ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2022, № 2, с. 73-78

_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ _____ ТЕХНИКА

УДК 681.772.2 + 621.3.011.711

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ЦИФРОВЫХ КАМЕР, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В БИОМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

© 2022 г. И. Г. Пальчикова^{*a*}, Е. С. Смирнов^{*a*,*}, Е. И. Соленов^{*b*}, И. А. Искаков^{*c*}

^а Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН Россия, 630058, Новосибирск, ул. Русская, 41 ^b Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики СО РАН Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 10 ^c Новосибирский филиал ФГАУ НМИЦ МНТК "Микрохирургия глаза им. акад. С.Н. Федорова" Минздрава России Россия, 630096, Новосибирск, Колхидская ул., 10 *e-mail: evgenii.s.smirnov@yandex.ru Поступила в редакцию 01.10.2021 г. После доработки 14.10.2021 г.

Представлены экспериментальные результаты тестирования передаточной функции камер Canon EOS 500D, AxioCam HS и ToupCam 14MP методом, предложенным в данной работе. В качестве источника света использовались твердотельный лазер с диодной накачкой (длина волны 477 нм), He– Ne-лазер (632.8 нм) и вольфрамово-галогенная лампа. Мощность излучения изменялась спектральным девятиступенчатым ослабителем (№ 7880171) и цветными стеклами (ГОСТ 9411-91). Показано, что у специализированных камер предусмотрен режим съемки с линейной передаточной функцией, а для коммерческих камер линеаризация передаточной функции выполняется путем ее гамма-коррекции.

DOI: 10.31857/S0032816222020021

введение

Современные полупроводниковые фотоприемники и фотоматрицы обладают высокой светочувствительностью, достаточной для использования их в биомедицинских системах компьютерного зрения для выполнения экспериментальных исследований методами фотометрии [1, 2] и флуориметрии [3]. В перечисленных методах цифровые микрофотоизображения клеточных препаратов подвергаются математической обработке с целью получения количественных данных о яркости или об оптической плотности в каждом пикселе фотоизображения. Достоверность и воспроизводимость получаемых экспериментальных данных определяются и прямо зависят от вида передаточной функции используемых цифровых фотокамер, включая фотоматрицу, предусилитель и алгоритмы аналого-цифрового преобразования.

В инструкциях цифровых фотокамер приводятся значения светочувствительности в единицах, эквивалентных светочувствительности ISO желатиносеребряных фотоэмульсий. Это позволяет пользоваться методами измерения экспозиции, принятыми в классической пленочной фотографии. Однако такое определение светочувствительности отражает чувствительность матрицы лишь косвенно, потому что законы сенситометрии неприменимы для цифровых фотокамер.

Получаемое цифровое изображение может иметь различную степень яркости при одной и той же экспозиции. Это достигается изменением предварительного усиления электрических сигналов фотоматрицы и алгоритмов их последующего аналого-цифрового преобразования в цветовое пространство, как правило, sRGB. Производители цифровых фотокамер руководствуются различными стандартами ISO (см., например, [4]) при установлении зависимости между значениями сигналов матрицы и соответствующими параметрами цветового пространства, при которой получаются "правильно" экспонированные изображения. Однако в инструкциях фотокамер не указывается какой именно способ использован для разметки шкал чувствительности.

Инициатива по определению единого стандарта по измерению, расчету и представлению характеристик различных камер и используемых в

12

КМОП

Таблица 1. Основные технические характеристики тестируемых камер			
Характеристики	Canon EOS 500D	ToupCam 14MP	AxioCam HS
Общее число пикселей	3888 × 2592	4096 × 3288	660 × 494
Размер пикселя, мкм	5.7×5.7	1.4×1.4	9.9 × 9.9

14

КМОП

них фотоматриц принадлежит European Machine Vision Association (EMVA). Стандарт EMVA-1288 [5] - это всесторонний обзор различных существующих стандартов технического зрения, которые делают эти технологии менее дорогими и более простыми в использовании. В этом обзоре описаны различные стандарты интерфейса камеры (кабели, коннекторы, источники питания и пр.). программного обеспечения интерфейса. крепления объектива, освещения и системных интеграторов. Предлагается единый подход к представлению рабочих характеристик камер, таких как квантовая эффективность, отношение сигнал/шум и неоднородность фоточувствительности. Однако способ измерения спектральных характеристик отдельных цветовых каналов фотоматрицы и передаточной функции камеры не были стандартизованы.

В работе [6] рассмотрена методика измерения спектральных характеристик отдельных цветовых каналов матричных фотоприемников с использованием спектрофотометра Thermo Evolution 300 с импульсной ксеноновой лампой [7] в качестве источника излучения. Однако, как отмечают сами авторы, использование спектрофотометра не по назначению привело, по-видимому, к существенным погрешностям измерений, наибольшей из которых является установка волоконного входа спектрометра.

Указанные погрешности отсутствуют в способе тестирования спектральных откликов фотоматрицы, представленном в работах [8, 9]. В них для тестирования спектральной чувствительности фотоматрицы используется перестраиваемый в широком диапазоне источник света, а именно лампа накаливания К220-100 в сочетании с универсальным монохроматором УМ-2. Разработанная экспериментальная установка позволила получить монохроматические цветовые спектральные стимулы. Цифровые изображения спектральных стимулов регистрировались камерой Canon EOS 500 D (режим съемки указан в работе [8]), и 168 изображений составили цифровой атлас с шагом 1 нм, с помощью которого и тестировалась спектральная чувствительность фотоматрицы. Данные, полученные экспериментально, позволили построить цветовой охват камеры Canon EOS 500D на диаграмме (x, y).

Возможности применения цифровых фотокамер для измерения и регистрации пространственных распределений интенсивности лазерного излучения рассмотрены в работе [10]. Авторы предлагают после регистрации изображений в rawформате для получения линеаризованных данных применить dcraw-конвертер [11] в "документальном" режиме. Таким образом удалось расширить линейный динамический диапазон Canon EOS 400D более чем в 10 раз. Однако практически все камеры располагают целым набором различных режимов съемки и, как правило, неизвестно выполнялись ли какие-то процедуры предобработки зарегистрированного изображения с целью его конвертации в файл.

12

П3С

Это означает, что тестирование передаточной функции цифровых фотокамер, используемых в биомедицинских системах компьютерного зрения для получения количественной информации, является актуальной задачей. Основной целью данной работы является создание, описание и экспериментальная проверка метода тестирования и измерения передаточной функции цифровых фотокамер, основанного на извлечении информации из цветовых каналов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе тестировались передаточные функции следующих цифровых камер: зеркальная цветная фотокамера Canon EOS 500D (Canon Inc., Japan), цветной видеоокуляр для микроскопа ToupCam 14MP (Hangzhou ToupTek Photonics Co., Ltd., P.R.China), монохромная фотокамера AxioCam HS (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Germany), технические характеристики которых приведены в таблице 1. Камера Canon EOS 500D позиционируется производителем как коммерческая, ToupCam 14MP - как специализированный видеоокуляр, a AxioCam HS – это специализированная камера для биологических микроскопов и научных исследований.

В качестве источника света использовались следующие излучатели: твердотельный лазер с диодной накачкой модели ВWB-10-ОЕМ (В&W Tek Inc., Newark, DE, USA) с максимумом излучения на длине волны $\lambda_0 = 477$ нм, Не–Ne-лазер ЛГН 207Б (ПАО НПК "Полярон", Украина) ($\lambda_0 =$ = 632.8 нм) и вольфрамово-галогенная лампа,

Разрядность а.ц.п., бит

Тип сенсора

встроенная в биологический микроскоп Zeiss Axio Observer Z1 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Germany).

Мощность излучения изменялась аттестованным девятиступенчатым ослабителем (№ 7880171) к спектрографу ИСП-51 и светофильтрами из набора образцов цветных оптических стекол (ГОСТ 9411-91). Величина ослабления мощности излучения стеклами тестировалась фотоприемником Ophir (Juno Photodiode PD300 (s/n 700557)) (Ophir Optronics Solutions Ltd., Israel). Для проведения экспериментов были отобраны цветные стекла, которые ослабляли мощность прошедшего через них излучения от 100% до 0.

Излучение источника света направлялось на волоконный световод-разветвитель через устройство подавления спеклов, поглощающий светофильтр и оптический коллиматор-расширитель пучка. Излучение из одного выходного торца световода регистрировалось фотокамерой, из второго — измерителем мощности.

Параметры времени экспозиции тестируемых камер настраивались по гистограмме изображения таким образом, чтобы яркостные сигналы воспринимались фотоматрицей без искажений, т.е. не выходили за пределы динамического диапазона. Величины сигналов яркости были нормированы на соответствующие значения максимального сигнала, допускаемого разрядностью аналого-цифрового преобразователя (а.ц.п.), и поэтому они изменяются в диапазоне от 0 до 1.

Предлагаемый метод измерения передаточной функции камеры, а именно зависимости усредненного по снимку яркостного сигнала от мощности падающего излучения, состоит из следующих действий:

 регистрации серии из 33 снимков непосредственно на матрицу фотоприемника (без объектива) при последовательном изменении мощности излучения;

2) пересчета величин исследуемых сигналов из цветовых RGB-каналов в монохромную моду по формуле (1), рекомендованной [12] Международным союзом электросвязи (МСЭ):

$$I = 0.299R + 0.587G + 0.114B;$$
 (1)

3) нахождения среднего значения яркости (I_{cp}) и среднеквадратичного отклонения (с.к.о.) в зарегистрированном изображении (без учета границ изображения и околограничных областей);

4) вычитания средней по кадру темновой величины (уровня черного) из I_{cp} и получения экспериментальных данных — значений усредненных сигналов яркости с фотоматрицы камеры.

Экспериментально полученная передаточная функция камеры может быть линеаризована путем обработки этих экспериментальных данных. Гамма-коррекция яркостных сигналов выполня-



Рис. 1. Экспериментальные данные (камера Canon EOS 500D, $\lambda = 477$ нм): *1* – усредненный яркостный сигнал, *2* – аппроксимирующий полином пятой степени; *3* – результат применения гамма-коррекции сигнала ($\gamma = 1.43$), *4* – график функции *y* = *x* + 0.0675, *5* – *y* = *x*, *6* – линеаризованная передаточная функция камеры.

ется в среде программирования (например, Excel) и приводит к линеаризации передаточной функции, определению коэффициента γ и const (величины смещения прямой). Результаты гамма-коррекции представляются графически.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные результаты тестирования камер представлены на следующих графиках: экспериментальные данные, представленные на рис. 1–3, получены с помощью твердотельного лазера (477 нм), данные на рис. 4 и 5 – при использовании Не–Ne-лазера (632.8 нм).

На рис. 1 представлены экспериментальные результаты для камеры Canon EOS 500D: усредненный яркостный сигнал (кривая 1), аппроксимирующий полином пятой степени для кривой 1 сигнала (кривая 2), результат применения метода гамма-коррекции (коэффициент у = 1.43) сигнала (кривая 3). Коэффициент гамма-коррекции находился путем перебора значений до тех пор, пока линейная аппроксимация графика 3 по показателю достоверности линейной аппроксимации R^2 не приближалась в наибольшей степени к прямой 4: y = x + const. Последующее вычитание const = 0.0675 позволяет найти линейную аппроксимацию данных, приближенную к функции y = x(прямая 5 на рис. 1, которая соответствует идеальной линейной передаточной функции). Коэффи-

Рис. 2. Экспериментальные данные (камера ToupCam (RAW-режим), $\lambda = 477$ нм): *1* – усредненный яркостный сигнал, *2* – аппроксимирующий полином пятой степени; *3* – результат применения гамма-коррекции сигнала ($\gamma = 4.3$), *4* – график функции *y* = *x* – 0.1095, *5* – *y* = *x*, *6* – линеаризованная передаточная функция камеры.

0.6

0.8

Мощность лазера, отн. ед.

1.0

0.4

циент достоверности аппроксимации не менее 95%. Кривой 6 на рис. 1 показана передаточная функция камеры Canon EOS 500D, которую удалось линеаризовать в результате обработки яркостных сигналов. Отступление от идеальной линейной передаточной функции составило 1.17%.

Обсчет данных для остальных камер выполнялся аналогично.

Данные для камеры ToupCam представлены на рис. 2 и 3. ТоирСат допускает два режима съемки. На рис. 2 приведены результаты экспериментов в RAW-режиме: усредненный яркостный сигнал, аппроксимирующий полином для линии сигнала (коэффициент достоверности аппроксимации – 95.44%), результат применения гаммакоррекции сигнала ($\gamma = 4.3$), прямая y = x + const(const = 0.11), прямая v = x (соответствует идеальной линейной передаточной функции) и линеаризованная передаточная функция ToupCam. Отступление от идеальной линейной передаточной функции составило 4.56%. Результаты тестирования камеры ToupCam в RAW-режиме выявили, что коррекция сигналов с целью линеаризации передаточной функции в самой камере ToupCam не выполняется.

На рис. 3 приведены результаты экспериментов в режиме RGB24. График усредненного яркостного сигнала практически совпадает с графиком передаточной функции, линеаризованной рассматриваемым способом, коэффициент до-



Рис. 3. Экспериментальные данные (камера ToupCam (режим RGB24), $\lambda = 477$ нм): пунктирная линия — усредненный яркостный сигнал, сплошная — идеальная передаточная функция камеры.

стоверности аппроксимации не менее 99.8%, т.е. в режиме RGB24 в самой камере ToupCam обнаруживается встроенная линеаризация данных.

Величины с.к.о. данных в каждой экспериментальной точке даны на рис. 4 для камеры Canon EOS 500D и на рис. 5 – для камеры ToupCam. Величины с.к.о., отнесенные к среднему значению



Рис. 4. Экспериментальные данные (камера Canon EOS 500D, $\lambda = 633$ нм, $\gamma = 1.71$): пунктирная линия — усредненный яркостный сигнал, сплошная — аппроксимирующий полином пятой степени для этого сигнала, штриховая — величина отношения значения с.к.о. к средней монохромной яркости.

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0

0.2

*I*_{ср}, отн. ед.



Рис. 5. Экспериментальные данные (камера ToupCam (RGB24), $\lambda = 633$ нм, $\gamma = 1.01$): пунктирная линия — усредненный яркостный сигнал, сплошная — аппроксимирующий полином пятой степени для этого сигнала, штриховая — отношение значения с.к.о. к средней монохромной яркости.

яркости, показаны штриховой линией. Штриховые графики демонстрируют колебания значений. Отношение с.к.о. к среднему значению яркости для камеры ToupCam не превышает 0.01, для камеры Canon EOS 500D – 0.005.

Тестирование камеры AxioCam HS выполнялось на микроскопе Zeiss модели Observer Z1 в проходящем свете. Спектральный ступенчатый ослабитель помещался на предметный столик и выполнялся порядок метода измерений без наведения на фокус, но с нормировкой яркости поля на изображение без ослабителя. Результаты даны на рис. 6 в виде графиков. Пунктирная линия обозначает усредненный яркостный сигнал; прямая линия соответствует идеальной линейной передаточной функции. Линии аппроксимирующего полинома и результата применения гаммакоррекции сигнала мы не показываем, потому что они не разрешаются в масштабе рисунка. Величины с.к.о., отнесенные к среднему значению яркости, показаны штриховой линией.

Эксперимент выявил, что в самой камере AxioCam HS выполняется линеаризация яркостных сигналов фотоматрицы. Отношение с.к.о. к среднему значению яркости уменьшается с увеличением мощности излучения и находится в пределах от 0.01 до 0.03.

В биомедицинских системах компьютерного зрения найденные величины коэффициента γ необходимо использовать при обработке экспериментальных данных, получаемых с помощью камер. Гамма-коррекция данных заключается в том, что в



Рис. 6. Экспериментальные данные (камера AxioCam HS, $\gamma = 1.22$): пунктирная линия — усредненный яркостный сигнал, сплошная — идеальная передаточная функция камеры, штриховая — отношение значения с.к.о. к средней монохромной яркости.

каждом пикселе исходного изображения значение интенсивности I_i в каждом цветовом канале ($I = \mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$) нормируется на максимальное значение $I_{i \max}$ сигнала, допускаемого разрядностью а.ц.п., и возводится в степень γ , затем вычитается величина const:

$$I_{i\,\text{norm}} = \left(I_i/I_{i\,\text{max}}\right)^g - \text{const.}$$
(2)

Вычисленное значение интенсивности $I_{i \text{ norm}}$ является линеаризованным и изменяется в пределах от 0 до 1. Переход к яркостным значениям сигнала в градациях серого камеры k-й битности осуществляется умножением значения $I_{i \text{ norm}}$ на величину 2^k .

Рассчитанные таким образом количественные данные о яркости в каждом пикселе фотоизображения соответствуют линейной передаточной функции используемой цифровой фотокамеры.

выводы

Для получения достоверных и воспроизводимых данных в биомедицинских экспериментах, где цифровые микроизображения клеточных препаратов подвергаются математической обработке с целью получения количественных данных о яркости или об оптической плотности в каждом пикселе изображения, необходимо применять камеры с линейной передаточной функцией или выполнять тестирование камеры и находить коэффициент гамма-коррекции передаточной функции с целью ее линеаризации.

Экспериментальные данные, полученные в данной работе, показывают, что у специализированных камер прелусмотрен режим съемки с линейной передаточной функцией, а для коммерческих камер линеаризация передаточной функции может быть реализована методом, предложенным в ланной работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-08-00874а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С. // Доклады Академии наук высшей школы РФ. 2014. Вып. 4 (25). C. 113. https://doi.org/10.17212/1727-2769-2014-4-104-114

- 2. Пальчикова И.Г., Омельянчук Л.В., Пальчиков Е.И.. Смирнов Е.С., Семешин В.Ф. // Датчики и системы. 2012. № 3. C. 2.
- 3. Батурина Г.С., Пальчикова И.Г., Конев А.А., Смирнов Е.С., Каткова Л.Е., Соленов Е.И., Искаков И.А. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018 Т. 22 № 4. C. 433.

https://doi.org/10.18699/VJ18.379

4. ISO 12232:1998 Photography – Electronic still-picture cameras – Determination of ISO speed. https://www.iso.org/standard/21020.html

- 5. European Machine Vision Association Standard 1288 -Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras – Release 3.0 November 29, 2010. https://www.emva.org/wp-content/uploads/EM-VA1288-3.0.pdf
- 6. Лесничий В.В., Петров Н.В., Черёмхин П.А. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. № 4. С. 633. https://doi.org/10.7868/S0030403413100097
- 7. Thermo Scientific Evolution 300 and Evolution 600 -UV-Vis Spectrophotometers. http://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/D10956~.pdf
- 8. Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019. XV международный научный конгресс. Новосибирск, 24-26 апреля 2019: Сб. материалов. Т. 4: Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия. мониторинг окружающей среды, геоэкология. 2019. № 1. С. 19. https://doi.org/2618-981X-2019-4-1-19-27
- 9. Palchikova I.G., Smirnov E.S. // SDM-2019: Proceedings of the All-Russian Conference "Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes". Berdsk, Russia, 26–30 August 2019. CEUR Workshop Proc. 2020. V. 2534. P. 33. http://ceur-ws.org/Vol-2534/05_keynote.pdf
- 10. Конник М.В., Маныкин Э.А., Стариков С.Н. // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 4. С. 314.
- 11. Coffin D. Decoding raw digital photos in Linux. https://www.dechifro.org/dcraw/index.html
- 12. Рекомендация МСЭ-R ВТ.601-6. https://www.itu.int/dms pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-6-200701-S!!PDF-R.pdf