

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО НОРМАТИВНОГО ПРАВОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОЛОРИМЕТРИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Предпосылки возникновения колориметрии высокого разрешения – цветное телевидение и цифровая фотография, а также необходимость обеспечения технической и информационной совместимости при передаче графических данных. Стандарты для управления цветом разрабатывались различными организациями независимо друг от друга. Однако повсеместное применение цифровых данных создает предпосылки для унификации и стандартизации в данном направлении.

На международном уровне деятельность по стандартизации в области управления цветом осуществляют Международная организация по стандартизации (ISO), Международная электротехническая комиссия (IEC), Международный союз электросвязи (ITU), Международная комиссия по освещению (CIE), Международный консорциум цвета (ICC), Комитет стандартов технологий изобразительного искусства. На региональном уровне такую деятельность осуществляют Европейский комитет по стандартизации (CEN), Европейский комитет по стандартизации в электротехнике (CENELEC), 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 работе выполнен краткий обзор состояния технического нормативного правового 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» [1]. Согласно Международному электротехническому словарю «цвет (воспринимаемый) – свойство зрительного восприятия, сочетающее хроматические и ахроматические признаки» [2]. 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» [3].

Анализ данных определений и последних опубликованных работ позволил сделать следующие выводы:

- 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;

- для количественной оценки цвета используются показатели, определяемые по трехмерным шкалам стандартизованных цветовых пространств. Измерение цвета в колориметрии высокого разрешения основано на метаметрии, аппроксимации и интерполяции сигналов, снимаемых с групп пикселей цветных периодических структур;

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

Измерительная цепь. Рассмотрение ключевых направлений развития технического регулирования и стандартизации в области колориметрии высокого разрешения будем осуществлять в контексте элементов измерительной цепи, представленных на рисунке 1. Цифровая камера «воспринимает» трехмерный объект как совокупность отсчетов яркости по трем цветовым каналам, имеющим 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 обеспечения единства измерений. Такие реперные точки должны иметь прослеживаемость до системных или внесистемных единиц и реализоваться 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 физиче-

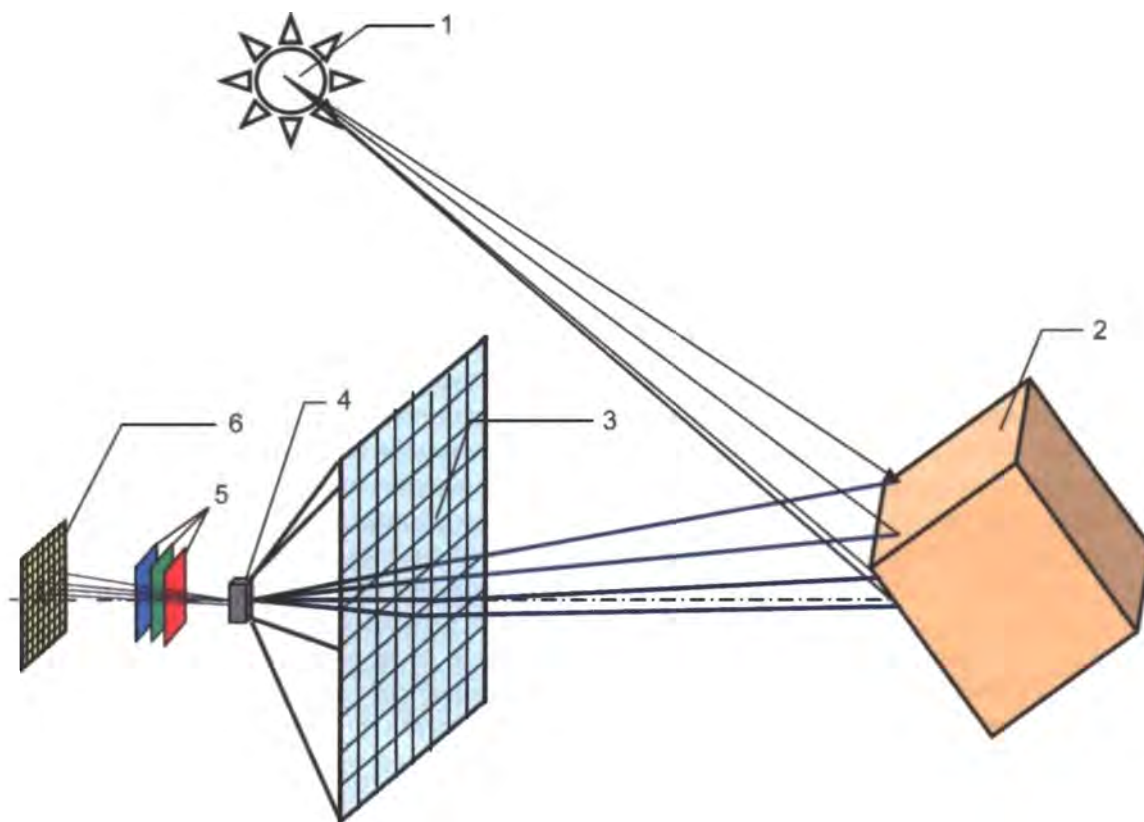
скому источнику света, такому как лампа или небо [6]. ГОСТ 7721 устанавливает четыре типа источников [7] – А, В, С, D₆₅ (см. таблицу 1).

Повсеместное принятие стратегий энергосбережения находит отражение в ISO 11664-2, который рекомендует два источника – А 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 классифика-

ции (приведено по 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 индикатрисы рассеяния; кратчайшего углового расстояния χ между элементом неба и солнцем; угловых расстояний между элементом неба и зенитом Z и между солнцем и зенитом Z_s , рад. и др.). Характеристики распределения яркости симметричны, описываются гладкими непрерывными функциями и предоставляют аппроксимации разорванных облаков. Это представлено в виде относительной индикатрисы рассеяния $f(\chi)$ и градаций яркости между горизонтом и зенитом (рисунок 2).

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



1 – источник света; 2 – регистрируемый объект; 3 – подпространство образов;
4 – фотоприемное регистрирующее устройство – оптико-электронный преобразователь;
5 – цветные светофильтры; 6 – плоскость цифрового изображения

Рисунок 1 – Принцип формирования цифрового изображения трехмерного объекта

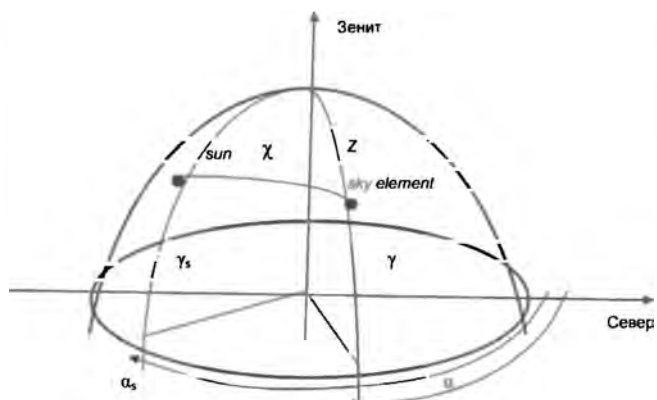


Рисунок 2 – Углы, определяющие положение солнца и элемента неба

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:

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

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 [9]. 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.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ 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 – $x = 0,0039 \div 0,7347$, $y = 0,0048 \div 0,8338$.

Таблица 2 – Эталонные длины волн

Спектр. линии	Ultraviolet Hg e-line	Violet Hg h-line	Blue Hg g-line	Blue Cd Fc-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

Средние квадратические отклонения результатов сличений S_c рабочих эталонов единиц координат цвета несамосветящихся объектов с государственным составляют [10]:

- для прозрачных образцов – $S_{x_c} = S_{y_c} = S_{z_c} = 0,1$;
- для отражающих образцов – $S_{x_\Sigma} = S_{y_\Sigma} = S_{z_\Sigma} = 0,25$.

Средние квадратические отклонения результатов сличений S_c рабочих эталонов единиц координат цветности несамосветящихся объектов с государственным не должны превышать:

- 0,007 – для координат цветности $x < 0,1$ или $y < 0,1$;
- 0,0007 – для координат цветности $x > 0,1$ или $y > 0,1$.

Средние квадратические отклонения результатов сличений рабочих эталонов единиц координат цветности самосветящихся объектов с государственным составляют $S_{x_\Sigma} = S_{y_\Sigma} = 0,0008 \div 0,0020$.

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 порошки 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 $R_{45/0}(\lambda)$ и $R_{0/45}(\lambda)$ 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 [11]: 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 r, g, b – функции, которые были получены как идентичные спектральной эффективности CIE;

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

нормализованная постоянная.

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 100 (не игнорируя центральные 40 или около этого):

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

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) [12] и SuperCCD Fujifilm [13], а также структурах «сэндвичного» типа фирмы Foveon [13]. В результате поиска стандартов, касающихся электронно-оптических преобразователей, были выявлены региональные стандарты EN 112000 [14] и EN 112001 [15] (устанавливают общие технические условия и требования к усилению яркости изображений), а также около двадцати межгосударственных стандартов, среди которых ГОСТ 21316, ГОСТ 17772, ГОСТ 21815 [16] – [18] (регламентируют требования к методам измерений характеристик электронно-оптических преобразователей) и ГОСТ 28953 [19], 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.

Продолжение статьи в следующем номере журнала

Е. Н. САВКОВА, канд. техн. наук, доцент кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы», ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории оптико-электронного приборостроения Белорусского национального технического университета

ЛИТЕРАТУРА

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.
3. Международный электротехнический словарь. Глава 845. Освещение.
4. СТБ ISO 7724-1-2008 Краски и лаки. Колориметрия. Часть 1. Основные положения.
5. Годен, Ж. Колориметрия при видеообработке. М.: Техносфера, 2008. – 328 с.
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.
8. ISO 15469:2004 Пространственное распространение дневного света. Стандартное небо CIE.
9. ISO 7944:1998 Оптика и оптическое оборудование. Эталонные значения длин волн.
10. ГОСТ 8.205-90 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений координат цвета и координат цветности.
11. ISO 11664-1-2007 Колориметрия. Часть 1. Стандартные колориметрические наблюдатели CIE.
12. Влияние структуры ПЗС-матрицы и расположения цветных фильтров на разрешающую способность изображения. Режим доступа: <http://www.fototest.ru/articles/otherarticles/633>.
13. Милчев, М. ПЗС-матрицы цифровых фотокамер. Режим доступа: <http://www.wizardfox.net/fototehnika-535/pzs-matricy-cifrovyyh-fotokamer-832>.
14. EN 112000:1992 Преобразователи электронно-оптические и электронно-оптические усилители яркости изображения. Общие технические условия.
15. EN 112001:1991 Преобразователь изображений и электронно-оптические преобразователи для усиления яркости изображения. Типовая форма частных технических условий.
16. ГОСТ 21316.0-75 Фотоэлементы. Общие требования при измерении параметров.
17. ГОСТ 17772-88 Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик.
18. ГОСТ 21815.10-86 Преобразователи электронно-оптические. Метод измерения электронно-оптического увеличения.
19. ГОСТ 28953-91 Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерений параметров.