



Квантовая модель низшей метрики цвета

А.И. Мазуров, К.А. Раевская

© Авторы, 2013

Анатолий Иванович

Мазуров –

*к.т.н., ст. науч. сотрудник,
зам. генерального директора по науке,
НИПК Электрон*

E-mail: mazurov@electronxray.com

Ксения Александровна

Раевская –

*математик-программист,
НИПК Электрон*

E-mail: omb@electronxray.com

Предложена параметрическая модель низшей метрики цвета, по которой цвет характеризуется тремя параметрами: средним за время суммации числом эффективно поглощенных в сетчатке глаза фотонов Φ , их энергией E и дисперсией энергии $D(E)$. Погрешности вычислений цветностей этих метамеров в предложенной колориметрической системе $\Phi ED(E)$ не превышают 13,5 %.

Ключевые слова: колориметрия, метамеры, низшая метрика цвета.

It is offered a parametric model of the lowest metrics of color on the base of which the color is characterized by three parameters: average number (during summation time) of effectively absorbed by human retina photons F , their energy E and dispersion energy $D(E)$. The metamer chromaticity miscalculations for the submitted colorimetric system $\Phi ED(E)$ is at least 13,5 %.

Keywords: colorimetry, metamer, lowest metrics of color.

Колориметрия как наука существует более 350 лет. К настоящему времени разработано более 60 теорий цветового зрения. Но ни одна из них не может ответить на целый ряд важных вопросов физики, физиологии и психологии зрения, поэтому даже наиболее распространенную трехкомпонентную теория Юнга–Гельмгольца, на которой основано большинство технических приложений, многие видные ученые считают крайне несовершенной. В результате на практике используется веер теорий (моделей) в зависимости от поставленных задач.

Поиск разгадки цветового зрения продолжается. К важным нерешенным проблемам физики зрения относится вопрос о физических параметрах, используемых зрительной системой для сбора спектров в метамерные (неразличимые) группы, которые на психологическом уровне воспринимаются как один цвет. Сразу же отметим, что ответ на этот вопрос не зависит ни от строения зрительной системы (физиология зрения), ни от психологии восприятия цвета. Он целиком и полностью определяется опытами по уравниванию по цвету световых потоков, имеющих разный спектральный состав в колориметрических условиях наблюдения, т.е. относится, по классификации Шредингера, к разделу низшей метрики цвета, когда зрительная система не видит разницы в цвете полей сравнения.

Проанализировав многочисленные исследования по уравниванию цветаметамерных световых потоков [1–3], авторы сделали предположение о кодировании цвета физическими параметрами воспринимаемого света.

Решая вопрос о физических параметрах цвета и постулируя параметрический принцип кодирования цвета, авторы исходили из квантовой теории света и законов Г. Грассмана, один из которых



устанавливает трехмерность цвета, а другой говорит о том, что при смешении цветов их количества складываются.

Трехмерность наиболее простых монохроматических цветов, которые не имеют метамеров, характеризуется (если не считать поляризацию, которую зрение человека не воспринимает) тремя параметрами: средним числом поглощенных сетчаткой фотонов (Φ) за время зрительной суммации, их энергией E и дисперсией этой энергии $D(E)$. Введение в качестве третьего параметра (дисперсии энергии) обусловлено тем, что поток фотонов видимого участка спектра флуктуирует по закону Пуассона [4]. Других независимых параметров для монохроматических цветов не существует.

Поскольку при смешении монохроматических цветов их количества складываются, весьма правдоподобно предположение, что их параметры также суммируются. Тогда цвет излучения сложного спектрального состава можно характеризовать параметрами (координатами):

$$\Phi = K \int_{0,38}^{0,76} I_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda;$$

$$E = K \int_{0,38}^{0,76} I_{\lambda} V_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} d\lambda;$$

$$D(E) = K \int_{0,38}^{0,76} I_{\lambda} V_{\lambda} \varepsilon_{\lambda}^2 d\lambda,$$

где K – постоянный коэффициент; I_{λ} – спектр излучения; V_{λ} – кривая видности; ε_{λ} – энергия фотона с длиной волны λ .

Координаты цветностей в предлагаемой колориметрической системе $\Phi ED(E)$ будут равны

$$\bar{\varepsilon} = \frac{E}{\Phi}; \quad \bar{\varepsilon}^2 = \frac{D(E)}{\Phi}.$$

Число эффективно поглощенных фотонов в работе приравнивается к яркости [5].

Проверку выдвинутой гипотезы осуществляли путем вычисления координаты цветностей $\bar{\varepsilon}$ и $\bar{\varepsilon}^2$ метамерных спектров.

В качестве метамеров использовали две группы спектров, стандартизованных Международной комиссией по освещению (МКО).

Первую группу составили монохроматические излучения видимого участка спектра в диапазоне от 380 до 760 нм с шагом

0,05 мкм, уравненные по цвету с основными цветами колориметрической системы RGB. В этом случае координаты цветности равны

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{\lambda} &= \frac{\bar{r}_{\lambda} \varepsilon_R + 4,5907 \bar{g}_{\lambda} \varepsilon_G + 0,0601 \bar{b}_{\lambda} \varepsilon_B}{\bar{r}_{\lambda} + 4,5907 \bar{g}_{\lambda} + 0,0601 \bar{b}_{\lambda}}; \\ \bar{\varepsilon}_{\lambda}^2 &= \frac{\bar{r}_{\lambda} \varepsilon_R^2 + 4,5907 \bar{g}_{\lambda} \varepsilon_G^2 + 0,0601 \bar{b}_{\lambda} \varepsilon_B^2}{\bar{r}_{\lambda} + 4,5907 \bar{g}_{\lambda} + 0,0601 \bar{b}_{\lambda}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь \bar{r}_{λ} , \bar{g}_{λ} и \bar{b}_{λ} – удельные координаты основных цветов системы RGB. В этом случае одно сравниваемое поле освещено монохроматическим светом, а другое состоит из смеси излучений с длинами волн $\lambda_R = 0,7000$ мкм, $\lambda_G = 0,5461$ мкм, $\lambda_B = 0,4358$ мкм.

Расчеты, выполненные по соотношениям (1), показали, что экспериментальные координаты цветности $\bar{\varepsilon}_{\lambda}$ и $\bar{\varepsilon}_{\lambda}^2$ совпадают с теоретическими ε_{λ} и ε_{λ}^2 с погрешностью не более 15 %.

В качестве второй группы брали близкие к метамерным спектрам стандартизованные МКО источники белого цвета E , B , C , $D65$, а также близкие к ним по цвету абсолютно черные тела, которые характеризуют стандартные белые цвета цветовой температурой T_c .

Координаты цветностей в относительных единицах вычислялись по соотношениям:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_6 &= \frac{\int_{0,38}^{0,76} I(\lambda) V(\lambda) \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\int_{0,38}^{0,76} I(\lambda) V(\lambda) d\lambda}; \\ \bar{\varepsilon}_6^2 &= \frac{\int_{0,38}^{0,76} I(\lambda) V(\lambda) \varepsilon^2(\lambda) d\lambda}{\int_{0,38}^{0,76} I(\lambda) V(\lambda) d\lambda}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $I(\lambda)$ – спектр источника белого цвета; $V(\lambda)$ – стандартизованная кривая видности.

Результаты вычислений приведены в таблице, из которой видно, что координаты цветности белых цветов близки друг другу. Их отличия от белого E не превышают 1,3 % для $\bar{\varepsilon}_6$ и 2,5 % для $\bar{\varepsilon}_6^2$.

Координаты цветности источников белого цвета и черных тел

Белый цвет	$\bar{\varepsilon}_6$	$\bar{\varepsilon}_4$	$\bar{\varepsilon}_6^2$	$\bar{\varepsilon}_4^2$
E ($T_{ц}= 5460 K$)	1,79525	1,787121	3,24153	3,211499
B ($T_{ц}= 4874 K$)	1,79070	1,781715	3,22463	3,191901
C ($T_{ц}= 6774 K$)	1,80446	1,795865	3,27509	3,243343
D ($T_{ц}= 6504 K$)	1,806299	1,794360	3,281186	3,237849

Таким образом, проведенные расчеты указывают на правдоподобность гипотезы о параметрическом принципе кодирования зрительной системой метамерных спектров числом эффективно поглощенных фотонов, их энергией и дисперсией энергии.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

цветность любого цвета можно характеризовать физическими координатами $\bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}^2$, т.е.

аналогично яркости цветность приобретает физический смысл, что открывает возможность построения метрического цветового пространства на уровне физики зрения;

координаты цветности $\bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}^2$ в предлагаемой колориметрической системе являются инвариантными по отношению к выбранным первичным цветам, при этом они не зависят от числа выбранных первичных цветов.

Литература

1. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир. 1978. 592 с.
2. Гуревич М.М. Цвет и его измерение. М.: Изд-во АН СССР. 1950. 268 с.
3. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. В 2-х ч. Ч.2. Физиологическая оптика и колориметрия. М.: Энергоатомиздат. 1989. 432 с.
4. Гарбуни М. Физика оптических явлений. М.: Энергия. 1967. 496 с.
5. Майзель С.О. Свет и зрение. М.-Л. Гос. Технико-теоретическое изд-во. 1932. 124 с.

Поступила 26 сентября 2012 г.

Quantum model of the lowest metric of colour

© Authors, 2013

A.I. Mazurov, K.A. Raevskaya

Physical parameters used by human visual system to collect spectra into indiscernible (metameric) groups being perceived psychologically as one color is an important unsolved colorimetric task. Solving problems of color physical parameters authors based on light quantum theory and H. Grassmann's laws one of which establishes color three-dimensionality while the other tells that by mixing colors their quantities are summed up. Along with conventional RGB, XYZ colorimetric systems for colorimetric calculations there can be used ФЕД (E) system.