

## КОЛОРИМЕТРИЯ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

*Зуйков И.Е., Савкова Е.Н.*

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

*Описан разработанный метод измерений фотометрических и колориметрических характеристик протяженных объектов с использованием цифровых фото- и видеокамер. Для обеспечения метрологической прослеживаемости и реализации принципа сравнения с мерой предложено применять аттестованные исходные образцы, которые реализуются в виде опорных контрольных точек на несамосветящемся объекте или размещаемых на поверхности самосветящегося объекта равноярких излучателей, а также выполнять построение условных шкал в каждом цветовом канале и расчетным путем осуществлять расширение динамического диапазона измерений, повышая надежность и достоверность результатов измерений. (E-mail: ie-zuikov@bntu.by)*

**Ключевые слова:** колориметрия, цифровая камера, цветовые характеристики.

### Введение

Современные потребности науки и техники в «достоверных, надежных, сопоставимых и эквивалентных» [1] результатах измерений фотометрических и колориметрических характеристик объектов существенно возросли, что обусловлено влиянием освещения как на безопасность, работоспособность, жизнедеятельность человека, так и на окружающую среду, а также внедрением новых светотехнических решений [2]. Кроме того, все в больших масштабах используются средства отображения информации индивидуального и коллективного пользования – видеотерминалы, высокая яркость динамических изображений которых и часто необоснованные технические характеристики производителей, касающиеся яркостного и цветового разрешения этих устройств, также должны контролироваться. «Одной из современных проблем в светотехнике является то, что традиционные фотометрия и колориметрия имеют дело с пространственно однородными и равномерно освещенными образцами, тогда как в современных реальных условиях мы постоянно сталкиваемся с текстурными поверхностями объектов и неравномерным распределением света» [3].

Одним из путей решения данной проблемы являются предлагаемые авторами экспрес-

методы контроля фотометрических и колориметрических параметров объектов. Эти методы основаны на использовании цифровых фото- и видеокамер (далее – цифровых камер) полупрофессионального и профессионального класса и позволяют с достаточной для практики точностью воспроизводить и измерять фотометрические и колориметрические параметры объектов.

Цифровые камеры и технологии обработки графических данных демонстрируют широкие возможности цифровых камер в геодезии (спутниковая многозональная съемка), «реалистичном» воспроизведении и «улучшении» характеристик объектов при их компьютерном моделировании, обнаружении блеска и т.д. Однако в данных областях используется скорее качественный анализ или оценки рассеяния (прецизионности) исследуемых характеристик. Вопросы же оценки смещения (правильности) исследуемых характеристик чаще всего остаются открытыми, что не обеспечивает требуемого уровня доверия к результатам испытаний и контроля, что обусловлено в первую очередь ограничениями динамического диапазона цветопередающих и воспроизводящих устройств, а также аппаратной зависимостью встроенных в них цветовых пространств, усугубляющих эти ограничения.

Целью работы являлась разработка для колориметрии высокого разрешения метода изме-

рений яркостных и цветовых характеристик протяженных объектов и математической модели расширения динамического диапазона двумерных измерений, что позволило бы обеспечить требуемую точность ( $\pm 10\%$ ) результатов измерений с заданным уровнем достоверности.

### Модель и реализация измерительного канала

Задача корректного цветовоспроизведения может быть решена на основе анализа последовательности преобразований измеряемой величины в измерительном канале и установления реперных точек условной шкалы измеряемой величины для выполнения условия метрологической прослеживаемости до системных или внесистемных единиц измерений. Измеритель-

ный канал схематически показан на рисунке 1. Значения измеряемой величины (яркости цветных каналов) для исходных образцов, помещаемых в перспективу регистрируемой сцены, используются в качестве реперных точек условной шкалы. Регистрирующее устройство состоит из цифровой камеры и устройства отображения информации. Освещенность, формируемая на ПЗС-матрице цифровой камеры световым потоком от объекта  $E_{mn}$  и исходных образцов  $E_{0k}$ , при поддержке форматов *TIFF* или *RAW* пересчитывается соответственно в светлоту  $L'_{mn}, L'_{0k}$ , которая затем путем обработки цифрового изображения трансформируется в интенсивности  $\{R_{mn}, G_{mn}, B_{mn}, R_{0k}, G_{0k}, B_{0k}\}$  цветных каналов пространства *RGB* [4].

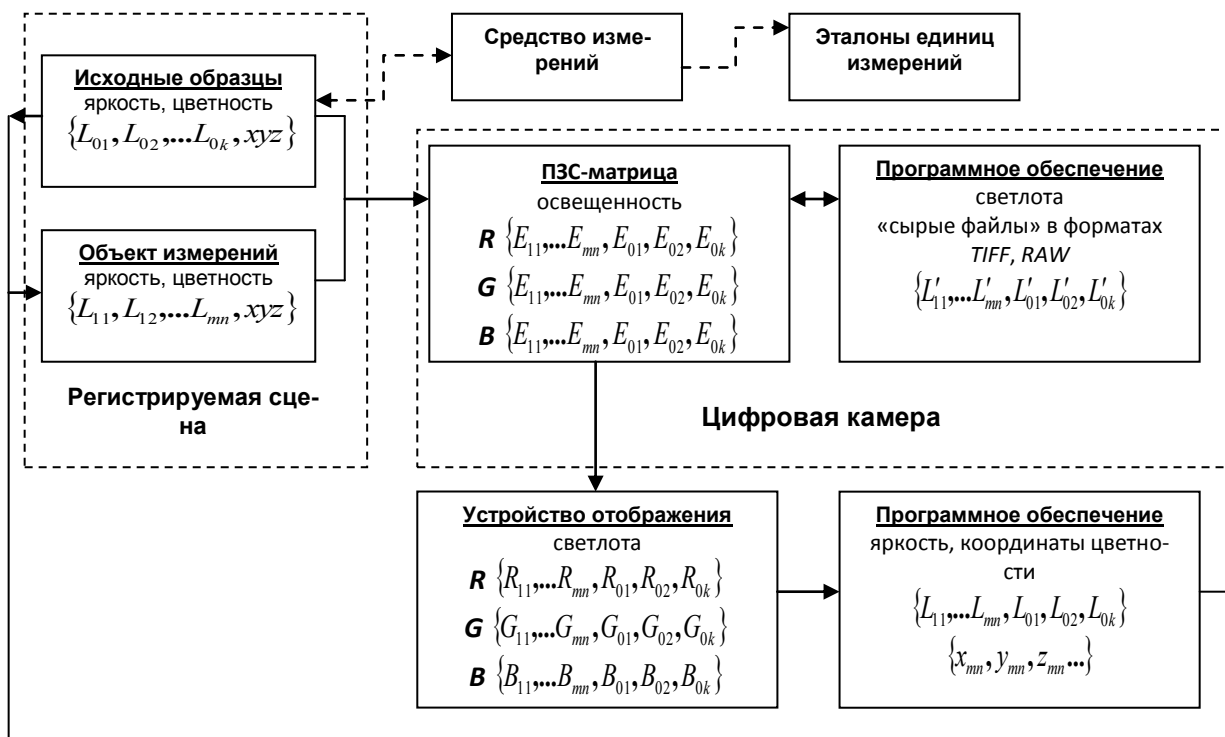


Рисунок 1 – Модель измерительного канала в колориметрии высокого разрешения

Калибровочные кривые, связывающие яркость исходных образцов в системных единицах ( $\text{кд/м}^2$ ) и их интенсивность в цветовых каналах в относительных единицах, позволяют рассчитать фотометрические параметры (например, яркость  $\{L_{mn}, \dots\}$ ) и цветовые характеристики  $\{x_{mn}, y_{mn}, z_{mn}, \dots\}$  объекта по всей его поверхности. Пример реализации измерительного канала представлен на рисунке 2.

Разработанный метод измерений основан на том, что на поверхности объекта выбирают не

менее двух опорных контрольных точек (для несамоосвещающегося объекта они могут быть реализованы на его поверхности, в случае самоосвещающегося объекта в качестве опорных контрольных точек могут быть использованы равнояркие первичные излучатели), измеряют их фотометрические и колориметрические характеристики, осуществляют цифровую регистрацию объекта вместе с опорными контрольными точками при различном времени экспозиции или меняющейся апертуре, выполняют компьютерную обработку

полученных цифровых изображений, строят свет-сигнальные зависимости в трех цветовых каналах – красном ( $R$ ), зеленом ( $G$ ) и синем ( $B$ ), сопрягают данные зависимости и определяют фотомет-

рические и колориметрические характеристики объекта путем сравнения светлоты исследуемой точки со светлотой опорных контрольных точек по формуле:

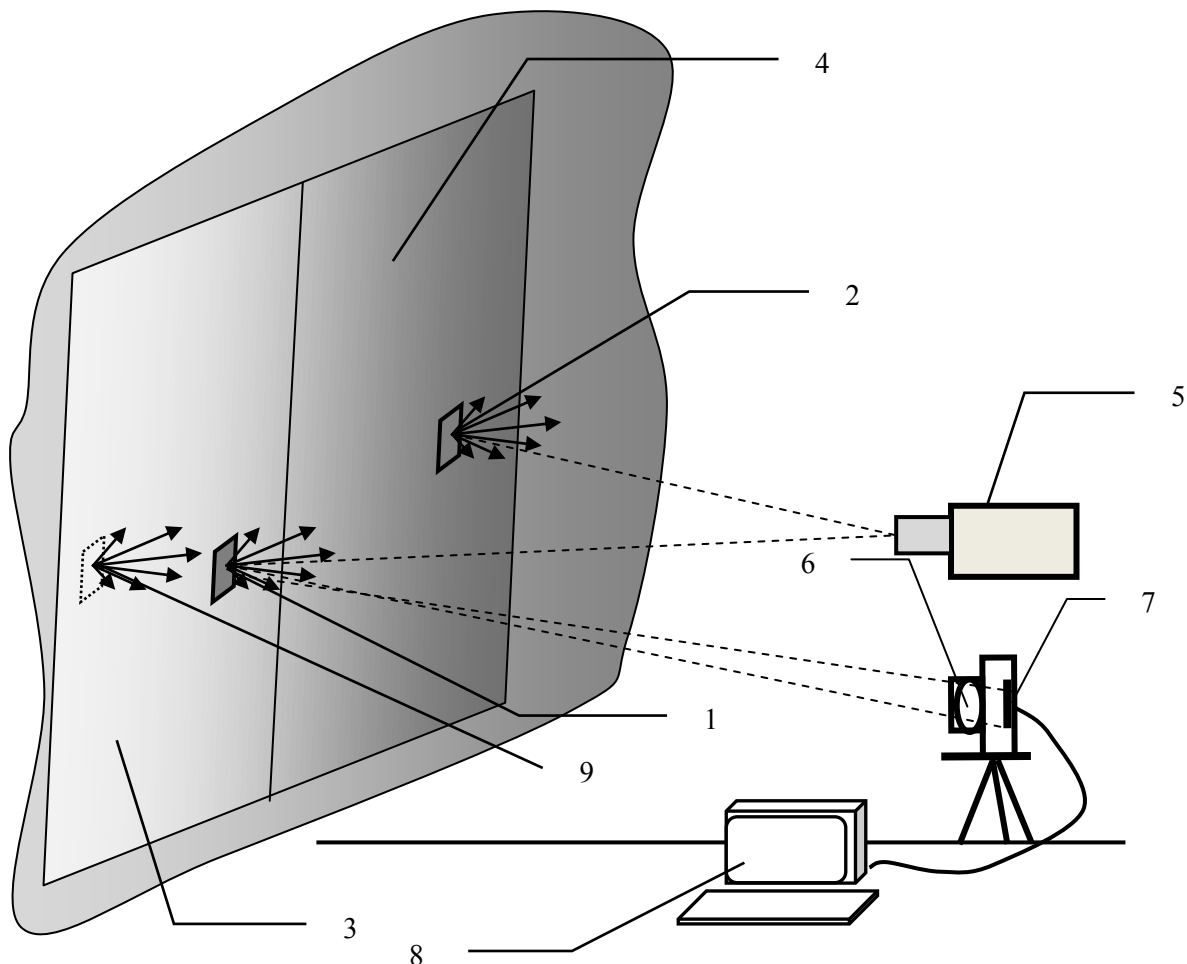


Рисунок 2 – Схема измерительной установки: 1, 2 – опорные контрольные точки, принадлежащие контрольным участкам 3 и 4 несамосветящегося объекта; 5 – спектрофотометр, используемый для измерений характеристик опорных контрольных точек; 6 – оптическая система цифровой камеры; 7 – ПЗС-матрица; 8 – средство отображения и обработки графических данных; 9 – контрольная точка объекта

$$L = (N - N_{01}) \frac{(L_{02}k_2 - L_{01}k_1)}{N_{02} - N_{01}} + L_{01}k_1, \quad (1)$$

где  $N$  – усредненная светлота участка цифрового изображения, соответствующего изображению исследуемой контрольной точки объекта в цветовом канале ( $R, G, B$ ), отн. ед.:

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (2)$$

где  $N_i$  – светлота  $i$ -го элемента цифрового изображения в цветовом канале ( $R, G, B$ ), отн. ед.;

$L_{01}, L_{02}$  – яркости опорных контрольных точек,  $\text{кд/м}^2$ ;  $N_{01}, N_{02}$  – усредненные яркости участков цифрового изображения опорных контрольных точек в цветовом канале ( $R, G, B$ ), отн. ед.;  $k_1, k_2$  – коэффициенты, зависящие от индикатрис рассеяния поверхности объекта в контрольной точке, отн. ед.

### Расширение возможностей метода

Вопросам расширения динамических диапазонов цифровых изображений уделяется внимание в области компьютерного дизайна:

«реалистичные» HRDI-изображения генерируют посредством наложения полупрозрачных масок и применяют для получения и усиления визуальных спецэффектов [5]; авторы [6] предлагают коррекцию (увеличение и уменьшение) динамических диапазонов осуществлять аппаратными (путем применения анализатора распределений яркости, сумматора и т.д.) и программными (с помощью операторов масштабирования и т.д.) средствами с целью обеспечения технической совместимости передающих устройств и повышения визуально воспринимаемого качества цифровых изображений.

Однако применительно к измерениям для обеспечения метрологической прослеживаемости проблему ограничения динамических диапазонов передающих технических устройств можно решить за счет расширения диапазона метода. Для этой цели авторами предлагается из одной и той же точки пространства, но с различным временем экспозиции (различной апертурой) осуществить регистрацию объекта и исходных образцов, выполнить компьютерную обработку полученных цифровых изображений в красном, зеле-

ном и синем каналах пространства RGB, построить зависимости светлоты  $R, G, B$  исходных образцов от времени экспозиции  $t - R(t), G(t), B(t)$ , найти на зависимостях критические точки – точки перехода в области насыщения, определить рабочую область динамического диапазона с соответствующими параметрами съемки и по известным значениям яркости, кд/м<sup>2</sup> (координат цветности, отн. ед.), для каждого цветового канала построить калибровочные кривые, приводя им в соответствие соответствующие усредненные отсчеты светлоты цифрового изображения. Трансформирование пространств  $RGB \rightarrow XYZ$  осуществляется по известным формулам в зависимости от цветового профиля устройства [4]. На рисунке 3 показан пример построения калибровочных кривых для одного цветового канала. Значениям опорной яркости  $L_1, L_2$  по оси абсцисс соответствуют различные сигналы  $N'_{01}, N'_{02}, N''_{01}, N''_{02}$  и т.д. по оси ординат при различных значениях времени экспозиции  $t$ . По полученным опорным точкам построены линейные зависимости рабочей области фотоприемника до перехода в стадии насыщения.

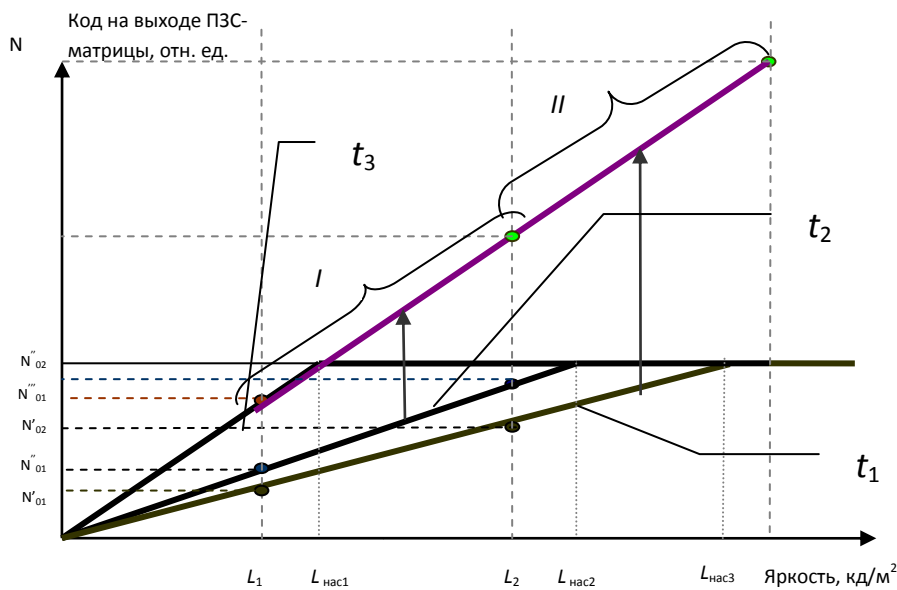


Рисунок 3 – Расширение динамического диапазона регистрируемой яркости изображений, выполненных при различных выдержках ( $t_1 < t_2 < t_3$ )

Для каждой кривой по трем цветовым каналам рассчитывались масштабные коэффициенты преобразования  $K_{12}, K_{23}$ :

$$K_{12} = \frac{N_2}{N_1}; \quad K_{23} = \frac{N_3}{N_2}, \quad (3)$$

где:

$$N_1 = N_1(L) = K_{12}L; \quad N_2 = N_2(L) = K_{23}L. \quad (4)$$

Для расчета яркости контрольной точки объекта в пределах  $L_{нас2} \leq L \leq L_{нас3}$ , осуществ-

лялось сопряжение полученных зависимостей:

$$L = \begin{cases} N_1, & \text{при } L < L_{\text{нас}1} \\ N_2 \cdot K_{12}, & \text{при } L_{\text{нас}1} < L < L_{\text{нас}2} \\ N_3 \cdot K_{12} \cdot K_{23}, & \text{при } L_{\text{нас}2} < L < L_{\text{нас}3}. \end{cases}$$

Относительные погрешности определялись по формулам:

$$\frac{\Delta L_1}{L_1} = \frac{\Delta N_1}{N_1}; \quad \frac{\Delta L_2}{L_2} = \frac{\Delta N_2 \cdot K_{12}}{N_2 \cdot K_{12}};$$
$$\frac{\Delta L_3}{L_3} = \frac{\Delta N_3 \cdot K_{12} \cdot K_{23}}{N_3 \cdot K_{12} \cdot K_{23}} \dots \quad (5)$$

При пересчете к световым единицам разброс точек относительно калибровочной кривой составлял не более 10 %, что показывает возможность применения данного метода в области контроля и испытаний объектов согласно нормам, приведенным в соответствующих нормативных документах. Предлагаемый метод может быть использован при исследованиях протяженных самосветящихся объектов, характеристики которых изменяются во времени, а также для определения спектральных характеристик и индикатрис светотражающих поверхностей, источников света, коэффициентов пропускания фильтров и ослабителей.

Осуществляя сопряжение зависимостей, математически с достаточной для практики точностью ( $\pm 10\%$ ) можно рассчитать значения яркости точек на объекте в трех цветовых каналах, расширяя, таким образом, динамический диапазон двумерных колориметрических измерений.

### Заключение

Предложена модель измерительного канала для реализации разработанного метода фотометрических и колориметрических изме-

рений с высоким пространственным разрешением, основанная на использовании исходных аттестованных образцов в виде опорных контрольных точек на несамосветящемся объекте или равнорядных излучателей, размещаемых на поверхности самосветящегося объекта. Метод измерений заключается в регистрации как объекта, так и исходных образцов посредством цифровой камеры и построении калибровочных кривых для каждого значения экспозиции и каждого цветового канала, расширении расчетным путем динамического диапазона и определения яркости и координат цветности объектов с достаточной для практики точностью ( $\pm 10\%$ ).

### Список использованных источников

1. Отчеты консультативных комитетов Международного комитета мер и весов. Документы 23-й Генеральной конференции мер и весов. – Минск, Белорусский государственный институт метрологии, 2003. – 93 с.
2. ISO 16817:2012 Проектирование среды зданий. Внутренняя среда зданий. Процесс проектирования визуальной среды.
3. Ронки, Л.Р. Сопоставление некоторых представлений светотехники и науки о зрении / Л.Р. Ронки // Светотехника. – 2012. – № 4. – С. 26–33.
4. Годен, Ж. Колориметрия при видеообработке / Ж. Годен. – М.: Техносфера, 2008. – 328 с.
5. McGuire, Morgan; Matusik, Wojciech; Pfister, Hanspeter; Chen, Billy; Hughes, John; Nayar, Shree (2007). Optical Splitting Trees for High-Precision Monocular Imaging. – IEEE Computer Graphics and Applications 27 (2): 32–42.
6. Патент RU 2 444 786 C2 G06T 7/40 (2006.01). Устройство и способы для увеличения динамического диапазона в цифровых изображениях. Российская федерация. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Авторы: Бантерле Ф., Ледда П., Дебаттиста К., Чалмерз А. Патентообладатель: Долби Лабораторис Лайсэнзин Корпорейшн (US).

Zuikov I.E., Savkova E.N.

**The colorimetry with a high dimensional resolution**

The developed method of Objects photometric and colorimetric characteristics measurements on the base of digital cameras are described. Application of the initial samples those are realized as the support of the control points on a non-radiant Object or as primary sources on a radiant Object will provide the metrological traceability and also build a conditional scale in each colour channel and expand the dynamic range of measurements by increasing the reliability and accuracy of measurement results.

(E-mail: ie-zuikov@bntu.by)

**Key words:** colorimetry, digital camera, color characteristics.

*Поступила в редакцию 15.02.2013.*