

И.Е. ЗУЙКОВ, д-р физ.-мат. наук, профессор,
зав. кафедрой “Информационно-измерительная
техника и технологии”
Е.Н. САВКОВА, канд. техн. наук, доцент
(Белорусский национальный
технический университет,
Минск, Беларусь)

I.E. ZUYKOV,
E.N. SAVKOVA
(Belarus national
technical university,
Minsk, Belarus)

Нормативно-методическое обеспечение колориметрии высокого разрешения

Учитывая возрастающие потребности в колориметрии высокого разрешения для протяженных объектов, изменяющих свои свойства во времени, особую актуальность приобретают вопросы метрологической прослеживаемости и достоверности результатов измерений. В статье рассмотрены факторы дефинитивной неопределенности цвета в программно-аппаратных средах, выполнен обзор нормативно-методического обеспечения применительно к элементам измерительной цепи: первичным и вторичным излучателям, фотоприемникам, цветовым моделям и условиям отображения графических данных. Выделены основные направления развития стандартизации в колориметрии высокого разрешения как междисциплинарной области. Предложен метод расширения динамического диапазона двумерных колориметрических измерений, позволяющий повысить достоверность результатов.

Ключевые слова: колориметрия, стандартизация в колориметрии, неопределенность цвета, двумерные колориметрические измерения, факторы дефинитивной неопределенности цвета.

Предпосылки возникновения колориметрии высокого разрешения – цветное телевидение и цифровая фотография, а также необходимость обеспечения технической и информационной совместимости при передаче графических данных. В представленном в 2006 году на конференции Технической ассоциации графических искусств (TAGA) отчете Д. Мак Дауэла говорилось, что “традиционно стандарты для управления цветом разрабатывались различными организациями независимо друг от друга. Однако, как выяснилось, повсеместное применение цифровых данных делает глобальной зависимость от них и создает предпосылки для унификации и стандартизации” [1]. На международном уровне деятельность по стандартизации в области управления цветом осуществляют Международная организация по стандартизации (ISO), Международный союз электросвязи (ITU), Международная электротехническая комиссия (IEC), Международная комиссия по освещению (CIE), Международный консорциум цвета (ICC), Комитет стандартов технологий изобразительного искусства; на региональном уровне - Европейский Вещательный Союз (EBU) и др. Накопленный научный и практический опыт в фотометрии, радиометрии, полиграфии и телекоммуникациях, а также соображения экономической эффективности приводят к необходимости проведения междисциплинарных исследований и создания общей базы стандартов, позволяющей осуществлять непрерывный обмен информацией в этих смежных областях. В данной статье выполнен краткий обзор состояния

Regulatory and procedural ware high resolution colorimetry

Considering the increasing demands in high resolution colorimetry in measurements of extended objects that change these properties in time, the questions of metrological traceability and reliability are especially actual. The definitive uncertainty factors of colour in the software and hardware environments are considered at the article. Review of regulatory and procedural ware in relation to measuring circuit elements (primary and secondary sources, photodetectors, colour models, monitoring conditions of graphic data) is made. The standardization colorimetry main directions of development are obtained. The method of dynamic range expansion of two-dimensional colorimetric measurements by authors is proposed. The method improves the reliability of the results.

Keywords: colorimetry, standardization in colorimetries, uncertainty of color, two-dimensional colorimetric measurements, factors definitive uncertainties of color.

нормативно-методического обеспечения в области колориметрии и направлений его развития.

Спецификация цвета как измеряемой величины. В настоящее время действуют девять не противоречащих друг другу определений цвета, отражающих специфику зрительных восприятий, среди которых можно выделить три основных. Согласно ГОСТ 13088 “цвет есть аффинная векторная величина трех измерений, выражающая свойство, общее всем спектральным составам излучения, визуально неразличимым в колориметрических условиях наблюдения” [2]. Согласно Международному электротехническому словарю “цвет (воспринимаемый) – свойство зрительного восприятия, сочетающее хроматические и ахроматические признаки” [3]. В данном документе дается еще шесть определений. В соответствии с ISO 7724 “цвет однозначно характеризуется для определенного наблюдателя и определенного источника света координатами точки в пространстве, образуемом тремя взаимно перпендикулярными векторами” [4]. Анализ данных определений и последних опубликованных работ позволил сделать следующие выводы:

1. Установлено, что с точки зрения пространства, цвет воспринимается в своем пространстве и на фоне; с точки зрения времени, цвет – одно из звеньев смены цветов в определенной последовательности.

2. Для количественной оценки цвета используются показатели, определяемые по трехмерным шкалам стандартизованных цветовых пространств. Измерение цвета в колориметрии высокого разрешения основано на

метамерии, аппроксимации и интерполяции сигналов, снимаемых с групп пикселей цветных периодических структур.

3. Воспроизведение оттенков каждого цвета ограничивается по яркости количеством градаций в каждом цветовом канале (8, 12 и 24 бит на канал), а по времени – частотой Найквиста, равной половине частоты дискретизации [5].

Перечисленные особенности увеличивают дефинитивную неопределенность цвета в программно-аппаратных средах.

Измерительная цепь. Рассмотрение ключевых направлений развития стандартизации и нормирования в области колориметрии высокого разрешения будем осуществлять в контексте элементов измерительной цепи, представленного на рисунке 1. Цифровая камера “воспринимает” трехмерный объект как совокупность отсчетов яркости по трем цветовым каналам, имеющих геометрическую привязку пространственных координат к пиксельным. Задача корректного цветовоспроизведения может быть решена на основе детального анализа последовательности преобразований измеряемой величины в измерительной цепи и установления реперных точек для выполнения условия обеспечения единства измерений. Такие реперные точки должны иметь прослеживаемость до системных или внесистемных единиц и реализуются посредством материализованных или виртуальных мер, воспроизводимых в стандартизованных моделях и цветовых пространствах.

Стандартизация первичных излучателей. В соответствии с ISO 11664 термин “первичный источник света” (primary light source) применим к физическому источнику света, такому как лампа или небо [6]. ГОСТ 7721 устанавливает четыре типа источников [7] – A, B, C, D₆₅ (см. таблицу 1).

Повсеместное принятие стратегий энергосбережения находят отражение в ISO 11664-2, который рекомендует два источника A и D₆₅ (с введением поправок на влияние ультрафиолетовой области спектра, времени года, времени дня и географического расположения) и ISO 15469, описывающем относительное распределение яркости неба в некоторой точке как функцию яркости в зените [8]. Приведенные распределения яркости неба в широком диапазоне погодных условий являются универсальной основой для их классификации (выделяется шесть групп градаций и индикатрис для 15 типов различных сочетаний параметров градаций яркости: азимута α элемента неба; азимута α_s солнца; параметров c, d, e

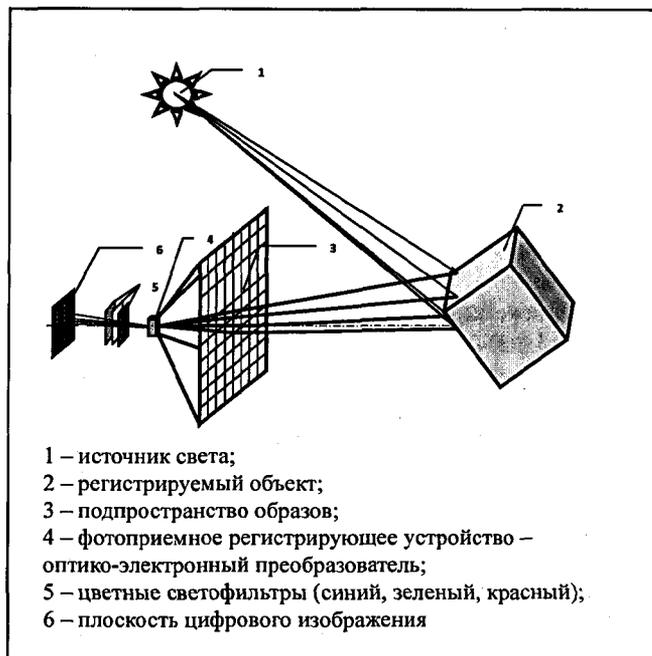


Рис. 1. Принцип формирования цифрового изображения трехмерного объекта

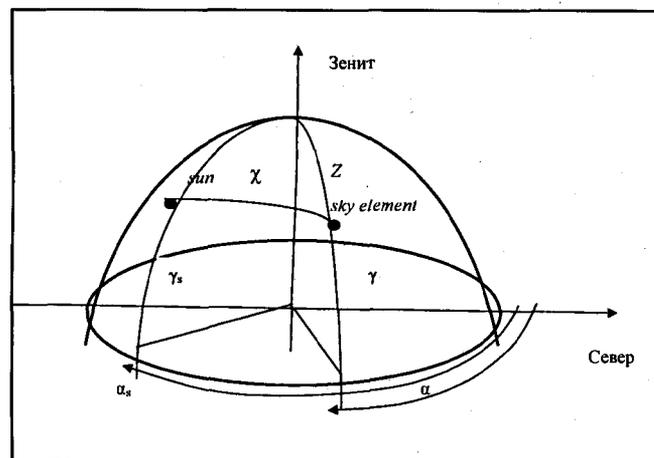


Рис. 2. Углы, определяющие положение солнца и элемента неба

индикатрисы рассеяния; кратчайшего углового расстояния χ между элементом неба и солнцем; угловых расстояний между элементом неба и зенитом Z , рад. и др.). Характеристики распределения яркости симметричны, описываются гладкими непрерывными функциями и предоставляют аппроксимации разорванных облаков. Это представлено в виде

Таблица 1. Стандартные источники света

Тип источника	Цветовая температура, К	Координаты цветности		Область применения
		x	y	
A	2856	0,448	0,407	условия искусственного освещения
B	4874	0,348	0,352	условия прямого солнечного освещения
C	6774	0,310	0,316	условия освещения рассеянным дневным светом
D ₆₅	6504	0,313	0,329	репрезентативный дневной свет

относительной индикатрисы рассеяния $f(\chi)$ и градаций яркости между горизонтом и зенитом (рис. 2).

Положение между высотой элемента неба в его зените и солнцем рассчитывается как разница $|\alpha - \alpha_s|$, а кратчайшее угловое расстояние между элементом неба и солнцем:

$$\chi = \arccos(\cos Z_s \cdot \cos Z + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos|\alpha - \alpha_s|).$$

CIE также определила источник C и другие источники D (CIE 15:2004), но они не имеют статуса “основных”.

Для описания оптических материалов, оптических систем и средств в оптическом диапазоне ISO 7944 устанавливает эталонные значения длин волн [10]. Для оптических материалов, оптических систем и средств рекомендованы две длины волн: линия ртути (*mercury e-line*) – 546,07 нм и линия гелия (*helium e-line*) – 587,56 нм. Рекомендуемые эталонные длины волн в видимом и ультрафиолетовом диапазонах представлены в таблице 2.

Для лазерного излучения рекомендованы три длины волны:

- He-Ne – 543,5 нм;
- He-Ne – 632,8 нм;
- Nd:YAG – 1064,1 нм.

Техническое нормирование вторичных излучателей. В соответствии с ГОСТ 8.205 в качестве рабочих эталонов единиц координат цвета несамосветящихся объектов применяют комплексы, состоящие из спектроколориметрических установок с наборами мер (отражающих и прозрачных образцов) в диапазонах измерений $X = 2,5 \div 109,0$, $Y = 1,4 \div 98,0$, $Z = 1,7 \div 107,0$ и системы регистрации и обработки информации; для координат цветности – $x = 0,0039 \div 0,7347$, $y = 0,0048 \div 0,8338$. Средние квадратические отклонения результатов сличений S_x рабочих эталонов единиц координат цвета с государственным составляют для прозрачных образцов $S_{x\bar{x}} = S_{y\bar{y}} = S_{z\bar{z}} = 0,1$; для отражающих образцов $S_{x\bar{x}} = S_{y\bar{y}} = S_{z\bar{z}} = 0,25$; для координат цветности – не более 0,007 для координат цветности $x < 0,1$ или $y < 0,1$; 0,0007 для координат цветности $x > 0,1$ или $y > 0,1$.

ISO 7724 рекомендует первичные, вторичные и рабочие эталоны коэффициента отражения. Первичный эталон для измерения коэффициента отражения или фактора коэффициента отражения, должен иметь $\rho(\lambda) = 1$ для всех длин волн. В качестве вторичного эталона обычно используют таблетку из спрессованного порошка сульфата бария. Изготовитель должен указать спектральные данные порошка для разных длин волн. Эти длины волн должны быть выбраны таким образом, чтобы можно

было проводить интерполяцию коэффициентов отражения или факторов коэффициента отражения с точностью $\pm 0,001$. Степень, до которой согласуются спектральные факторы коэффициента отражения $R(\lambda)$ и $R(\lambda)$ таблеток из сульфата бария, пока не определена. Рабочие эталоны изготавливают из молочного стекла, витролита или керамики, они должны быть калиброваны по эталону из сульфата бария и с тем прибором, на котором они будут использованы. Проверка повторяемости и воспроизводимости метода измерений может быть выполнена с использованием набора спектрально селективных рабочих эталонов.

ISO 7724 устанавливает методы определения координат цвета и цветовых различий лакокрасочных покрытий с использованием измерительных приборов и приводит определения спектральных радиометрических характеристик – спектрального фактора коэффициента отражения $R(\lambda)$, спектрального коэффициента отражения $\rho(\lambda)$, спектрального коэффициента диффузного отражения $\rho_{(d)}(\lambda)$.

Стандартизация приемников излучения. Для обеспечения комфорта и достоверности восприятия графических данных используются две эмпирические модели стандартного наблюдателя, регламентируемые ISO 11664-1 [13]: CIE 1931 г. и CIE 1964 г. Модель CIE 1931, разработанная Райтом и Гилдом на основе исследований цветовых восприятий 17 респондентов в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм с добавлением смеси вещества красного, зеленого и синего цветов, для углового зрения 2° , имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{x}(\lambda) &= [0,49\bar{r}(\lambda) + 0,31\bar{g}(\lambda) + 0,20\bar{b}(\lambda)]n \\ \bar{y}(\lambda) &= [0,17697\bar{r}(\lambda) + 0,81240\bar{g}(\lambda) + 0,01063\bar{b}(\lambda)]n \\ \bar{z}(\lambda) &= [0,00\bar{r}(\lambda) + 0,01\bar{g}(\lambda) + 0,99\bar{b}(\lambda)]n \end{aligned}$$

где \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} – функции, которые были получены как идентичные спектральной эффективности CIE; n – нормализованная постоянная

$$n = \frac{V(\lambda)}{0,17697\bar{r}(\lambda) + 0,81240\bar{g}(\lambda) + 0,01063\bar{b}(\lambda)}$$

Модель CIE 1964, полученная Стайлсом, Берхом и Сперанской для 67 наблюдателей, основана на монохроматических стимулах спектра путем аппроксимации от 390 до 830 нм с добавлением пропорций R, G, B световых полей с использованием поля зрения 10° (не игнорируя центральные 4° или около этого):

Таблица 2. Эталонные длины волн

Спектр. линии	Ultraviolet Hg e-line	Violet Hg h-line	Blue Hg g-line	Blue Cd F'-line	Blue H F-line	Green Hg e-line	Yellow He d-line	Red H c-line	Red He r-line
λ , нм	365,01	404,66	435,83	479,99	486,13	546,07	587,56	656,27	706,52

$$\begin{aligned}\bar{x}_{10}(v) &= 0,341080\bar{r}_{10}(v) + 0,189145\bar{g}_{10}(v) + 0,387529\bar{b}_{10}(v) \\ \bar{y}_{10}(v) &= 0,139058\bar{r}_{10}(v) + 0,837460\bar{g}_{10}(v) + 0,073316\bar{b}_{10}(v) \\ \bar{z}_{10}(v) &= 0,000000\bar{r}_{10}(v) + 0,039553\bar{g}_{10}(v) + 0,02026200\bar{b}_{10}(v)\end{aligned}$$

Модели взяты за основу при реализации матричных регистрирующих устройств. Широкое распространение по соотношению качество/цена получили технологии “один кадр – одна матрица”, реализованные на матричных структурах “решетка” Байера (*Bayer pattern*) [14] и *SuperCCD Fujifilm* [15], а также структурах “сэндвичного” типа фирмы *Foveon* [15]. В результате поиска стандартов, касающихся электронно-оптических преобразователей, были выявлены региональные стандарты *EN 112000* [16] и *EN 112001* [17] (устанавливают общие технические условия и требования к усилению яркости изображений), а также около двадцати межгосударственных стандартов, среди которых ГОСТ 21316, ГОСТ 17772, ГОСТ 21815 [18...20] (регламентируют требования к методам измерений характеристик электронно-оптических преобразователей) и ГОСТ 28953 [21], устанавливающий требования к измерению параметров фоточувствительных приборов с переносом заряда: выходного сигнала, сигналов насыщения, интегральной чувствительности, темнового сигнала, коэффициента модуляции, числа дефектов фоточувствительного поля, среднего квадратического сигнала шума, динамического диапазона, порога чувствительности и др.

Стандартизованные виртуальные средства. Для согласования процесса передачи и воспроизведения графических данных применяют стандартизованные средства – форматы (*RAW, TIFF*), цветовые мишени (*Pantone, Gretag Macbeth ColorChecker, IT8.7/2, IT8.7/1* и др.) и референсные цветовые пространства – *sRGB, AdobeRGB, CIE La*b** и *CIE Lu*v** и др. [5]. Аппаратно зависимые модели (*sRGB, AdobeRGB*) приводят к аппаратно не зависимым, наилучшим образом отражающим механизмы зрительного восприятия цвета, принадлежащим семейству *XYZ* ((1931 г.) [8]; *xyZ 2°* (1931), *Hunter Lab* (1958), *CIE Yuv* (1960), *CIE xyY 10°* (1964), *CIE Yu*v** (1976), *CIE Lu*v** (1976), *CIE La*b** (1976) [5]. В полиграфии применяют пространство *CIE La*b** [22], координаты которого рассчитывают следующим образом:

$$\begin{aligned}L^* &= 116\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \text{ для } \frac{Y}{Y_n} > 0,008856; \\ L^* &= 903,3\frac{Y}{Y_n} \text{ для } \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856; \\ a^* &= 500\left[\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right)\right]; \\ b^* &= 200\left[\left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right)\right]; \\ f\left(\frac{X}{X_n}\right) &= \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} \text{ для } \frac{X}{X_n} > 0,008856; \\ f\left(\frac{X}{X_n}\right) &= 7,787\frac{X}{X_n} + \frac{16}{116} \text{ для } \frac{X}{X_n} \leq 0,008856,\end{aligned}$$

где X, Y, Z – координаты цвета поверхности при угловом поле наблюдения 10° ;

X, Y, Z – координаты цвета совершенного отражающего рассеивателя при угловом поле наблюдения 10° и стандартном излучении *CIE D₆₅*.

Одним из недостатков *CIE 1976 L*a*b** является необходимость дальнейшей коррекции изображений после преобразований *RGB – L*a*b** из-за смещения в сторону пурпурных цветов [5]. Изохроматические зоны пространства не имеют совершенно равной площади, что затрудняет колориметрические расчеты. Поэтому с этой точки зрения более удобным является пространство *CIE 1976 L*u*v**, усовершенствованное Робертсом в 1990 г. и нашедшее отражение в Публикации *CIE 2004 г.* и *ISO 11664-5*. Данное пространство описывается формулами [23]:

$$\begin{aligned}L^* &= 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16; \\ u^* &= 13L^*(u' - u'_n); \\ v^* &= 13L^*(v' - v'_n), \\ \text{где } f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) &= \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}}, \text{ если } \frac{Y}{Y_n} > \left(\frac{16}{29}\right)^3, \\ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) &= \frac{841}{108}\frac{Y}{Y_n} + \frac{4}{29}, \text{ если } \frac{Y}{Y_n} \leq \left(\frac{16}{29}\right)^3, \\ u' &= \frac{4x}{x+15y+3z}; \\ v' &= \frac{9y}{x+15y+3z}; \\ x &= \frac{X}{X+Y+Z}; \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z}; \\ \Delta(u', v') &= \left[(\Delta u')^2 + (\Delta v')^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \\ \Delta u' &= u'_1 - u'_0; \\ \Delta v' &= v'_1 - v'_0.\end{aligned}$$

Подстрочные индексы “0” означают параметр образца сравнения, “1” – испытуемого образца. Таким образом, цветовое различие ΔE_{uv}^* между двумя цветовыми стимулами рассчитывается как Евклидово расстояние между точками в пространстве ΔE_{ab}^* или ΔE_{uv}^* :

$$\begin{aligned}\Delta E_{uv}^* &= \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ \text{или } \Delta E_{uv}^* &= \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta c_{uv}^*)^2 + (\Delta H_{uv}^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.\end{aligned}$$

Условия визуального отображения. *ISO 3664* устанавливает условия наблюдения [24] с использованием относительных спектральных распределений источников D_{50} (*CIE F8*) и D_{65} . Чтобы определить цветовой

Таблица 3. Показатели освещения для различных условий отображения

Условия наблюдения	Источник ссылки		Освещенность/ яркость		Цветовой индекс рендеринга согласно CIE 13.3-1995		Индекс метамеризма согласно ISO/CIE 23603	
	Источ-ник	Чистота цвета	освещенность, лк	яркость, кд/м ²	главный индекс	специальный индекс от 1 до 8	видимый диапазон	УФ
Критическое сопоставление отпечатков (P1)	D ₅₀	0,005	2000±500 (2000±500) ^b	--	≥90	≥80	C или лучше (B или лучше)	<1,5 (<1) ^b
Прямой просмотр пленок (T1)	D ₅₀	0,005	2000±500 (2000±500) ^b	1270±320 (1270±160) ^c	≥90	≥80	C или лучше (B или лучше)	<1,5 (<1) ^b
Практическая оценка печати (P2)	D ₅₀	0,005	500±125	1270±320 (1270±160) ^c	≥90	≥80	C или лучше (B или лучше)	<1,5 (<1) ^b
Проекционный просмотр пленок (T2)	D ₅₀	0,005	500±125	1270±320	≥90	≥80	C или лучше (B или лучше)	<1,5 (<1) ^b
Цветные мониторы	D ₆₅	0,025	500±125	>80 (>60) ^b	не применим в компьютерной информации		не применим в компьютерной информации	

индекс рендеринга освещения и индекс метамеризма, необходимо измерить спектральное распределение освещения с помощью спектрорадиометра в диапазоне от 300 нм до 730 нм и интервалом 5 нм для условий P1 и P2, T1 и T2, которые приведены в таблице 3.

Пять метамерических различий находятся в видимом диапазоне спектра излучения источника, другие три – в ультрафиолетовом. Нормализованная функция S_n излучения S:

$$S_n(\lambda) = \frac{100S(\lambda)}{\sum_{400}^{700} S(\lambda)y_{10}(\lambda)\Delta\lambda}$$

Процедура CIE устанавливает требования, которые включены в ANSI CGATS TR 001-1993 для 928

цветов, определенных в ISO 12641 [25]. Метамеры рассчитаны для цветов, имеющих ΔE_{ab}* < 0,02. Метамерические различия для ламп представлены в таблице 4.

Метамеризм, обусловленный отображением цвета в программно-аппаратных средах (“компьютерный метамеризм”), согласно ISO/CIE 23603 рассчитывается по формуле [26]:

$$N = \sum_{300}^{460} S_n(\lambda')Q(\lambda')\Delta\lambda'$$

где S_n – нормализованная функция спектрального распределения симулятора излучения для области спектра от 300 до 460 нм;

Таблица 4. Цветовые различия метамеров

Лампа	CIE MI _{VIS} ^a	Различия метамерических образцов	
		Среднее ΔE _{ab} *	Максимальное ΔE _{ab} *
A (0,003)	1,15	0,80	1,45
B (0,005)	0,88	0,42	0,91
C (0,008)	0,97	0,59	1,33
D (0,001)	0,73	0,55	1,34
E (0,002)	0,89	0,48	1,20
F (0,007)	2,42	1,60	3,87
F 8	0,63	0,29	0,87

$Q(\lambda')$ – спектральный состав внешнего освещения образцов.

Согласно *ISO 7724* в измерениях предпочтительнее использовать модель стандартного колориметрического наблюдателя *CIE 1964 г.* и стандартное излучение *CIE* типа D_{65} . Для определения индекса метамеризма следует применять стандартное излучение *CIE* типа *A*. Принимая во внимание текстуру поверхности, выбирают один из вариантов условий освещения/наблюдения, установленных в *ISO 7724-1* [12]: для гладких лакокрасочных покрытий без текстуры и с поверхностной текстурой, включающие и исключающие зеркальное отражение зеркальное отражение.

Направления развития. В двумерных колориметрических измерениях присутствует проблема обеспечения требуемой точности и достоверности результатов, что обусловлено дефинитивной неопределенностью цвета и влиянием всех элементов измерительного канала. Данная проблема частично может быть решена путем построения условных шкал яркости в каждом цветовом канале по реперным точкам, в качестве которых могут использоваться опорные значения яркости, воспроизводимые областями на самом объекте (при статических измерениях) или источниками опорного излучения различной яркости (при динамических измерениях). В этой связи *ICC*, среди членов которой *Adobe Systems Incorporated, Agfa-Gevaert N.V., Apple Computer, Inc., Eastman Kodak Company, FOGRA-Institute, Microsoft Corporation, Silicon Graphics Inc., Sun Microsystems, Inc.*, разрабатывает спецификации для цветовых профилей. Официальный статус текущей версии – “Спецификация *ICC 1:1998-09*. Формат файла для цветовых профилей”, где показан циклический избыточный код алгоритма и диаграммы изображений. Данный документ, используемый в области операционного контроля цвета, активизировал деятельность комитетов *ANSI/CGATS* и *ISO/TC 130*. Для согласования Спецификаций *ICC* со стандартами в области отображения и измерения цвета и учета спектрального распределение освещения и геометрии пространства измерений необходима координация, а позже и пересмотр *ISO 5, ISO 3664* и *ISO 13655*. Стандарты *ISO 3664*, и *ISO 13655* включены в четыре части *ISO 5*, который является основой для оценки, метрологического, цветового менеджмента, и процесса контроля в графических технологиях и фотографии. Чтобы обеспечить лучшую совместимость с используемым спектрометрическим измерительным оборудованием, в стандарт дополнительно включены условия $M1, M2$, и $M3$, определенные в *ISO 13655*. Они практически эквивалентны *CIE D₅₀* ($M1$), *CIE D₅₀* с *UV*-фильтром свечения ($M2$) и *CIE D₅₀* с обоими *UV*-фильтрами свечения и поляризации.

Метод расширения динамического диапазона двумерных колориметрических измерений. Учитывая, что матричный фотоприемник имеет ограниченный динамический диапазон – около 60 дБ (в то время как значения освещенности на объекте могут отличаться на пять порядков), необходимо решить проблему его расширения для получения достоверных результатов. При одномерных измерениях данная проблема решается переключением диапазонов регистрирующего устройства.

Для проверки линейности фотометрической шкалы и расширения диапазона измерительного прибора *ISO 7724* рекомендует использовать серые нейтральные эталоны с тем, чтобы характеристики даже темных образцов могли бы быть измерены надежнее. В индустрии обработки цифровых изображений для расширения диапазона применяют либо гамма-коррекцию, сжимая участки вблизи области насыщения, либо технологию “реалистичных” изображений, заключающуюся в съемке объекта с различными выдержками или экспозициями и наложении слоев при формировании результирующего изображения. Однако эти приемы не оправдывают себя в цифровой колориметрии, поскольку не обеспечивают метрологическую прослеживаемости результатов.

Авторами предлагается при использовании матричных фотоприемников получать цифровые изображения объекта, выполненные из одной точки пространства при последовательно увеличивающемся времени экспозиции, после чего путем компьютерной обработки определять яркость контрольной точки на цифровом изображении объекта по трем цветовым каналам, сравнивать ее с опорными значениями и определять цветовые координаты и цветность данной точки в координатах стандартных цветовых пространств для каждого (красного, синего и зеленого) цветового канала по формуле [29]:

$$L_{R(G,B)} = KB\eta \left[(N - N_{01}) \frac{(L_2 k_2 - L_1 k_1)}{N_{02} - N_{01}} + L_1 k_1 \right],$$

где K – коэффициент масштабирования;

B – коэффициент, зависящий от спектральных свойств и индикатрисы рассеяния в контрольной точке поверхности объекта;

η – коэффициент, учитывающий параметры регистрации;

N – выходной сигнал матрицы ПЗС, соответствующий яркости контрольной точки на изображении объекта для данного канала, выраженный в относительных единицах;

L_1, L_2 – опорная яркость цветовых мишеней в данном цветовом канале, кд/м²;

N_{01}, N_{02} – выходные сигналы матрицы прибора с зарядной связью (ПЗС), соответствующие яркости изображения цветовых мишеней в данном цветовом канале.

Данные преобразования необходимо выполнить для каждого цветового канала. При расчетах следует учитывать свойства поверхности (коэффициент отражения) и параметры съемки. Сущность разработанной модели поясняется рисунком 3. 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 выдержках. По полученным опорным точкам строят линейные зависимости рабочей области фотоприемника до перехода в стадию насыщения.

Осуществляя сопряжение зависимостей, математически с достаточной для практики точностью можно рассчитать значения яркости точек на объекте в трех цветовых каналах, расширив таким образом динамический диапазон двумерных колориметрических измерений.

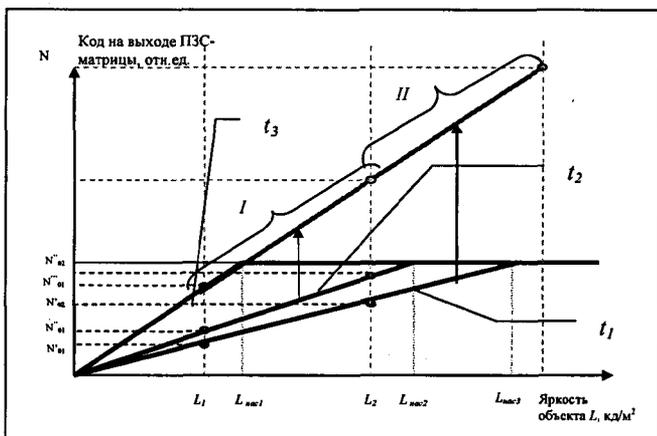


Рис. 3. Расширение динамического диапазона регистрируемой яркости изображений, выполненных при различных выдержках ($t_1 < t_2 < t_3$)

Заключение. Поскольку цвет представляет собой величину со значительной дефинитивной неопределенностью, получение дополнительной информации о нем позволит повысить точность и достоверность колориметрических измерений. Инновации в науке, цифровой технике и технологиях приводят к необходимости пересмотра действующих стандартов различных уровней. Поэтому в настоящее время наблюдается стремительное развитие стандартизации в колориметрии высокого разрешения как междисциплинарной области, предполагающей интеграцию направлений, связанных со стандартизацией элементов измерительного канала — первичных и вторичных излучателей, приемников светового излучения, цветовых моделей и условий колориметрических измерений. Актуальными направлениями являются обеспечение метрологической прослеживаемости и расширение динамического диапазона цветовых измерений.

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории оптико-электронных преобразований и Белорусском национальном техническом университете.

*Зуйков Игорь Евгеньевич
E-mail: ie-z@mail.ru*

*Савкова Евгения Николаевна
E-mail: evgeniya-savkova@yandex.ru*

Список литературы

1. Ноябрь – февраль -2006. IS&T Reporter “THE WINDOW ON IMAGING” Volume 21, Number 1 – February 2006 11 (1st 21-1_cooperative).
2. ГОСТ 13088-67. Колориметрия. Термины, буквенные обозначения. М.: Издательство стандартов. 1967.
3. Международный электротехнический словарь. Глава 845. Освещение.
4. ISO 7724-1-2008. Краски и лаки. Колориметрия. Часть 1. Основные положения.
5. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. Москва: Техносфера, 2008.
6. ISO 11664-2:2007 Колориметрия. Часть 2. Стандартные

источники света CIE.

7. ГОСТ 7721-89 Источники света для измерений цвета. Типы. Технические требования. Маркировка устанавливает следующие типы стандартных источников света
8. ISO 15469:2004 Пространственное распространение дневного света. Стандартное небо CIE.
9. ГОСТ 8.205-90. Государственная поверочная схема для средств измерений координат цвета и координат цветности. М.: Государственный комитет стандартов Совета министров СССР.
10. ISO 7944:1998 Оптика и оптическое оборудование. Эталонные значения длин волн.
11. ISO 2813:1994 Материалы лакокрасочные. Метод определения блеска лакокрасочных покрытий, не обладающих металлическим эффектом, под углом 20°, 60° и 85°.
12. ISO 7724-1-2008 Краски и лаки. Колориметрия. Часть 1. Основные положения.
13. ISO 11664-1-2007 Колориметрия. Часть 1. Стандартные колориметрические наблюдатели CIE.
14. Влияние структуры ПЗС-матрицы и расположения цветных фильтров на разрешающую способность изображения Режим доступа: <http://www.fototest.ru/articles/otherarticles/633>.
15. Милчев М. ПЗС-матрицы цифровых фотокамер. Режим доступа: <http://www.wizardfox.net/fototehnika-535/pzs-matricy-cifrovyyh-fotokamer-832>.
16. EN 112000:1992 Преобразователи электронно-оптические и электронно-оптические усилители яркости изображения. Общие технические условия.
17. EN 112001:1991 Преобразователь изображений и электронно-оптические преобразователи для усиления яркости изображения. Типовая форма частных технических условий.
18. ГОСТ 21316.0-75. Фотоэлементы. Методы измерения параметров. Введ. 01.01.79. М.: Издательство стандартов, 1976.
19. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. Введ. 01.07.89. М.: Издательство стандартов, 1988.
20. ГОСТ 21815.10-86. Преобразователи электронно-оптические. Метод измерения сигнала насыщения. М.: Издательство стандартов.
21. ГОСТ 28953 Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерений параметров.
22. ISO 11664-4:2007 Колориметрия. Часть 4. Цветовое пространство CIE 1976 L*a*b*.
23. ISO 11664-5:2007 Колориметрия. Часть 5. Цветовое пространство CIE 1976 L*u*v* и равноконтрастный цветовой график u', v'.
24. ISO 3664:2000 Условия визуального отображения. Графическая технология и фотография.
25. ISO 12641:1997 Технология полиграфии. Обмен цифровыми данными заданного формата. Цветные мишени для входной сканирующей калибровки.
26. ISO/CIE 23603:2005 Стандартный метод оценки спектрального качества имитаторов дневного света для визуальной оценки и измерения цвета.
27. ISO 15076-1:2010 Управление цветом в технологии изображений. Архитектура, формат профиля и структура данных. Часть 1. На основе ICC.1:2010.
28. Profile version 4.2.0.0) Image technology colour management – Architecture, profile format, and data structure.
29. Зуйков И.Е., Савкова Е.Н. Физическая и математическая модели измерения при автоматизированном контроле колориметрических характеристик объектов. Контроль, диагностика. Москва: Изд-во “Спектр”, №1, 2010.