

УДК 159.935.51+535.64

В.В. Ткаченко, зав. лабораторией, канд. техн. наук
(Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск);
Е.Н. Савкова, доц., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск)

О СФЕРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ РАЗЛИЧИЙ В ЦВЕТОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ

Цвет есть феномен зрительного восприятия, сложное психофизическое явление и фотобиологическая величина, определяемая в трёхмерной системе координат (цветовом пространстве). Колориметрические методы исследований в полиграфии основаны на определении цветовых различий на качественном (визуальном) и количественном (аппаратурном) уровнях. При этом источниками прослеживаемости цвета в визуальных методах являются воспроизводимые в памяти человека мыслеобразы и опорные образцы (оригиналы), имеющие физическую реализацию (цветовые мишени). Источники метрологической прослеживаемости в количественных методах – это первичные, вторичные и рабочие эталоны координат цвета и цветности, воспроизводимые материальными мерами – наборами стандартных образцов, формирующими цветовые палитры и шкалы. Поскольку неопределённость есть фактор риска принятия некорректных решений (ложная браковка/приемка), она должна быть оценена вместе со значением измеряемой величины.

Цветовое зрение человека, как и живых организмов, разделяется на два взаимосвязанных процесса – хроматическая и ахроматическая чувствительности. Для их описания вводится понятие цифрового пространства восприятия, геометрическими моделями которого являются двумерные и трехмерные диаграммы цветности. В результате уточнений эмпирических данных по результатам многолетних исследований пороговых и надпороговых характеристик цветовосприятия Международной комиссией по освещению (МКО) модели субъективного цветового пространства многократно пересматривались и на сегодня в качестве стандартов используются модели, построенные в различных системах координат. Несмотря на то, что для большинства практических приложений принятые МКО системы дают удовлетворительные результаты метрологического оценивания, в них не учтены все особенности визуального восприятия и их нельзя признать универсальными. Одной из таких особенностей является феномен Джадда – Мак Адама, названный его первооткрывателями «систематическая неаддитивность геодезической цветового пространства».

Научной школой Е. Н. Соколова [1] на основе психофизических исследований зрения человека и большого количества поведенческих опытов на животных построена сферическая модель цветовосприятия, позволяющая объяснить наблюдаемые феномены и преодолеть проблемы построения геометрической модели, адекватной эмпирическим данным. Согласно сферической модели различие между яркостями двух излучений (стимулов) i и j характеризуется системой уравнений в декартовых координатах:

$$x_{i1}^2 + x_{i2}^2 + x_{i3}^2 = 1, \quad (1)$$

$$d_{ij}^2 = \sum_{k=1}^3 (x_{ki} - x_{kj})^2. \quad (2)$$

Соотношение между угловым расстоянием на сфере и евклидовым различием выражается формулой: $d_{ij} = 2\sin(\delta/2)$, где d_{ij} – расстояние между точками, лежащими на поверхности сферы единичного радиуса и соответствующими сравниваемым значениям цвета, δ – угол между этими точками относительно центра сферы.

Стандартная неопределенность, приписываемая выходной величине, в относительном виде рассчитывается по формуле [2]:

$$\frac{u(\Delta S)}{\Delta S} = \sqrt{\frac{u^2(\Delta C)}{(\Delta C)^2} + \frac{u^2(\Delta W)}{(\Delta W)^2}}. \quad (3)$$

Здесь ΔS – общее цветовое различие, $(\Delta C)^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2$ и $(\Delta W)^2 = \Delta y_1^2 + \Delta y_2^2$ – независимые переменные, входящие в модель со своими неопределенностями в цветовых различиях по хроматическим и ахроматическим различиям. В этих выражениях $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ соответствуют трем каналам восприятия цвета по типам фоторецепторов сетчатки глаза, а Δy_1 и Δy_2 – двум (световому и темновому) каналам восприятия положительных и отрицательных перепадов яркости, через которые формируется нейрофизиологические сигналы, соответствующие характеристикам «белизна» или «светлота». Результатами психофизических и психофизиологических исследований [1] установлено, что в нейронной системе зрительного анализатора вместе с фоторецепторами организованы четыре канала формирования условных рефлексов: яркостный, темновой и два оппонентных – красно-зеленый и сине-желтый. Сенсорное цветовое пространство представляет собой четырехмерную гиперсферу. Две его координат представлены двумя типами цветооппонентных нейронов, а две другие – нейродетекторами перепадов яркости, сигналы которых формируются только в динамике, обусловленной движением сцены или самого глазного яблока.

Принимая во внимание, что при малых угловых расстояниях между стимулами различие между ними на (гипер)сфере может оце-

ниваться в евклидовой метрике ($d_{ij} \approx \delta$), дефинициальную неопределенность можно характеризовать с применением модели [3] *LMS*-стимулов воздействия актиничного излучения на сетчатку глаза:

$$L_Q = k_L \int P_\lambda(\lambda) \cdot \bar{l}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$M_Q = k_M \int P_\lambda(\lambda) \cdot m(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$S_Q = k_S \int P_\lambda(\lambda) \cdot \bar{s}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Стимулы с соответствующими спектральными распределениями света P_λ определены с точностью L_Q (419,0±3,6 нм), M_Q (530,8±3,6 нм) и S_Q (558,4 ±5,2 нм) [3]. Дефинициальная неопределенность (7) при

$$u_{def} = \sqrt{u^2(L_Q) + u^2(M_Q) + u^2(S_Q)} \quad (7)$$

равномерном распределении вероятностей в интервалах допусков $\pm \Delta$ для каждой составляющей рассчитано как стандартное отклонение по формуле:

$$u_{def} = \sqrt{\frac{\Delta_{LQ}^2}{3} + \frac{\Delta_{MQ}^2}{3} + \frac{\Delta_{SQ}^2}{3}} \approx 4,2 \text{ нм.} \quad (8)$$

Заключение. Установлена применимость колориметрических моделей CIE System для оценки дефинициальной неопределенности определения локальных цветовых различий в четырехмерном цветовом пространстве зрительного восприятия. Оценка, полученная с применением модели *LMS*-стимулов согласуется с экспериментальными данными пороговых значений цветоразличия, полученных на сферической модели цветового пространства, адекватно представляющего глобальную метрику цветовых различий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов, Ч.А., Соколов Е.Н., Черноризов А.М. Психофизиология цветового зрения. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1989.
2. ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределенности измерения.
3. Colorimetry. Understanding the CIE System. Edited by Jarnos Schanda/ University of Pannonia, Hungary/ Wiley-Interscience / a John Wiley & sons, Inc., Publication / Hoboken, New Jersey Published simultaneously in Canada. – 499 p.