию «избыточности» данных и неустойчивости решений. Устранение проблемы возможно путём уменьшения числа базисных функций, при этом желательно минимизировать потерю точности аппроксимации спектров. В данной работе используется базис из шести функций (Базис-6), представленный на рис. 4.

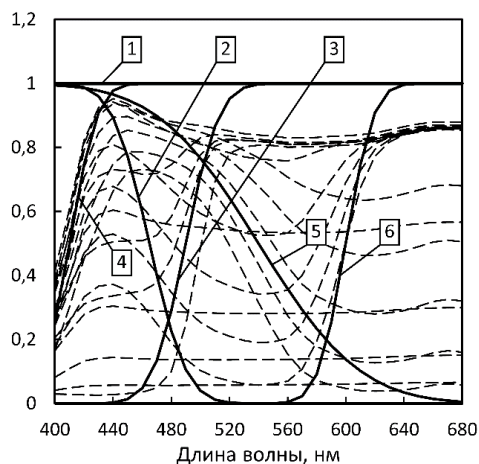


Рис. 4. Набор из шести базисных функций (Базис-6) для аппроксимации спектров

Пунктиром показаны типичные спектры для автотипной печати колорантами СМУК.

Базис-6 также как и Базис-8 сформирован из функций типа интеграла ошибок, но с другим масштабированием и сдвигом аргумента. Форма базисных функций таким образом адаптировалась к типичным спектрам отражения автотипной печати. На рис. 5 представлены примеры аппроксимации 12-и полей шкалы ССh. Данные по цветовым отклонениям  $\Delta E_{ab}^*$  приводятся в сводной табл. 1.

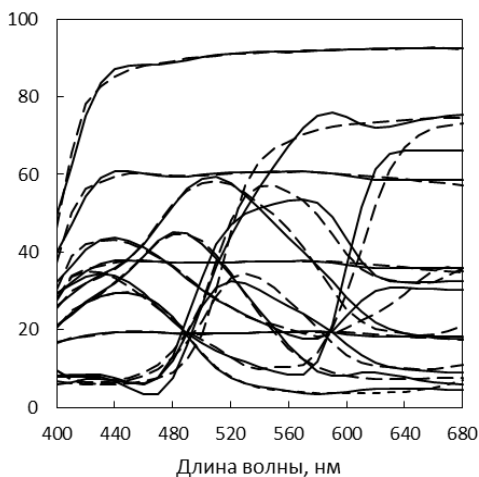


Рис. 5. Аппроксимация полей 5,6,11,13,14,16–22 шкалы ССh (Базис-6)

Пунктиром показаны контрольные спектры, измеренные спектрофотометром.

Поскольку предложенные в [11] методы обработки эксперимента основаны непосредственно на спектральных данных ЦФК и результатах калибровки, выбор сделан в пользу другого подхода.

Спектры в виде векторов-столбцов  $\mathbf{r}$  определяются по тоновым значениям  $t$  из пикселя МСИ с помощью выражения:

$$\mathbf{r} = \mathbf{B}(\mathbf{A}_{\text{теор}} \mathbf{T}_{\text{кал}}^+) \mathbf{t}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{B}$  — матрица, столбцами которой являются элементы Базиса-6 (рис. 4),  $\mathbf{T}_{\text{кал}}^+$  — матрица тоновых значений из изображений полей шкалы ССh на МСИ, подвергнутая псевдообращению Мура-Пенроуза.  $\mathbf{A}_{\text{теор}}$  — матрица коэффициентов разложения контрольных спектров полей  $\mathbf{S}$  шкалы ССh по Базису-6:

$$A_{\text{теор}} = B^+S. \quad (2)$$

#### IV. Результаты

Результаты реконструкции спектров полей шкалы ССh по формуле (1) представлены на рис. 6.

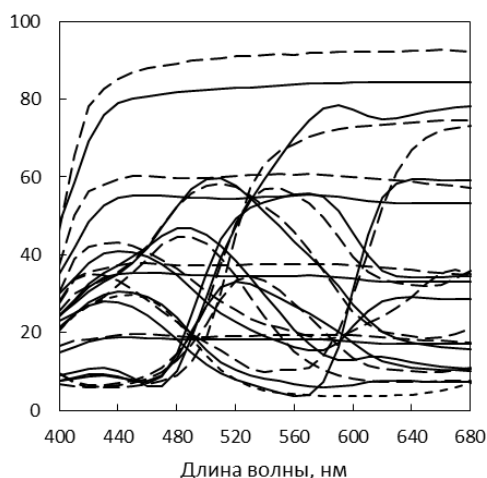


Рис. 6. Реконструкция полей 5,6,11,13,14,16–22 шкалы ССh по формуле (1)

Пунктиром показаны контрольные спектры, измеренные спектрофотометром.

Очевидно, что реконструкцию (рис. 6) нельзя назвать удачной. Заметны существенные отличия от контрольных спектров, в основном в сторону уменьшения коэффициента отражения (снижения яркости). Цветовые отличия  $\Delta E_{ab}^*$  рассмотренных в работе наборов спектров также оказались значительными, они представлены в сводной табл. 1.

Таблица 1

Цветовые отличия  $\Delta E_{ab}^*$  от контрольных значений по полям шкалы ССh для различных наборов спектров

Набор спектров	$\Delta E_{ab}^*$ , средн.	$\Delta E_{ab}^*$ , макс.	$\Delta E_{ab}^*$ , мин.
Реконструкция по данным МСС (Базис-6)	7,51	41,69	0,33
Аппроксимация (Базис-6)	2,31	8,87	0,09
Аппроксимация (Базис-8)	0,17	0,39	0,01

В то же время следует отметить, что при реконструкции по по формулам (1–2) форма спектров воспроизводится достаточно правдоподобно.

#### V. Выводы

Технология узкополосной мультиспектральной съемки с помощью СИД, несмотря на свою привлекательность, сложна тем, что предъявляет повышенные требования к точности спектральных данных элементов мультиспектральной системы: СИД, ЦФК, калибровочных шкал. Также важна равномерность освещения образцов.

В то же время простота управления СИД делает мультиспектральную съемку на их основе перспективным направлением создания контрольно-измерительного оборудования, применимого в полиграфии.

#### VI. Литература

- [1] Burns P.D., Berns R.S. Analysis Multispectral Image Capture // Color Imaging Conf. 1996. Vol. 1996, № 1. P. 19–22.
- [2] Burns P.D., Berns R.S. Image Noise and Colorimetric Precision in Multispectral Image Capture // Color Imaging Conf. 1998. Vol. 1998, № 1. P. 83–85.
- [3] Hardeberg J.Y., Schmitt F., Brettel H. Multispectral image capture using a tunable filter // Proc. Spie. 2000. Vol. 3963. P. 77.
- [4] Imai F.H., Berns R.S. A Comparative Analysis of Spectral Reflectance Reconstruction in Various Spaces Using a Trichromatic Camera System // Color Imaging Conf. 1999. Vol. 1999, № 1. P. 21–25.
- [5] Wang H.-C., Chen Y.-T. Optimal lighting of RGB LEDs for oral cavity detection // Opt. Express. 2012. Vol. 20, № 9. P. 10186–10199.
- [6] Boher P. et al. High spatial resolution imaging colorimeter and gloss-meter for measurements of small parts // Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, 2013. Vol. 2013. P. 96–101.
- [7] Shrestha R., Hardeberg J.Y. An experimental study of fast multispectral imaging using LED illumination and an RGB camera // Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, 2015. Vol. 2015. P. 36–40.
- [8] 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.
- [9] Арапова С.П., Арапов С.Ю., Мезенцева С.А. Управляемый мультиспектральный светодиодный кластер для репродукционных исследований // Информация: передача, обработка, восприятие: материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 104–111.
- [10] Арапов С.Ю., Арапова С.П., Тягунов А.Г. Экспериментальный комплекс мультиспектральной фотосъемки на основе стандартной цифровой камеры // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2014. № 5. С. 45–54.
- [11] Арапов С.Ю. и др. Оценка погрешности реконструкции спектров отражения тестовых полей по данным мультиспектральной фотосъемки // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2015. № 3. С. 68–77.
- [12] А.Ш. Сыдыхов и др. Псевдоинверсная обработка данных мультиспектральной фотосъемки в стационарных зонах изображения // Сборник докладов Международной конференции «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 179–185.