

## ТЕСТИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ЦИФРОВЫХ ФОТОКАМЕР

### *Ирина Георгиевна Пальчикова*

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН), 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, д.т.н., г.н.с., зав. лабораторией, тел. (383) 306-58-74, e-mail: palchikova@gmail.com

### *Евгений Сергеевич Смирнов*

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН), 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, н.с., тел. (383) 306-62-20, e-mail: evgenii.s.smirnov@yandex.ru

### *Евгений Иванович Соленов*

Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, д.б.н., г.н.с., зав. лабораторией, тел. (383) 363-49-71, e-mail: eugsol@bionet.nsc.ru

### *Игорь Алексеевич Исаков*

Новосибирский филиал ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, 630096, Россия, г. Новосибирск, ул. Колхидская, 10, д.м.н., зав. операционным блоком, врач-офтальмолог, тел. (383) 209-00-44, e-mail: i.isakov@mntk.nsk.ru

Предложен метод измерения зависимости усредненного по снимку яркостного сигнала от мощности падающего излучения для измерения передаточной функции камеры и ее линеаризации. Полученные в работе экспериментальные результаты тестирования камер Canon EOS 500D, AxioCam HS и TourCam 14MP обнаружили, что в специализированных камерах линеаризация яркостных сигналов выполняется встроенным программным обеспечением, а для бытовых камер она может быть реализована предложенным методом.

**Ключевые слова:** яркостные сигналы фотоматрицы, передаточная функция камеры, линеаризация

## TESTING THE DIGITAL CAMERA TRANSFER FUNCTION

### *Irina G. Palchikova*

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, D.Sc. (Technology), Chief Researcher, Head of Laboratory, phone: (383) 306-58-74, e-mail: palchikova@gmail.com

### *Evgenii S. Smirnov*

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Researcher, phone: (383) 306-62-20, e-mail: evgenii.s.smirnov@yandex.ru

### *Evgeny I. Solenov*

Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 10, Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russia, D.Sc. (Biology), Chief Researcher, Head of Laboratory, phone: (383) 363-49-71, e-mail: eugsol@bionet.nsc.ru

**Igor A. Iskakov**

S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Novosibirsk Branch, 10, Kolhidskaya St., Novosibirsk, 630096, Russia, D.Sc. (Medicine), Head of the Operating Department, phone: (383) 209-00-44, e-mail: i.iskakov@mntk.nsk.ru

A method for measuring the dependence of the brightness signal averaged over the image on the power of the incident radiation for measuring the transfer function of the camera and its linearization is proposed. The experimental results of testing the Canon EOS 500D, AxioCam HS and ToupCam 14MP cameras obtained in this work found that in specialized cameras the linearization of brightness signals is performed by the built-in software, and for household cameras it can be implemented by the proposed method.

**Keywords:** brightness signals of the photomatrix, photocamera, transfer function, linearization

### *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 желатиносебящих фотоэмульсий. Это позволяет пользоваться методами измерения экспозиции, принятыми в классической плёночной 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 аналогово-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 получают «правильно» экспонированные изображения. Однако в инструкциях фотокамер не указывается, какой именно способ использован для разметки шкал чувствительности. Таким образом, тестирование передаточной функции цифровых фотокамер, используемых в биомедицинских

системах компьютерного зрения для получения количественной информации, является актуальной задачей.

### *Материалы и методы*

В настоящей 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 указаны в Табл. 1. Камера Canon EOS 500D позиционируется производителем как бытовая, ToupCam 14MP – как специализированный видеоокуляр, а AxioCam HS – специализированная камера для биологических микроскопов и научных исследований.

*Таблица 1*

Основные технические характеристики тестируемых камер

	Canon EOS 500D	ToupCam 14MP	AxioCam HS
Общее число пикселей	3888 x 2592	4096 x 3288	660 x 494
Размер пикселя, мкм	5,7 x 5,7	1,4 x 1,4	9,9 x 9,9
Разрядность АЦП, бит	14	12	12
Тип сенсора	КМОП	КМОП	ПЗС

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

1. Регистрация серии из снимков непосредственно на матрицу фотоприемника (без объектива) при последовательном изменении мощности излучения.
2. Пересчет величин исследуемого сигнала RGB-сигнала в монохромную моду по формуле [5], рекомендованной Международным союзом электросвязи (МСЭ):

$$I = 0,299R + 0,587G + 0,114B. \quad (1)$$

3. Нахождение среднего значения яркости ( $I_{\text{ср.знач.}}$ ) и среднеквадратичного отклонения (СКО) в зарегистрированном изображении (без учета границ изображения и околোগраничных областей).

4. Вычитание средней темновой величины (уровня черного), и получение экспериментальных данных – значений усредненных сигналов яркости с фотоматрицы камеры.

5. Обработка данных, выполнение гамма-коррекции яркостных сигналов с целью линеаризации передаточной функции, графическое представление результатов в среде программирования (например, EXCEL).

В качестве источника света использовались следующие излучатели: твердотельный лазер с диодной накачкой модели BWB-10-OEM (B&W Tek Inc., Newark, DE, USA), с максимумом излучения на длине волны  $\lambda_0 = 477$  нм; He-Ne лазер ЛГН 207Б (ПАО НПК «Полярон», Украина) ( $\lambda_0 = 632,8$  нм) и вольфрамово-галогенная лампа, встроенная в биологический микроскоп Zeiss, модели Observer Z1.

Мощность излучения изменялась спектральным девятиступенчатым ослабителем (№7880171) и цветными стеклами из набора (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 0 до 100%.

Параметры выдержки тестируемых камер настраивались по гистограмме изображения, таким образом, чтобы яркостные сигналы воспринимались фотоматрицей без искажений, т.е. не выходили за пределы динамического диапазона.

Для удобства сигналы мощности и сигналы яркости были нормированы на соответствующие максимальные значения, и на графиках они находятся в диапазоне от 0 до 1.

### 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 - 5 получены при использовании He-Ne лазера (632,8 нм).

На рис. 1 точечная линия 1 – это непосредственно усредненный яркостный сигнал; тонкая сплошная линия 2 вокруг точечной – аппроксимирующий полином пятой степени для линии 1 сигнала; штриховая линия 3 – результат применения метода гамма-коррекции сигнала, коэффициент  $\gamma = 1,43$ . Коэффициент гамма-коррекции

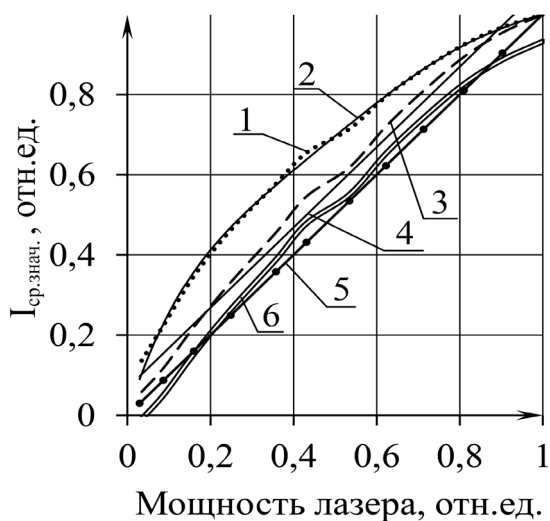


Рис. 1. Экспериментальные данные. Камера Canon EOS 500D,  $\lambda = 477$  нм

находился путем перебора значений до тех пор, пока линейная аппроксимация штрихового графика не приближалась в наибольшей степени к прямой  $4y=x+const$ . Последующее вычитание  $const = 0,0675$  позволяет найти линейную аппроксимацию данных, приближенную к функции  $y=x$  (прямая 5). Коэффициент достоверности аппроксимации не менее 95%. Белая линия 6 на рис. 1 показывает передаточную функцию камеры Canon EOS 500D, которую удалось линеаризовать в результате обработки яркостных сигналов. Прямая линия 5 с круглыми маркерами соответствует идеальной линейной передаточной функции.

Обсчет данных для остальных камер выполнялся аналогично.

Данные для камеры TourCam представлены на рис. 2 – 3: точечная линия обозначает усредненный яркостный сигнал; тонкая сплошная линия вокруг точечной – аппроксимирующий полином для линии сигнала; штриховая линия – результат применения гамма-коррекции сигнала, белая линия – линеаризованная передаточная функция. Прямая линия с круглыми маркерами соответствует идеальной линейной передаточной функции. TourCam допускает два режима съемки, в RAW-режиме дополнительная коррекция сигналов в самой камере не выполняется, в режиме RGB24 мы обнаружили встроенную линеаризацию данных.

Отклик (чувствительность) фотоматрицы зависит от длины волны излучения, поэтому мы дополнительно протестировали наши камеры при использовании пучка He-Ne лазера (632,8 нм). Результаты показаны на рис. 4 для камеры Canon EOS 500D. На рис. 5 – для камеры TourCam (режим RGB24). Точечная линия вновь обозначает усредненный яркостный сигнал; тонкая сплошная линия вокруг точечной – есть аппроксимирующий полином для линии сигнала. Камера Canon EOS 500D демонстрирует очень слабую спектральную зависимость яркостного сигнала, точечные кривые на рис. 1 и на рис. 4 практически совпадают. У камеры TourCam ход точечных кривых на рис. 3 и на рис. 5 близок, однако величины отклонений от линейной аппроксимации отличаются почти в 2 раза. Коэффициент  $\gamma = 4,3$ ,  $\text{const} = 0,11$ .

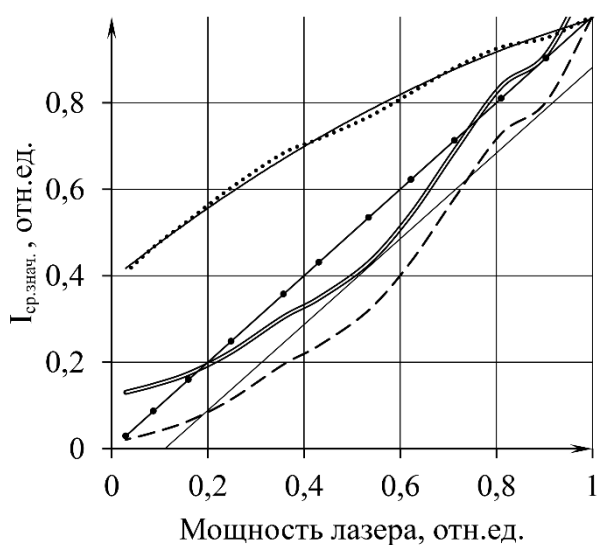


Рис. 2. Экспериментальные данные. Камера TourCam (RAW-режим),  $\lambda = 477$  нм

На рис. 4 и 5 показаны пунктирной линией величины СКО, отнесенные к среднему значению яркости, на правой вертикальной оси отмечены значения этих величин. Пунктирные графики демонстрируют колебания значений.

Отношение СКО к среднему значению яркости для камеры TourCam не превышает 0,01, для камеры Canon EOS 500D – 0,005.

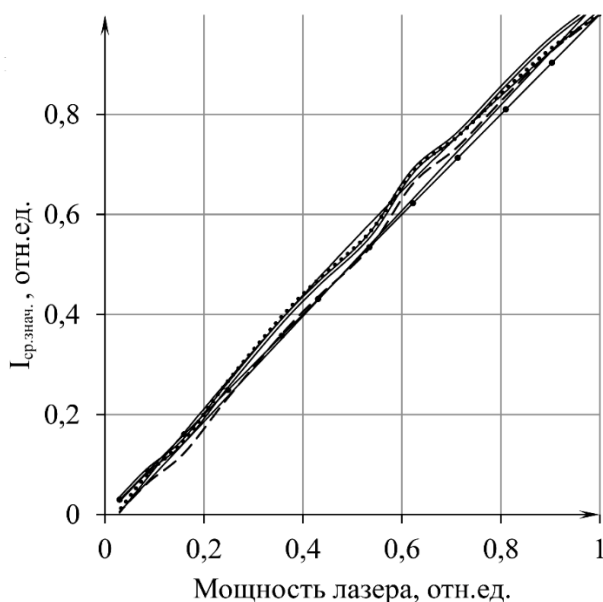


Рис. 3. Экспериментальные данные для камеры TourCam (режим RGB24).  
Коэффициент  $\gamma = 1,1$ ,  $\text{const} = 0,03$ ,  $\lambda = 477 \text{ нм}$

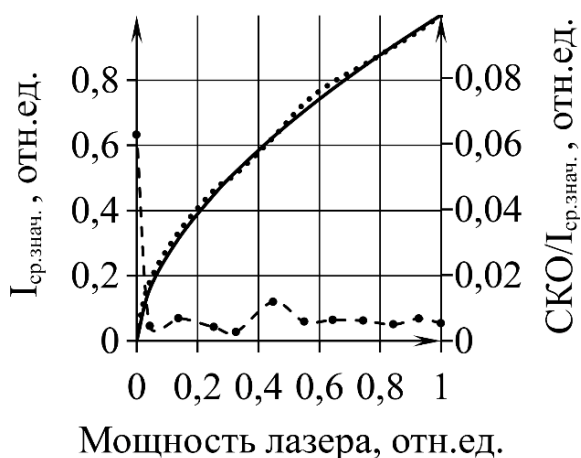


Рис. 4. Экспериментальные данные.  
Камера Canon EOS 500D,  $\lambda = 633 \text{ нм}$ ,  
 $\gamma = 1,71$

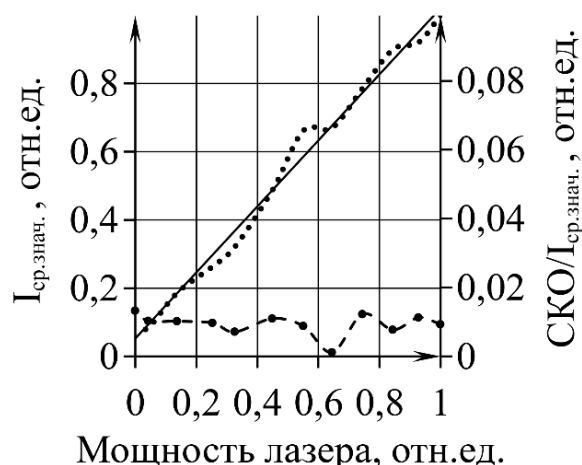


Рис. 5. Экспериментальные данные.  
Камера TourCam (RGB24),  $\lambda = 633 \text{ нм}$ ,  
 $\gamma = 1,01$

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. Точечная линия обозначает усредненный яркостный сигнал; прямая линия с круглыми маркерами соответствует идеальной линейной передаточной функции. Линии аппроксимирующего полинома и результата применения гамма-коррекции сигнала мы не показываем,

потому что они не разрешаются в масштабе рисунка. Величины СКО, отнесенные к среднему значению яркости, показаны пунктирной линией, на правой вертикальной оси отмечены значения этих величин.

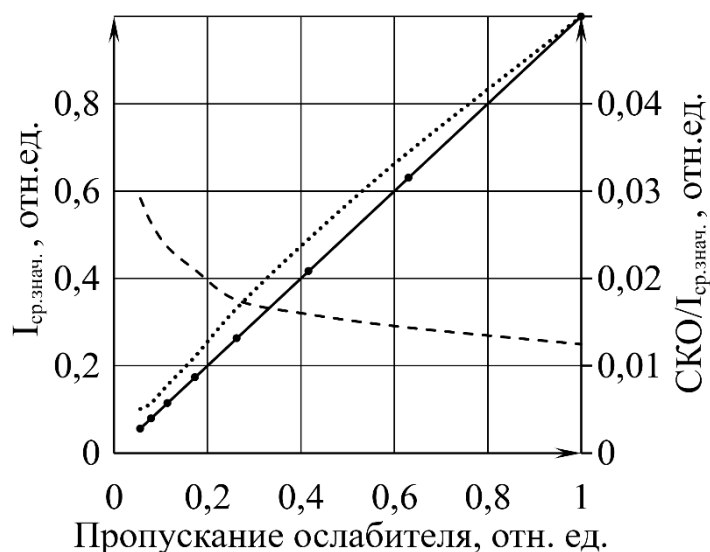


Рис. 6. Экспериментальные данные. Камера AxioCam HS,  $\gamma = 1,22$

Эксперимент выявил, что в самой камере AxioCam HS выполняется линейзация яркостных сигналов фотоматрицы. Отношение СКО к среднему значению яркости уменьшается с увеличением мощности излучения и находится в пределах от 0,01 до 0,03.

### **Выводы**

Для получения достоверных и воспроизводимых данных в биологических 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 линейризованной передаточной функцией или выполнять тестирование камеры, находить коэффициент гамма-коррекции яркости и использовать его при обработке экспериментальных данных.

Экспериментальные данные настоящей работы показывают, что у специализированных камер линейризация яркостных сигналов выполняется встроенным программным обеспечением, а для бытовых камер линейризация передаточной функции может быть реализована методом, предложенным в данной работе.

### **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №19-08-00874а.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пальчикова И. Г., Смирнов Е. С. Экспериментальное определение функции рассеяния точки в установках компьютерной цитофотометрии // Доклады академии наук высшей школы РФ. – 2014. – Вып. 4 (25). – С. 113–123. – DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4-104-114.
2. Пальчикова И. Г., Омельянчук Л. В., Пальчиков Е. И., Смирнов Е. С., Семешин В. Ф. Особенности применения цифровых камер для цитофотометрического определения количества ДНК в ядрах клеток // Датчики и системы. – 2012. – № 3. – С.2–12.
3. Батурина Г. С., Пальчикова И. Г., Конев А. А., Смирнов Е. С., Каткова Л. Е., Соленов Е. И., Исаков И. А. Исследование влияния гипотермической консервации на уровень натрия в клетках эндотелия трансплантата роговицы // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2018 – Т. 22, № 4. – С. 433–437. – DOI: 10.18699/VJ18.379.
4. ISO 12232:1998 Photography – Electronic still-picture cameras – Determination of ISO speed.[Электронный ресурс]. – URL : <https://www.iso.org/standard/21020.html> (Дата обращения: 11 мая 2021).
5. Рекомендация МСЭ-R BT.601-6. [Электронный ресурс] – URL : [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-6-200701-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-6-200701-S!!PDF-R.pdf) (Дата обращения: 29 мая 2021).

© И. Г. Пальчикова, Е. С. Смирнов, Е. И. Соленов, И. А. Исаков, 2021