

ВОПРОСЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ В КОЛОРИМЕТРИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

И. Е. ЗУЙКОВ, Е. Н. САВКОВА

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь, e-mail: evgeniya-savkova@yandex.ru

Рассмотрены факторы дефинитивной неопределенности цвета в программно-аппаратных средах, выполнен обзор нормативно-методического обеспечения применительно к различным 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 высокого разрешения, измерительная цепь, динамический диапазон.

The definitive uncertainty factors of colour in the software and hardware environments are considered and the review of regulatory and procedural assurance in relation to measuring circuit elements (primary and secondary radiation sources, photodetectors, color models, graphic data mapping conditions) is carried out. The basic directions of standardization development in high resolution colorimetry as in the interdisciplinary field were sorted out. A method of dynamic range expansion for two-dimensional colorimetric measurements allowing to improve the results reliability was suggested.

Key words: high resolution colorimetry, measuring circuit, dynamic range.

Колориметрия высокого разрешения – это методы и средства измерений (СИ) колориметрических характеристик объектов путем их цифровой регистрации системами с высоким пространственным разрешением (цифровыми камерами) и обработки цифровых изображений, с выполнением условий обеспечения требуемой точности и уровня доверия к результатам измерений. Ее истоками стали цветное телевидение и цифровая фотография, а также необходимость обеспечения технической и информационной совместимости при передаче

графических данных. В представленном в 2006 г. на конференции Технической ассоциации графических искусств (TAGA) отчете Д. Мак Дауэла говорилось о том, что традиционно стандарты для управления цветом разрабатывались различными организациями независимо друг от друга, однако, 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); на региональном уровне – Европейский Вещательный Союз (EBU) и др. Накопленный научный и практический опыт в фото- и радиометрии, полиграфии и телекоммуникациях, а также необходимость в экономической эффективности приводят к вопросу проведения междисциплинарных исследований и создания общей базы стандартов для непрерывный обмена информацией. Рассмотрим кратко состояние технического нормативного правового обеспечения в области колориметрии высокого разрешения 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 [2], цвет – это аффинная векторная величина трех измерений, выражающая свойство общее всем спектральным составам излучения, визуально неразличимым в колориметрических условиях наблюдения. В [3] цвет (воспринимаемый) рассмотрен как свойство зрительного восприятия, сочетающее хроматические и ахроматические признаки. В соответствии с [4] цвет характеризуется для определенных наблюдателя и источника света координатами точки в пространстве, образуемом тремя взаимно перпендикулярными векторами. Анализ определений и последних опубликованных работ позволил сделать ряд выводов.

Цвет воспринимается как в своем пространстве, так и на фоне и является одним из звеньев смены цветов в определенной последовательности. Для его количественной оценки 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. Воспроизведение оттенков каждого цвета ограничено по яркости количеством градаций в каждом цветовом канале (8, 12 и 24 бита на канал), а по времени – частотой Найквиста, равной половине частоты дискретизации [5]. Перечисленные особенности увеличивают дефинитивную неопределенность цвета в программно-аппаратных средах.

Измерительная цепь. Проанализируем ключевые направления развития стандартизации и нормирования в области колориметрии высокого разрешения в контексте элементов измерительной цепи, представленной на рис. 1, состоящей из источника света 1, объекта измерения 6, подпространства образов 5, цифровой камеры и плоскости цифрового изображения 2. Световой поток от источника света с заданными характеристиками попадает на поверхность исследуемого объекта, где частично поглощается и отражается в соответствии с ее

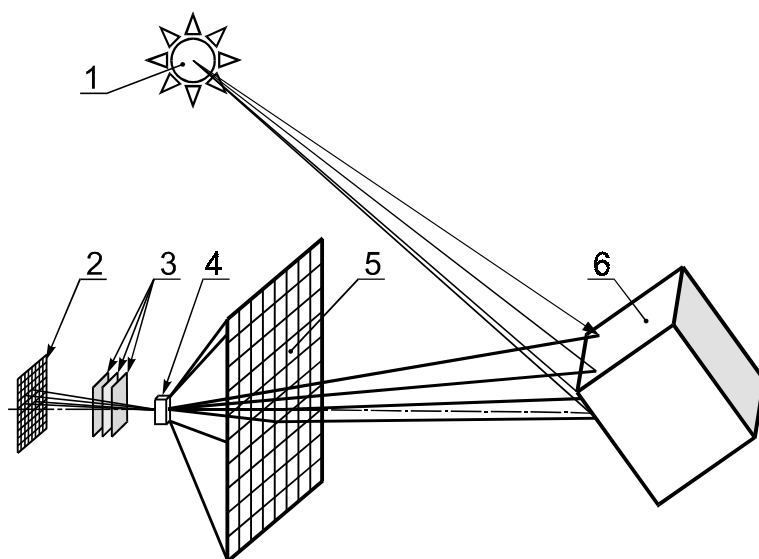


Рис. 1. Принцип формирования цифрового изображения трехмерного объекта:

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

спектральными характеристиками. Все результаты регистрирует цифровая камера в пространстве $sRGB$, которое затем необходимо преобразовать в XYZ . Задача корректного цветовоспроизведения решается на основе детального анализа последовательности преобразований измеряемой величины в измерительной цепи и установления реперных точек для выполнения условия обеспечения единства измерений. Реперные точки должны иметь прослеживаемость до системных или внесистемных единиц и реализовываться с помощью материализованных или виртуальных мер и стандартизованных моделей (первичных, вторичных излучателей, стандартного наблюдателя, цветовых пространств и т. д.).

Стандартизация первичных излучателей. В соответствии с [6] термин «первичный источник света» применим к физическому источнику, такому как лампа или небо, а стандарт [7] устанавливает четыре типа источников – A, B, C, D₆₅ (табл. 1).

Вопросы энергосбережения находят отражение в [6], где рекомендованы два источника A и D₆₅ (с введением поправок на влияние ультрафиолетовой (УФ) области спектра, времени года и дня, а также географического расположения) и в [8], описывающем относительное распределение яркости неба в некоторой точке как функцию яркости в зените, что чрезвычайно важно при управлении естественным светом и проектировании освещения в «зеленых» зданиях. Приведенные распределения яркости неба в широком диапазоне погодных условий являются универсальной основой для их классификации (по шесть групп градаций и индикатрис для 15 типов различных сочетаний параметров

Т а б л и ц а 1

Стандартные источники света

Тип источника	Цветовая температура, К	Координаты цветности		Область применения
		X	Y	
A	2856	0,448	0,407	Искусственное освещение Прямое солнечное освещение Освещение рассеянным дневным светом Репрезентативный дневной свет
B	4874	0,348	0,352	
C	6774	0,310	0,316	
D ₆₅	6504	0,313	0,329	

градаций яркости: азимутов элемента неба α и солнца α_s , 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 и др.). Характеристики распределения яркости симметричны, описываются гладкими непрерывными функциями и представляют аппроксимации разорванных облаков, что показано в виде 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 $\chi = \arccos(\cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos |\alpha - \alpha_s|)$.

Для описания материалов, систем и средств в оптическом диапазоне в [9] установлены эталонные значения длин волн, в том числе рекомендованы две длины волн: линии ртути (mercury *e*-line) и гелия (helium *e*-line), равные 546,07 и 587,56 нм, соответственно. Рекомендуемые эталонные длины волн в видимом и УФ-диапазонах представлены в табл. 2.

Для лазерного излучения установлены три длины волн: He-Ne – 543,5 и 632,8 нм, Nd:YAG – 1064,1 нм.

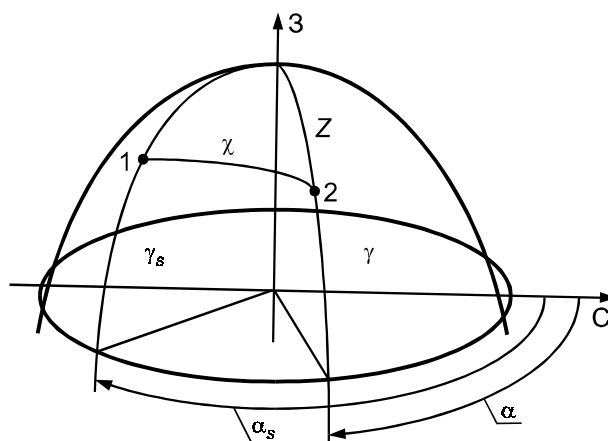


Рис. 2. Углы, определяющие положение солнца и элемента неба:

1 – солнце; 2 – элемент неба; 3 – зенит; C – север

Эталонные длины волн

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

Стандартизация вторичных излучателей. В соответствии с [10] 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 $X = 2,5 - 109,0$, $Y = 1,4 - 98,0$, $Z = 1,7 - 107,0$, и системы регистрации и обработки информации для координат цветности – $X = 0,0039 - 0,7347$, $Y = 0,0048 - 0,8338$. Средние квадратические отклонения (СКО) результатов сличений S_x рабочих эталонов единиц координат цвета несамосветящихся объектов с государственным составляют: для прозрачных – $S_{x\lambda} = S_{y\lambda} = S_{z\lambda} = 0,1$ и для отражающих образцов – $S_{x\lambda} = S_{y\lambda} = S_{z\lambda} = 0,25$. Они не должны превышать 0,007 – для X и Y менее 0,1 и 0,0007 – для X и Y более 0,1. СКО результатов сличений рабочих эталонов единиц координат цветности самосветящихся объектов с государственным эталоном равно $S_{x\lambda} = S_{y\lambda} = 0,0008 - 0,0020$.

В [4] рекомендованы 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, при этом изготовитель обязан указывать спектральные данные порошка для разных длин волн, которые выбираются таким образом, чтобы можно было проводить интерполяцию коэффициентов отражения или факторов коэффициента отражения с точностью $\pm 0,001$. Степень согласования спектральных факторов коэффициента отражения $R_{45/0}(\lambda)$, $R_{0/45}(\lambda)$ таблеток из сульфата бария, пока не определена. Рабочие эталоны выполняют из молочного стекла, витролита или керамики, они

должны быть калиброваны по эталону из сульфата бария с тем прибором, на котором они будут использованы. Проверка повторяемости и воспроизводимости метода измерений может быть выполнена с использованием набора спектрально-селективных рабочих эталонов. Также стандарт [4] устанавливает методы определения координат цвета и цветовых различий лакокрасочных покрытий с использованием измерительных приборов и приводит определения спектральных радиометрических характеристик – фактора коэффициента отражения $R(\lambda)$, спектральных коэффициентов отражения обычного $\rho(\lambda)$ и диффузного $\rho_d(\lambda)$.

Стандартизация приемников излучения. Для наглядности и достоверности графических данных используют две эмпирические модели стандартного наблюдателя CIE 1931 и 1964 гг., регламентируемые [11]. Первая модель разработана Райтом и Гилдом на основе исследований цветовых восприятий 17 респондентов в диапазоне длин волн 400 – 700 нм с добавлением смеси вещества красного, зеленого и синего цветов, для углового зрения 2° и 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, полученные 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 выведена Стайлсом, Берхом и Сперанской для 67 наблюдателей и основана на монохроматических стимулах спектра путем аппроксимации 390 – 830 нм с добавлением пропорций R, G, B световых полей с использованием поля зрения 10° (не игнорируя центральные 4°)

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

Данные модели применяли в матричных регистрирующих устройствах, также широкое распространение получили технологии «один кадр – одна матрица», реализованные на матричных структурах «решетка» Байера и SuperCCD Fujifilm [12] и структурах «сэндвичного» типа фирмы Foveon [13]. При поиске документов, касающихся электронно-оптических преобразователей, были найдены региональные стандарты [14] и [15], устанавливающие общие технические условия и требования к усилению яркости изображений, а также около двадцати межгосударственных стандартов [16 – 18], устанавливающих требования к методам измерений характеристик электронно-оптических преобразователей) и [19], указывающий требования к измерению параметров фоточувствительных приборов с переносом заряда: сигналов насыщения, ин-тегральной чувствительности, выходного и темнового, 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**, *CIE Lu*v** и др. [5]. Аппаратно зависимые модели (*sRGB*, *AdobeRGB*) приводят к аппаратно независимым, наилучшим образом отражающим механизмы зрительного восприятия цвета [5]. В полиграфии применяют пространство *CIE La*b** [20], координаты которого рассчитывают следующим образом

$$L^* = 116 \sqrt[3]{Y/Y_n} - 16 \quad \text{для } Y/Y_n \leq 0,008856;$$

$$L^* = 903,3 Y/Y_n \quad \text{для } Y/Y_n \leq 0,008856;$$

$$a^* = 500[(f(X/X_n) - f(Y/Y_n))];$$

$$b^* = 200[(f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n))],$$

где X, Y, Z – координаты цвета поверхности при угловом поле наблюдения 10° ; X_n, Y_n, Z_n – координаты цвета совершенного отражающе-

го рассеивателя при угловом поле наблюдения 10° и стандартном излучении CIE D₆₅, $f(X/X_n) = \sqrt[3]{X/X_n}$ для $X/X_n \leq 0,008856$; $f(X/X_n) = 7,787 X/X_n + 16/116$ для $X/X_n \leq 0,008856$.

Один из недостатков CIE 1976 $L^*a^*b^*$ – необходимость дальнейшей коррекции изображения 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 более удобным является пространство CIE 1976 $L^*u^*v^*$, усовершенствованное Робертсом в 1990 г. Оно описывается формулами [21]:

$$L^* = 116 f(Y/Y_n) - 16 ; u^* = 13L^*(u' - u'_n) ; v^* = 13L^*(v' - v'_n),$$

где $f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3}$, $f(Y/Y_n) = 841Y/108Y_n + 4/29$ при $Y/Y_n \leq (16/29)^3$.

$$u' = \frac{4x}{x + 15y + 3z}; v' = \frac{9y}{x + 15y + 3z}; x = \frac{X}{X + Y + Z}; y = \frac{Y}{X + Y + Z};$$

$$\Delta(u', v') = \left[(\Delta u')^2 + (\Delta v')^2 \right]^{1/2}; \Delta u' = u'_1 - u'_0; \Delta v' = v'_1 - v'_0.$$

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}^* :

$$\Delta E_{uv}^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2 \right]^{1/2} \text{ или } \Delta E_{uv}^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{uv}^*)^2 + (\Delta H_{uv}^*)^2 \right]^{1/2}.$$

Условия визуального отображения. В [22] установлены условия наблюдения с использованием относительных спектральных распределений источников D₅₀ (CIE F8) и D₆₅. Для определения индексов цветопередачи источника света и метамеризма, необходимо измерить спектральное распределение освещения с помощью спектрорадиометра в диапазоне 300 – 730 нм и интервалом 5 нм для условий P1 и P2, T1 и T2, приведенных в табл.3.

Показатели освещения для различных условий отображения

Условия наблюдения	Источник	Чистота цвета	Освещенность, лк	Яркость, кд/м ²	Индекс цветопередачи, согласно [23]		Индекс метамеризма, согласно [24]	
					главный	специальный 1 – 8	диапазон видимый	УФ
Критическое сопоставление отпечатков (P1)	D ₅₀	0,005	2000±500 (2000±500)	–	≥ 90	≥ 80	С или лучше (В или лучше)	<1,5 (<1)
Прямой просмотр пленок (T1)	D ₅₀	0,005	2000±500 (2000±500)	1270±320 (1270±160)	То же	То же	То же	<1,5 (<1)
Практическая оценка печати (P2)	D ₅₀	0,005	500±125	1270±320 (1270±160)	То же	То же	То же	<1,5 (<1)
Проекционный просмотр пленок (T2)	D ₅₀	0,005	500±125	1270±320	То же	То же	То же	<1,5 (<1)
Цветные мониторы	D ₆₅	0,025	500±125	<80 (<60)	не применяется в компьютерной информации			

Пять метамерических различий находятся в видимом диапазоне спектра излучения источника, другие три – в УФ. Нормализованная

$$\text{функция } S_n \text{ излучения } S \text{ равна } S_n(\lambda) = \frac{100S(\lambda)}{\sum_{400}^{700} S(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)\Delta\lambda}.$$

Процедура CIE устанавливает требования, включенные в ANSI CGATS TR 001-1993 для 928 цветов, определенных в [23]. Метамеры рассчитаны для цветов, имеющих $\Delta E_{ab}^* < 0,02$. Метамерические различия для ламп представлены в табл. 4.

Метамеризм, обусловленный отображением цвета в программно-аппаратных средах («компьютерный метамеризм»), согласно [24] рассчитывается по формуле

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

где $S_n(\lambda')$ – нормализованная функция спектрального распределения симулятора излучения для области спектра 300 – 460 нм; $Q(\lambda')$ – спектральный состав внешнего освещения образцов.

Согласно [4] в измерениях предпочтительнее использовать модель стандартного колориметрического наблюдателя CIE 1964 г. и стандартное излучение CIE типа D₆₅. Для определения индекса метамеризма следует применять стандартное излучение CIE типа A. Принимая во внимание

Т а б л и ц а 4

Цветовые различия метамеров

Лампа	CIE M _{vis} ^a	Различия метамерических образцов, ΔE_{ab}^*	
		среднее	максимальное
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

^a – значения, относящиеся к дополнительному стандартному колориметрическому наблюдателю CIE от 1964 г.

текстуру поверхности, выбирают один из вариантов условий освещения (наблюдения), установленных в [12]: для гладких лакокрасочных покрытий без текстуры и с поверхностной текстурой, включающие и исключающие зеркальное отражение.

Направления развития. В двумерных колориметрических измерениях существует проблема обеспечения требуемой точности и достоверности результатов, обусловленная значительной дефинитивной неопределенностью цвета и влиянием всех элементов измерительной цепи. Периферийные устройства помимо различий в физической реализации, имеют ограниченные цветовые охваты, «обрезающие» цветное тело исходного пространства, что корректируется программными средствами путем интерполяции. Использование искривленных пространств при математическом описании цветных тел, их преобразования, эффекты квантования, сжатие графических файлов с потерей данных также затрудняют процессы корректной цветопередачи. 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 были разработаны спецификации для цветных профилей с официальным статусом текущей версии – «Спецификация ICC. 1:1998-09 Формат файла для цветных 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 со стандартами в области отображения и измерения цвета и учета спектрального распределения освещения и геометрии пространства измерений необходима координация, а позже и пересмотр ряда документов [22, 25 – 29].

Метод расширения динамического диапазона двумерных колориметрических измерений. Матричный фотоприемник имеет довольно ограниченный динамический диапазон – около 60 дБ и необходимо решить проблему его расширения для получения достоверных результатов. При одномерных измерениях она устраняется переключением диапазонов регистрирующего устройства. Для проверки линейности фотометрической шкалы и расширения диапазона измерительного

прибора в [4] рекомендуется использование серых нейтральных эталонов с тем, чтобы характеристики даже темных образцов могли бы быть точнее измерены. 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 и наложении слоев при формировании результирующего изображения. Однако эти приемы не оправдывают себя в цифровой колориметрии, поскольку не обеспечивают метрологической прослеживаемости.

При использовании матричных фотоприемников авторы предлагают получать цифровые изображения объекта, выполненные из одной точки пространства при линейно 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 [30]

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

где K – коэффициент масштабирования; B, η – показатели, зависящие от спектральных свойств и индикатрисы рассеяния в контрольной точке поверхности объекта и учитывающие параметры регистрации, соответственно; N – выходной сигнал ПЗС-матрицы, 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 ПЗС-матрицы.

Данные преобразования необходимо выполнить для каждого цветового канала. При расчетах следует учитывать свойства поверхности (коэффициент отражения) и параметры съемки. Разработанная модель показана на рис. 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

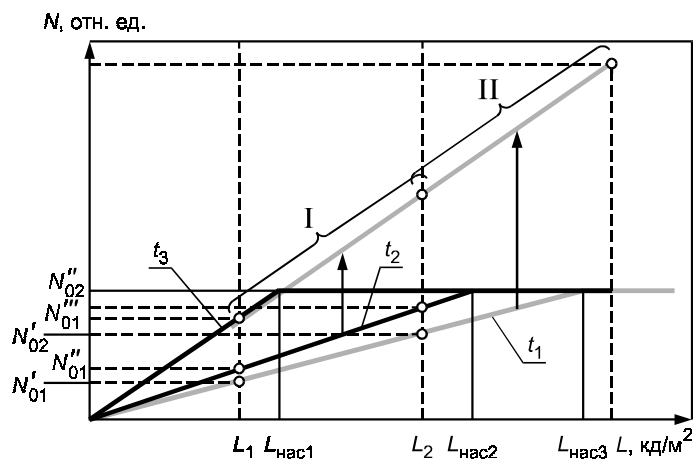


Рис. 3. Расширение динамического диапазона регистрируемой яркости изображений, выполненных при различных выдержках ($t_1 < t_2 < t_3$)

строят линейные зависимости рабочей области фотоприемника до перехода в стадию насыщения.

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

Таким образом, 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 становятся обеспечение метрологической прослеживаемости и расширение динамического диапазона цветовых измерений.

1. **IS&T Reporter** «The window on imaging». 2006. V. 21. N 1.
2. **ГОСТ 13088–67**. Колориметрия. Термины, буквенные обозначения.
3. **МЭК 60050-845:1987**. Международный электротехнический словарь – Глава 845: Освещение.
4. **ISO 7724-1-2008**. Краски и лаки. Колориметрия. Ч. 1. Основные положения.
5. **Годен Ж.** Колориметрия при видеообработке. М.: Техносфера, 2008.
6. **ISO 11664-2:2007**. Колориметрия. Ч. 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**. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений координат цвета и координат цветности.
11. **ISO 11664-1-2007**. Колориметрия. Ч. 1. Стандартные колориметрические наблюдатели CIE.
12. **Милчев М.** ПЗС-матрицы цифровых фотокамер [Электрон. ресурс] <http://www.wizardfox.net/fototehnika-535/pzs-matrixu-cifrovyh-fotokamer-832> (дата обращения 03.02.2013).
13. **Влияние** структуры ПЗС-матрицы и расположения цветных фильтров на разрешающую способность изображения фотокамер [Электрон. ресурс] <http://www.fototest.ru/articles/otherarticles/633> (дата обращения 03.02.2013).
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.
20. **ISO 11664-4:2007.** Колориметрия. Ч. 4. Цветовое пространство CIE 1976 $L^*a^*b^*$.
21. **ISO 11664-5:2007.** Колориметрия. Ч. 5. Цветовое пространство CIE 1976 $L^*u^*v^*$ и равноконтрастный цветовой график u', v' .
22. **ISO 3664:2000.** Условия визуального отображения. Графическая технология и фотография.
23. **ISO 12641:1997.** Технология полиграфии. Обмен цифровыми данными заданного формата. Цветные мишени для входной сканирующей калибровки.
24. **ISO/CIE 23603:2005.** Стандартный метод оценки спектрального качества имитаторов дневного света для визуальной оценки и измерения цвета.
25. **ISO 5-1:2009.** Фотография и графические технологии – измерения плотности. Геометрия и функциональная запись.
26. **ISO 5-2:2009.** Фотография и графические технологии – измерения плотности. Геометрические условия для измерения плотности пропускания.
27. **ISO 5-3:2009.** Фотография и графические технологии – измерения плотности. Спектральные условия.
28. **ISO 5-4:2009.** Фотография и графические технологии – измерения плотности. Геометрические условия для измерения плотности отражения.
29. **ISO 13655:2009.** Graphic technology – Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images.
30. **Зуйков И. Е., Савкова Е. Н.** Физическая и математическая модели измерения при автоматизированном контроле колориметрических характеристик объектов //Контроль, диагностика. 2010. № 1. С. 39 – 45.

Дата принятия 14.01.2013 г.

