

УДК 535.6.08 (004.932)

ЭФФЕКТИВНЫЕ МОДЕЛИ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДАХ
Савкова Е.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Для реализации метода измерения цвета объекта по его цифровому изображению применяются линейная интерполяция и масштабирование градуировочных характеристик в цветовом пространстве. В этой связи актуальной задачей является систематизация функциональных моделей цветопередачи в программно-аппаратных средах для выявления и компенсации систематических эффектов. В работе описаны четыре группы функциональных моделей цветопередачи и даны рекомендации по их применению для повышения точности и достоверности результатов колориметрических измерений.

Ключевые слова: цифровое изображение, колориметрия, цветопередача, модель.

EFFECTIVE MODELS OF COLOR REPRODUCTION IN SOFTWARE AND HARDWARE ENVIRONMENTS
Saukova Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Linear interpolation and scaling of calibration characteristics in colour space are used To implement the method of measuring the colour of an object from its digital image. In this regard, an urgent task is to systematize functional color reproduction models in software and hardware environments to identify and compensate for systematic effects. The paper describes four groups of functional color models and makes recommendations for their use to improve the accuracy and reliability of the results of colorimetric measurements.

Key words: digital image, colorimetry, colour rendition, model.

*Адрес для переписки: Савкова Е.Н., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by*

Цвет цифрового изображения кодируется в шестнадцатирядным числом с плавающей точкой, включающим заголовок профиля, таблицу тэгов и помеченные данные элементов. Процесс цветопередачи в дискретных технических системах описывается моделями:

- 1) параметрическими функциями передающих устройств;
- 2) таблицами цветового поиска;
- 3) рабочими цветовыми пространствами;
- 4) функциями субъективных восприятий.

Простая система CIE (CIEXYZ или CIELAB) не учитывает влияние окружающих стимулов на измеряемый образец или освещение. Пути, предлагаемые в [1]:

- 1) учитывать только предполагаемое состояние хроматической адаптации зрителя, описывать колориметрию фактических оригиналов и их репродукций;
- 2) ориентировать колориметрию изображения на стандартную эталонную среду при определенном условии просмотра.

Цель работы – определить эффективные модели цветопередачи и предложить подходы к их линеаризации.

Референтные параметрические функции передающих устройств ориентированы на зрительные восприятия пользователя, пиковую яркость эталонного монитора и эталонные условия просмотра [1], описываются сверткой стандартных функций типов А, В, М (ICC) или ITU [2]:

- конвертации световой сцены в видеосигнал (OETF);
- видеосигнала в линейную свет-сигнальную передаточную характеристику отображающего устройства (EOTF);

– относительного линейного света сцены в отображаемую сцену (OOTF) [2], приведенных в таблице 1 [3] для систем PQ и Log-Gamma (HLG). Если $E = \{R_s, G_s, B_s; Y_s \text{ или } I_s\}$ – сигнал, определяемый светом сцены и масштабируемый экспозицией камеры (находится в диапазоне $[0;1]$), E' – нелинейное представление E (цветовое значение $\{R', G', B'\}$ или $\{L', M', S'\}$ в пространстве PQ в диапазоне $[0;1]$), а F_D – яркость отображаемого линейного компонента $\{R_D, G_D, B_D\}$ или Y_D или I_D , в кд/м², то $E' = OETF[E] = EOTF^{-1}[OOTF[E]] = EOTF^{-1}[F_D]$. В таблице Y – нормализованное линейное значение цвета в диапазоне $[0;1]$; m_1, m_2, c_1, c_2, c_3 – константы.

Таблица 1. Стандартные передаточные функции

PQ	Log-Gamma (HLG)
EOTF	
$EOTF^{-1}[F_D] = \left(\frac{c_1 + c_2 Y^{m_2}}{1 + c_3 Y^{m_1}} \right)^{m_2}$ $Y = F_D / 10000$	$F_D = EOTF[\max(0, (1 - \beta)E' + \beta)] =$ $= OOTF[EOTF^{-1}[\max(0, (1 - \beta)E' + \beta)]]$ $\beta = \sqrt[3]{(L_B/L_W)^{1/\gamma}}$
OETF	

Окончание таблицы 1. Стандартные передаточные функции

$F_D = EOTF[E'] = 10000Y$ $Y = \left(\frac{\max[(E'^{1/m_2} - c_1), 0]}{c_2 - c_3 E'^{1/m_2}} \right)^{1/m_1}$	$E' = OETF[E] =$ $= \begin{cases} \sqrt{3E} & 0 \leq E \leq 1/2 \\ a \cdot \ln(12E - b) + c & 1/12 < E \leq 1 \end{cases}$
OOTF	
$F_D = OOTF[E] = G_{1886}[G_{706}[E]]$ $E' = 1,099(59,5208E)^{0,45} - 0,99; (1 > E > 0,0003024);$ $E' = 267,84E; 0,0003024 \geq E \geq 0$	$F_D = OOTF[E] = \alpha Y_S^{Y-1} E$ $R_D = \alpha Y_S^{Y-1} R_S; G_D = \alpha Y_S^{Y-1} G_S; B_D = \alpha Y_S^{Y-1} B_S$ $Y_S = 0,2627R_S + 0,6780G_S + 0,0593B_S$

Таблицы цветового поиска (CLUT) [3] – многомерные матрицы, массивы элементов $p \times q$, где p – количество входных каналов к матрице, а q – количество выходных каналов. Матрица используется для преобразования данных в другое цветовое пространство в соответствии с уравнением:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1p} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{q1} & e_{q2} & \dots & e_{qp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_q \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Значения CLUT представляют собой массивы 8-разрядных или 16-разрядных неподписанных значений, нормализованные в диапазоне от 0 до 255 или от 0 до 65 535. CLUT организован как i -мерный массив с переменным количеством точек сетки в каждом измерении, где i – количество входных каналов в преобразовании.

Рабочие цветовые пространства, используемые для построения цветовых профилей:

1) определенные ICC, основанные на ISO 13655 и осветителе пространства соединения профиля PCS – PCSXYZ и PCSLAB (значения, рассчитанные по PCSXYZ $X = 0,964 2$; PCSXYZ $Y = 1,0$, PCSXYZ $Z = 0,824 9$ для белого носителя HLG);

2) применяемые в «устаревших устройствах» – YCbCr (ITU-R BT.709-6); PQ ICtSp;

3) применяемые в устройствах с широким динамическим диапазоном HLG – ICtSp (ITU-R BT.2100-2); Y'Cr'Cb' (ITU-R BT.2020-2);

4) квантованное пространство nCIEXYZ с равномерным масштабированием $Y = 1,0$ для принятого белого [3].

В качестве рабочего пространства рекомендовано ICtSp, оттенки которого остаются постоянными при изменении насыщенности или интенсивности.

Модели цветовосприятия цифровых изображений. Стандартная функция отображения оттенков серого определяется математической интерполяцией уровней яркости 1023, полученных из модели Бартена. Средняя яркость следующего более высокого уровня вычисляется путем сложения пиковой модуляции со средней яркостью L_j предыдущего уровня [4]:

$$L_{j+1} = L_j \frac{1+S_j}{1-S_j}, \quad (2)$$

где S_j – пороговая модуляция глаза.

Модель Бартена учитывает нейронный шум (верхний предел контрастной чувствительности на высоких пространственных частотах), боковое торможение, фотонный шум, внешний шум, ограниченную интеграционную способность, оптическую функцию переноса модулей, ориентацию и временную фильтрацию. Комбинация этих эффектов дает уравнение контраста как функцию:

$$S(L) = \frac{q_1 \cdot M_{opt}(L)}{\sqrt{\frac{q_2}{d^2(L)+q_3}}}, \quad (3)$$

u – пространственная частота, d – диаметр зрачка; q_1, q_2, q_3 – константы.

При низких уровнях света контрастная чувствительность пропорциональна квадратному корню светимости согласно закону де Вриса-Роуза. Функция передачи оптической модуляции

$$M_{opt}(u) = e^{-\pi^2 \sigma^2 u^2}, \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + (C_{sph} \cdot d^3)^2}. \quad (5)$$

Стандартная функция отображения в градациях серого получается путем вычисления пороговой модуляции S_j как функции средней светимости решетки, а затем наложения этих значений друг на друга.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Национальной академии наук Беларуси и Министерства Образования Республики Беларусь (код проекта ГБ 21-07/6).

Литература

1. High dynamic range television for production and international programme exchange: REPORT ITU-R BT.2390.
2. Methods for conversion of high dynamic range content to standard dynamic range content and vice-versa: BT.2446-0
3. Image technology colour management – Architecture, profile format, and data structure: Specification ICC.1:2022. – 2022
4. Grayscale Standard Display Function: DICOM PS3.14 2022a. – 2022.