

УДК 535.6

Е.Н. Савкова

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

## НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦВЕТА В КОЛОРИМЕТРИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Выполнен краткий обзор стандартных методов измерений цвета, представлены перспективные методы измерений колориметрии высокого разрешения, предложен способ оценивания и уменьшения неопределенности измерений путем бинирования цветовых пространств, осуществляемого с помощью многократной цифровой регистрации объектов и технологий триангуляции.

**Ключевые слова:** цвет, колориметрия высокого разрешения, бинирование, неопределенность, энтропия.

### Введение

В рамках государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника», (подпрограмма «Фотоника 2015», задание 2.1.15 «Разработка методов и средств метрологического обеспечения лазерной и оптоэлектронной техники») осуществляется разработка нового направления – колориметрии высокого разрешения как методологии и междисциплинарной области фотометрических и колориметрических измерений, основанных на цифровой регистрации объектов и компьютерной обработке их изображений. Актуальность данного направления обусловлена повсеместным применением устройств отображения информации индивидуального и коллективного пользования – мониторов, видеотерминалов, видеостен, и необходимостью контроля их характеристик на всех стадиях жизненного цикла, поскольку при длительном восприятии высокие значения яркостей могут оказывать негативное влияние на здоровье людей, а также со временем в процессе эксплуатации ухудшается качество отображаемой графической информации.

### Основная часть

**Стандартные методы измерений и постановка проблемы.** Цвет представляет собой аффинную векторную величину, определяемую в виде точки в трехмерном цветовом пространстве посредством координат цвета и цветности. Для несамосвещающихся объектов идентификация цвета сводится к определению нормированных незначительных цветовых различий между испытуемым образцом и образцом сравнения [1, 2]. Цветовое различие  $DE_{uv}^*$ , например, в пространстве  $L^*u^*v^*$ , между двумя цветовыми стимулами  $(L_1^*; u_1^*; v_1^*)$  и  $(L_0^*; u_0^*; v_0^*)$ , рассчитывается как Евклидово расстояние между точками [3]:

$$DE_{uv}^* = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$\Delta L^* = L_1^* - L_0^*, \Delta u^* = u_1^* - u_0^*, \Delta v^* = v_1^* - v_0^*.$$

Подстрочные индексы «0» означают параметр образца сравнения, «1» – испытуемого образца.

Для самосвещающихся объектов чаще всего используют пространство XYZ. Сначала определяют координаты цвета X, Y, Z путем интегрирования полученной спектральной функции излучения  $\phi(\lambda)$  (или путем разложения данной функции в ряд Фурье) [3]:

$$X = \int_{\lambda=380}^{\lambda=780} \phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = \int_{\lambda=380}^{\lambda=780} \phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z = \int_{\lambda=380}^{\lambda=780} \phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  – функции удельных координат цвета.

Идентификация цвета в пространстве XYZ осуществляется через определение координат цветности (x,y) как точки пересечения вектора, исходящего из начала координат, с плоскостью, называемой цветовым локусом или графиком цветностей (см. рис. 1) [6].

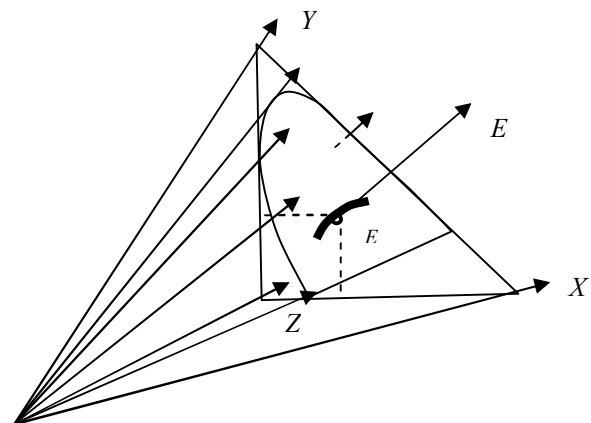


Рис. 1. Часть пространства XYZ (E – координаты равноэнергетического источника света)

Координаты цветности рассчитывают по формулам [3]:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}; \quad z = 1 - x - y.$$

Неопределенность идентификации цвета в этом случае будет представлять собой область (параллелограмм или эллипс) на плоскости в окрестности исследуемой точки. Поскольку цвет, исходя из его

определенный, представляет собой величину со значительной дефинициальной неопределенностью, возникают трудности при контроле объектов. Применительно к «белым» светодиодам для их сортировки стандартом ANSI/ANSI C78.377, предусмотрено бинирование плоскости цветового локуса – выделение допусковых областей (бинов и оптибинов), определяющих восемь номинальных значений цветовой температуры абсолютно черного тела (жирная линия на рис. 1, проходящая через точку Е на графике цветностей). В увеличенном виде бины, находящиеся на данной линии, представлены на рис. 2 [7]. Бинирование же «цветных» светодиодов пока не предусмотрено.

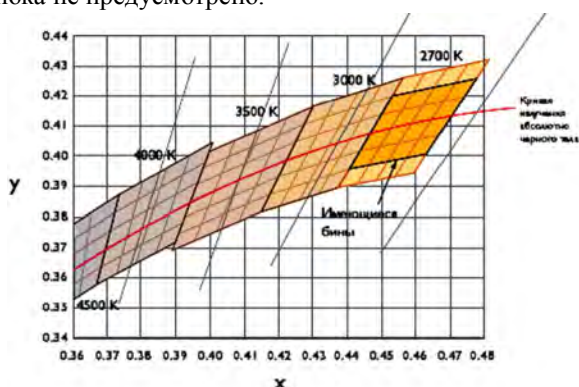


Рис. 2. Бины на кривой излучения абсолютно черного тела в пространстве XYZ

Разнообразие физических реализаций объектов измерений – устройств отображения (от несамосветящихся светоотражающих экранов до самосветящихся протяженных объектов с кластерными светодиодными структурами) характеризуется широким спектром фотометрических и колориметрических характеристик, требования к которым до конца не стандартизованы. Однако согласно действующим нормативным документам [4, 5] в настоящее время применяют методы фотометрических и колориметрических измерений, которые основаны на определении значений измеряемых величин (яркости, силы света, координат цветности) в контрольных точках (участках) объектов. Недостатками данных методов является значительная продолжительность, обусловленная последовательным режимом выполнения измерений, невозможность регистрировать изменяющиеся во времени световые распределения, а также трудоемкость, связанная с необходимостью позиционирования средства измерений в пространстве перед протяженной поверхностью объекта, а также необходимость переключать диапазоны измерений в зависимости от значений измеряемой яркости.

**Новые методы измерений колориметрии высокого разрешения** позволяют повысить экономическую эффективность и информативность измерений за счет получения количественной информации сразу со всех контрольных точек (участков) исследуемого объекта. Методы основаны на многократной регистрации

объекта посредством матричного фотоприемного устройства (цифровой камеры) с различными, пошагово увеличивающимися значениями времени экспозиции и обработке цифровых изображений. Метрологическая прослеживаемость результатов измерений обеспечивается путем ссылки на опорные образцы – так называемые линейки равноярких излучателей, неточечных источников света, выступающих в качестве мер при измерениях. Каждая линейка формируется по принципу принадлежности спектрального состава излучения конкретному сектору выбранной стандартизованной цветовой палитры (ненасыщенные цвета), данные о которой хранятся в индексных таблицах поддерживающего программного обеспечения. Автором предлагается разделять палитру на шесть секторов по принципу превалирования удельных весов цветовых координат (перечисленных по убыванию интенсивности в цветовых каналах цифрового изображения): 1) RGB; 2) RBG; 3) GRB; 4) GBR; 5) BRG; 6) BGR, что позволит уже на начальном этапе уменьшить зону методической составляющей неопределенности. В пределах каждой линейки источники света должны различаться по яркости с шагом, зависящим от конкретной измерительной задачи. Таким образом, для каждого источника – опорного образца, может быть получено семейство калибровочных кривых, показывающих зависимости значений интенсивности (ось ординат) цветовых каналов от времени экспозиции (ось абсцисс) –  $R(t)$ ,  $G(t)$ ,  $B(t)$ , пример которых приведен на рис. 3.

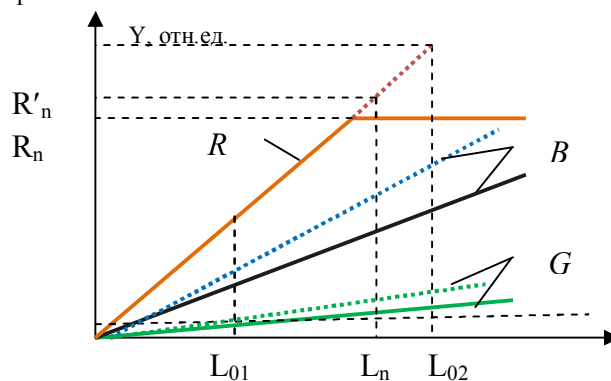


Рис. 3. Калибровочные кривые цветовых каналов цифрового изображения

Далее для каждой последовательной пары источников одной линейки зависимости сопрягаются, например, для одного значения времени. На рис. 3 по оси ординат сплошными линиями отложены значения интенсивностей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  для времени экспозиции  $t_m$ . Осуществляя сопряжение зависимостей, математически с достаточной для практики точностью можно рассчитать значения яркости точек на объекте в трех цветовых каналах, расширяя таким образом динамический диапазон колориметрических измерений [8]. Исходя из принципа линейности передаточной характеристики матричного фотоприемника, можно найти на оси ординат условную точку

$R'_n$ , находящуюся за пределами динамического диапазона, и по ней осуществить нормировку интенсивностей  $R, G, B$ , адаптируя их к новым значениям, вводя соответствующие расширяющие коэффициенты непосредственно в стандартизованную модель трансформации цветовых пространств  $RGB \rightarrow XYZ$ :

$$X = \frac{a_{11}}{k_R} R + \frac{a_{12}}{k_G} G + \frac{a_{13}}{k_B} B;$$

$$Y = \frac{a_{21}}{k_R} R + \frac{a_{22}}{k_G} G + \frac{a_{23}}{k_B} B;$$

$$Z = \frac{a_{31}}{k_R} R + \frac{a_{32}}{k_G} G + \frac{a_{33}}{k_B} B,$$

где  $X, Y, Z$  – координаты цвета пространства  $XYZ$ ;  $a_{nm}$  – стандартизованные удельные весовые коэффициенты интенсивностей  $R, G, B$ ;  $k_R, k_G, k_B$  – расширяющие коэффициенты, рассчитываемые по формулам:

$$k_R = \frac{R'}{255}; k_G = \frac{G'}{255}; k_B = \frac{B'}{255}.$$

Многokратная регистрация позволяет «перемещаться» вдоль векторов (линий светлоты) путем определения координат цвета сначала в пространстве  $RGB$ , а затем в  $XYZ$ , и за счет этого решать проблемы ограничения динамических диапазонов и цветовых охватов цветовоспроизводящих устройств; и самое важное – осуществлять бинирование в хроматических областях не только на плоскости графика цветностей, но и в пространстве. Предельный случай бинированного пространства схематически показан на рис. 4. «Предельный случай» означает, что разделение цветового пространства на сектора происходит в зависимости от возможностей измерительной системы, включая ее программное обеспечение.

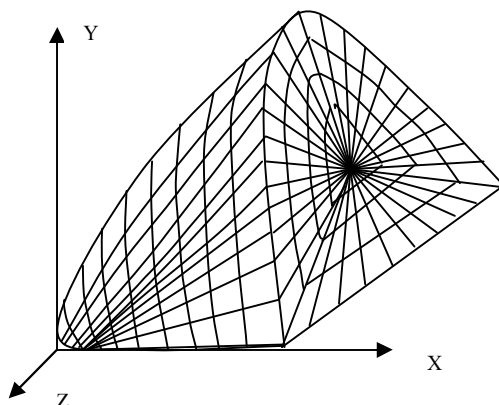


Рис. 4. Бинированное пространство методами колориметрии высокого разрешения

**Цифровое изображение как информационная модель объекта** представляет собой двумерное представление его яркости и текстуры в определенных условиях освещения, полученное в процессе оптико-электронных преобразований в измерительной системе. С точки зрения теории измерительной

информации объект, регистрируемый дискретной системой, может иметь хоть и очень обширное, но, тем не менее, конечное множество реализаций в виде цифровых изображений. Элементы информационного канала – условия освещения, опорные образцы, спектрофотометр, цифровая камера, устройство отображения информации, алгоритмы обработки данных, являются источниками получения информации и одновременно источниками ее потерь. Поэтому результат измерения можно рассматривать как компромисс между затрачиваемыми ресурсами и точностью. В общем случае цифровая обработка изображений сводится к операциям префильтрации, дискретизации, квантования, кодирования, декодирования, постфильтрации [9]. Каждая операция осуществляется согласно действующим стандартам (которых большое количество) и предполагает неизбежные потери данных. И таким образом, цифровое изображение можно рассматривать как результат преобразования, получения и одновременно потерь информации – отклик измерительной системы о состоянии объекта в данный момент времени в определенных условиях.

**Неопределенность и энтропия.** Поскольку цвет является векторной величиной, разрешающая способность методов колориметрии высокого разрешения может быть определена как геометрическое место точек в выбранном цветовом пространстве, ограниченное поверхностями, проведенными между радиус-векторами координат цвета и поверхностями, соответствующими одинаковой интенсивности (светлоте) – это есть зоны суммарной неопределенности, которые будут различаться по форме и объему. Объем окрестности будет варьироваться в зависимости от местонахождения точки в цветовом пространстве и ступеней квантования шкал, а также возможностей технического и программного обеспечения информационного канала. Точность и достоверность информации о состоянии исследуемого объекта, получаемой на основе обработки его цифрового изображения, могут быть оценены и повышены за счет использования количественной меры информации – информационной энтропии, поскольку основные элементы измерительной системы – это измерительные устройства, осуществляющие обработку информации. Так согласно [11] энтропия  $H(\mathbf{p})$  дискретного ансамбля с распределением вероятностей  $\mathbf{p}$  является выпуклой функцией аргумента  $\mathbf{p}$ . По определению энтропии:

$$H(\mathbf{p}) = - \sum_{m=1}^M p_m \log p_m = \sum_{m=1}^M f_m(\mathbf{p}),$$

где  $M$  – количество векторов;  $m$  – элемент вектора дискретного ансамбля  $X = \{x\}$ .

Выравнивание вероятностей первого и второго элементов множества  $X$  приводит к увеличению энтропии [11]. Для эффективного кодирования информации необходимо учитывать статистическую

зависимость сообщений и определяют информационные характеристики их последовательностей. Чтобы получить неслучайную информационную характеристику (условную энтропию) вероятностного ансамбля  $X = \{x\}$  при фиксированном ансамбле  $Y = \{y\}$ , нужно выполнить усреднение по всем значениям  $y$  [11]:

$$H(X|Y) = - \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log p(x, y).$$

Дополнительная информация об ансамбле  $X$ , содержащаяся в сообщениях других ансамблей, в среднем уменьшает неопределенность ансамбля  $X$  [11]. Данный аспект – взаимосвязь неопределенности и энтропии в дискретных информационно-измерительных системах, требует дальнейших исследований.

Оценивание неопределенности в колориметрии высокого разрешения представляет собой процесс «распаковывания» модели «черного ящика» – анализ преобразований измеряемой величины в измерительной системе. Согласно ГОСТ Р 54500.3.2 [10] проекции областей охвата на плоскость будут представлять собой эллипсы (рис. 5, а) или параллелограммы, а в дискретных системах – более сложные фигуры (рис. 5, б).

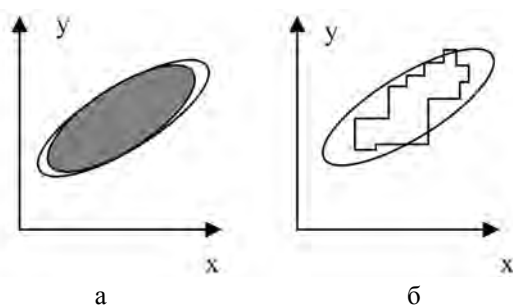


Рис. 5. Проекция областей охвата на плоскость графика цветностей в пространстве XYZ

Повышение точности идентификации цвета в колориметрии высокого разрешения может быть достигнуто с помощью компьютерных технологий триангуляции, позволяющих по аналогии с диаграммами Вороного корректно (путем задания определенных ограничений и диапазонов) бинировать цветовое пространство.

## НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КОЛЬОРУ У КОЛОРИМЕТРІЇ ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ

Є.М. Савкова

Виконаний короткий огляд стандартних методів вимірювань кольору, представлені перспективні методи вимірювань колориметрії високої роздільної здатності, запропонований спосіб оцінювання і зменшення невизначеності вимірювань шляхом бінування колірних просторів, здійснюваного за допомогою багатократної цифрової реєстрації об'єктів і технологій триангуляції.

**Ключові слова:** колір, колориметрія високої роздільної здатності, бінування, невизначеність, ентропія.

## THE COLOR IDENTIFICATION UNCERTAINTY IN A HIGH-RESOLUTION COLORIMETRY

E.N. Savkova

A brief overview of the standard methods of color measurement is made, advanced methods of high-resolution colorimetry measurements are presented, the method of estimation and reduction of uncertainty in measurements by making bins in color spaces is proposed.

**Keywords:** colour, high-resolution colorimetry, bins-making, measurement, uncertainty, entropy.

## Заключение

Учитывая, что суммарная неопределенность измерения векторной величины будет представлять собой область в трехмерном пространстве, оптимизация элементов измерительной системы на основе оценки энтропии и применение технологий дискретной математики и современных программных средств, позволит найти наименьшую из возможных для окрестности идентифицируемой точки область охвата, улучшив тем самым прецизионность результатов измерений цвета, а также предоставит возможности для бинирования цветовых пространств с целью контроля светотехнической продукции.

## Список литературы

1. СТБ ISO 7724-3-2008 Краски и лаки. Колориметрия. Часть 3. Расчет цветовых различий.
2. ISO 10545-16:1997/Cor 1:1997 Часть 16. Керамическая плитка. Определение небольших цветовых различий.
3. ГОСТ 9242-59 Светофильтры сигнальные для транспорта. Методы измерений цветности и коэффициента пропускания.
4. ГОСТ Р 50949-2001 Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности.
5. ГОСТ Р 52870-2007 Средства отображения информации коллективного пользования требования к визуальному отображению информации и способы измерения.
6. Шашлов А.Б. Основы светотехники: учебник для вузов / А.Б. Шашлов. – М.: Логос, 2011. – 256 с.
7. ANSI ANSLG C78.377-2011 Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products.
8. Зуйков И.Е. Колориметрические измерения на основе цифровой регистрации с высоким пространственным разрешением / И.Е. Зуйков, Е.Н. Савкова // Материалы 6-й Межд. НТУ «Приборостроение-2013», БНТУ. – С. 176-178.
9. Дворкович В.П. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, 2012. – 1008 с.
10. ГОСТ Р 54500.3.2-2013 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 2. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин.
11. Кудряшов Б.Д. Теория информации: учебник для вузов / Б.Д. Кудряшов. – СПб.: Питер, 2009. – 320 с.

Поступила в редколлегию 23.12.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.