

Измерение длины волны узкополосного излучения при обработке цифровых фотографий в raw-формате

А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов

Изложена методика измерения средней длины волны узкополосного излучения в диапазоне 455–625 нм по изображению излучающей поверхности. Используются данные с матрицы фотоаппарата, не обработанные его встроенным процессором (RAW-формат). Метод применяется для определения параметров отклика голографических сенсоров. В зависимости от длины волны и яркости участка изображения среднеквадратичное отклонение длины волны составляет 0,3–3 нм.

Ключевые слова: колориметрия, определение длины волны, цифровой фотоаппарат, RAW-формат.

Предложенный в [1, 2] колориметрический метод использовался для работы с цифровыми изображениями узкополосно излучающих поверхностей – голограмм, записанных на различных носителях. Работа проводилась с графическими форматами BMP, TIFF, JPEG. Чтобы знать, как конкретный фотоаппарат отображает излучение разных длин волн, проводилась его так называемая спектральная градуировка, поскольку выяснилось, что соотношение откликов цветовых каналов изображения довольно сложным образом зависит не только от длины волны падающего света, но и от экспозиции. Была разработана методика построения спектральной градуировочной характеристики, представляющей собой поверхность в трехмерном пространстве, которая связывает цветность и яркость, регистрируемые одним пикселем, с длиной волны воздействовавшего на этот пиксель узкополосного излучения. В результате фотоаппарат мог использоваться как спектральный прибор, причем рабочие диапазоны длин волн и интенсивностей были очень небольшими вследствие малости участка монотонности характеристических кривых. Реально работать можно было только в диапазоне 570–600 нм.

В настоящей работе колориметрический метод модифицирован для возможности работы практически во всей видимой области спектра. При работе с цифровыми изображениями, полученными с помощью фотокамеры в любых графических форматах (например, BMP, TIFF, JPEG), информация о регистрируемом излучении (интенсивность, цвет) существенно изменяется при обработке встроенным процессором фотоаппарата. Соотношения интенсивностей и цветопередачу конструкторы пытаются сделать такими, чтобы цифровое изображение максимально походило на воспринимаемую человеческим глазом картину. Например, относительная яркость точек изображения изменяется для приближения эффективной светочувствительности камеры к логарифмической чувствительности глаза.

Для измерительных целей более пригоден необработанный RAW-формат. Без конвертации он не предназначен для визуального представления. Кроме технических описаний условий съемки и данных о камере, RAW-файл содержит массив оцифрованных данных от каждого элемента светочувствительной матрицы фотоаппарата. Интенсивность сигнала отображается линейно в области до 58 дБ [3]. Цвет для каждого пикселя на данном этапе получения изображения не определен, есть только сведения о расположении матрицы байеровских фильтров для используемой фотокамеры. Обработка данных встроенным процессором фотоаппарата или компьютерными программами, визуализирующими RAW-изображения (Photoshop, ACDSee и др.), переводит цветовой охват камеры в систему sRGB, что вызывает некоторые побочные эффекты. Например, при регистрации фотокамерой монохроматического излучения с различными длинами волн цветовой тон цифрового изображения для длин волн 540–570 нм остается постоянным. Кроме того, в далекой красной и фиолетовой областях спектра соотношение откликов цветовых каналов сильно изменяется.

На рис.1 показано, как изменяется соотношение сигналов в цветовых каналах и, следовательно, функция цветового тона при обработке зарегистрированного матрицей изображения непрерывного спектра, сформированного с помощью диспергирующего элемента [1, 2], встроенным процессором фотоаппарата. Градуировка по длинам волн осуществлялась по линиям ртутной лампы, наложенным на сплошной спектр. Полуширина линий на изображении составляла около двух пикселей, расстояние между линиями желтого дублета (577 и 579 нм) – 10 пикселей. На рис.1,а представлено соотношение интенсивностей в цветовых каналах изображения, полученного непосредственно с матрицы фотоаппарата, без нелинейной обработки (для удобства сравнения обрезан постоянный фон и величины сигналов в каналах из 12-битного представления приведены к 8-битному – от 0 до 255 уровней). На рис.1,б показаны сигналы в цветовых каналах того же кадра, взятого из программы просмотра ACDSee без какой-либо дополнительной коррекции изображения (Photoshop и встроенный процессор фотоаппарата дают такой же результат). Видно, что сигналы красного и синего сенсоров (рис.1,б) подавлены в центральной части

А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: kraiskii@sci.lebedev.ru

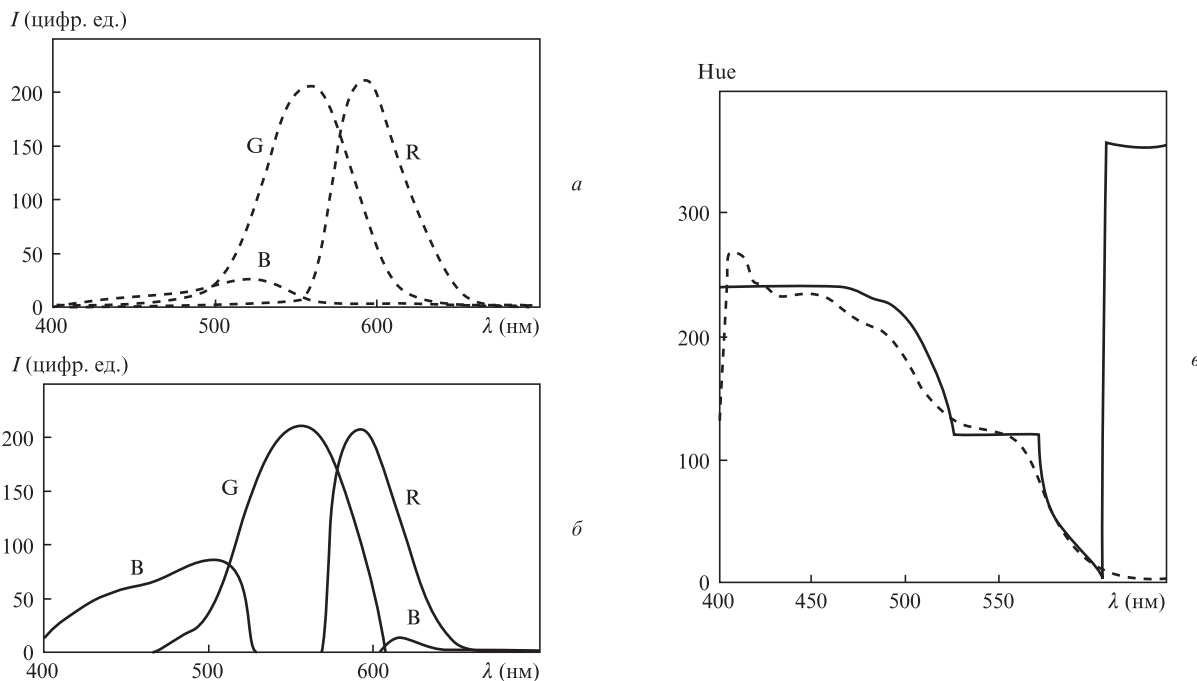


Рис.1. Цветовые компоненты изображения в непрерывном спектре (R-красная, G-зеленая, B-синяя) без обработки фотоаппарата процессором и программами визуализации (а) и после обработки фотоаппарата процессором (б), а также связь длины волны и функции цветового тона (Hue) для обработанного (сплошная линия) и необработанного (штриховая линия) снимков. Hue = 0 соответствует красному цвету, Hue = 120 – зеленому, Hue = 240 – синему.

спектра, так что в диапазоне длин волн 540–570 нм «разрешен» только зеленый сигнал. Следует иметь в виду, что чистые цвета в бытовой фотографии встречаются весьма редко. Это радуга, какие-либо периодические многослойные структуры (бабочки). Поэтому обычно это не бросается в глаза, но эффект искажения цветопередачи несомненно есть. В нашем случае такое свойство современных фотоаппаратов делает невозможным измерение длин волн в этом диапазоне с использованием фотографий в стандартных графических форматах. Кроме того, из рис.1,б видно, что относительная интенсивность синей компоненты сигнала матрицы увеличена в несколько раз, и в красной области, на границе чувствительности зеленых сенсоров, программно эмулируется слабый синий сигнал, придавая легкий фиолетовый оттенок изображению далекой красной области спектра.

Зависимости функции цветового тона точки изображения (рис.1,а, б) от длины волны представлены на рис.1,в. Сплошная кривая – это функция цветового тона для спектра в стандартном графическом формате. Основным недостатком цветопередачи на рис.1,б является наличие строго горизонтального участка в зеленом диапазоне, где цветовой тон остается постоянным и невозможно измерение длин волн. В необработанном снимке цветовой тон по длине волны изменяется монотонно в диапазоне 455–625 нм, и этот диапазон можно считать рабочим для определения длин волн.

Процедура градуировки фотоаппарата следующая. С различными экспозициями делается серия фотографий спектра (непрерывного, с наложенными на него опорными линиями) в формате RAW. С приемной матрицы фотоаппарата берется необработанный сигнал и разделяется на цветовые каналы с учетом расположения байеровских ячеек с соответствующими фильтрами. Координате в кадре ставится в соответствие длина волны. На рис.2

показана зависимость длины волны в спектре излучения от горизонтальной координаты (номера пикселя) для серии градуировочных фотографий. Для линейной аппроксимации зависимости использованы линии ртутного спектра 404.7, 435.8, 491.6, 546.1, 577.0 и 579.0 нм. После этого для каждой длины волны непрерывного спектра по фотографиям с разной экспозицией набираются варианты соотношения интенсивностей в цветовых каналах для различных яркостей изображения.

В результате после усреднения шумов получаем зависимость длины волны в изображении спектра от цветового тона и яркости изображения – своего рода градуировочную поверхность. Пример такой поверхности, полученной при градуировке фотоаппарата Canon EOS10D, показан на рис.3, где интенсивность $I = 1/3(I_R + I_G + I_B)$ изменяется в диапазоне 5–100, цветовой тон – в диапазоне 0–240, а длина волны определяется в диапазоне 455–625 нм. Зависимость длины волны от интенсивности очень слабая (в отличие от аналогичной функции для стандартных графических форматов [1,2]), в основном существенна зависимость длины волны от цветового тона.

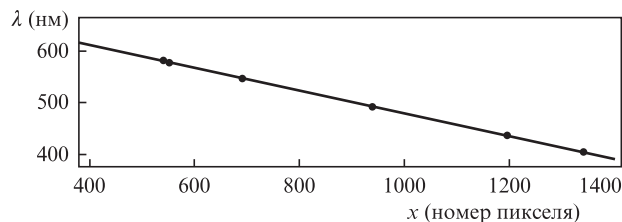


Рис.2. Зависимость длины волны в градуировочном спектре от горизонтальной координаты кадра (номера пикселя). Точки – данные ртутных линий, прямая – результат их линейной аппроксимации.

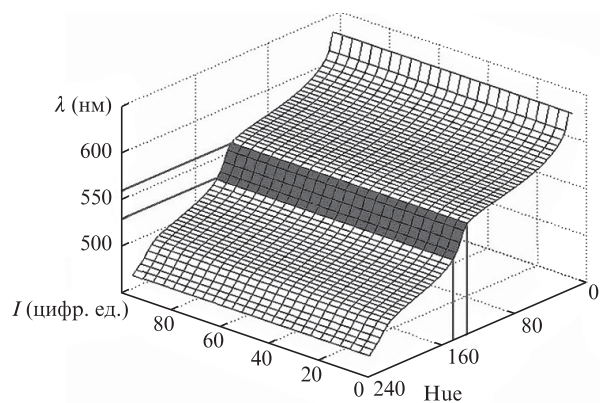


Рис.3. Градуировочная поверхность.

Проверка метода проводилась при измерении длин волн по изображению ртутного спектра и наложенного на него сплошного спектра лампы накаливания. На карте распределения длин волн по изображению с хорошей точностью воспроизводятся как длины волн ртутных линий, так и линейный характер зависимости длин волн в сплошном спектре от координаты (рис.4).

Среднеквадратичное отклонение длины волны составляет 0.3–3 нм. Величина ошибки зависит в основном от двух факторов. Во-первых, от яркости участка изображения: в случае слабой яркости изображения сильно возрастает шум и ухудшается точность определения длины волны. Во-вторых, от длины волны и от степени наклона градуировочной поверхности на соответствующем отрезке длин волн. В зеленой области (530–560 нм) небольшое изменение цветового тона (15 единиц) соответствует разнице в 30 нм по шкале длин волн (рис.3). Среднеквадратичное отклонение в этом диапазоне даже при достаточной интенсивности излучения составляет 1.0–2.0 нм. На желтом участке спектра градуировочная поверхность более пологая, на участке 570–580 нм цветовой тон изменяется почти на 40 единиц. На этом отрезке спектра длину

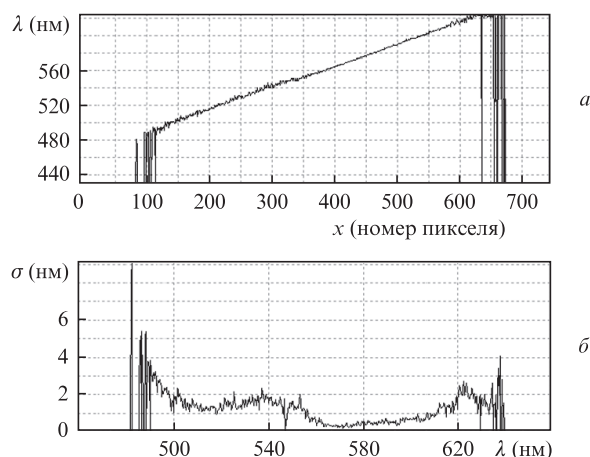


Рис.4. Рассчитанное распределение длин волн по сечению кадра в направлении дисперсии (а) и соответствующая зависимость среднеквадратичного отклонения длины волны (б).

волны можно определять с большей точностью, среднеквадратичное отклонение составляет 0.3–0.5 нм.

Описанный метод используется нами для измерения распределения по поверхности голограммы средней длины волны отраженного излучения. Таким образом можно следить за различными параметрами голографических сенсоров: степенью разбухания, однородностью гидрогелевой эмульсии, скоростью реагирования на изменение состава раствора и т.д.

Работа частично поддержана грантом в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине».

1. Крайский А.В., Миронова Т.В., Султанов Т.Т. и др. Патент РФ №2390738, приоритет от 21.05.2008.
2. Крайский А.В., Миронова Т.В., Султанов Т.Т. *Квантовая электроника*, **40** (7), 652 (2010).
3. Конник М.В., Манькин Э.А., Стариков С.Н. *Квантовая электроника*, **40** (4), 314 (2010).