

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ

И. О. Жаринов^{а, б}, доктор техн. наук, заведующий кафедрой, руководитель учебно-научного центра
О. О. Жаринов^в, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, РФ

^бФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П. А. Ефимова», Санкт-Петербург, РФ

^вСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: для описания и исследования колориметрических свойств жидкокристаллических панелей вводится математическая модель цветопередачи, которая задается параметрически. Параметры модели зависят от технологии изготовления жидкокристаллических панелей и являются уникальными для каждого изготовителя. Цель исследования заключается в разработке способа вычисления оценок параметров модели цветопередачи жидкокристаллических панелей. **Методы:** вычисления оценок параметров модели цветопередачи проводились на основе теоретического анализа и обработки результатов светотехнических измерений. Теоретическому анализу подлежали координаты цветности вершин треугольника цветового охвата и координаты точки белого цвета панели, предлагаемые изготовителем в технической документации. Координаты цвета или координаты цветности произвольных цветов, отображаемых на экране панели в тестовом режиме, получены в результате светотехнических измерений. **Результаты:** предложены математические выражения для вычисления оценок параметров модели цветопередачи жидкокристаллической панели тремя способами, основанными на решении системы уравнений, связывающих параметры: модели и координаты цветности точек белого, синего, красного и зеленого цветов; модели и координаты цвета трех произвольных цветов, измеренные колориметром; модели и координаты цветности четырех произвольных цветов, измеренные колориметром. **Практическая значимость:** результаты исследования, полученные при выполнении опытно-конструкторской работы, используются разработчиками средств отображения информации и изготовителями жидкокристаллических панелей для выполнения колориметрических расчетов и для оценки технологического разброса координат цветности индицируемой информации по множеству серийно выпускаемых образцов дисплеев.

Ключевые слова — жидкокристаллическая панель, модель цветопередачи, оценка параметров.

Введение

В процессе создания и исследования оптоэлектронных приборов различного назначения, в состав которых входит жидкокристаллическая (ЖК) панель [1–4], разработчики сталкиваются с задачей формирования математического описания цветопередачи ЖК-панели. Модель цветопередачи [5, 6] связывает координаты цвета X, Y, Z и координаты цветности (x, y) элементов изображения, индицируемых на экране, с кодом управления жидкими кристаллами, задаваемым программно в системе кодирования RGB (R — Red, G — Green, B — Blue).

Известно, что модель цветопередачи ЖК-панели может быть задана параметрически, однако числовые значения параметров модели, как правило, неизвестны. Параметры модели существенно зависят от технологии, используемой при изготовлении ЖК-панелей, и отличаются для ЖК-панелей различных изготовителей. При этом сами изготовители в технической документации, доступной разработчикам оптоэлектронных приборов, не приводят значения параметров модели цветопередачи.

Существует два подхода к оценке значений параметров модели цветопередачи ЖК-панели: на основе теоретического анализа и на основе обра-

ботки результатов светотехнических измерений. При этом выражения для вычисления оценок параметров модели будут различными.

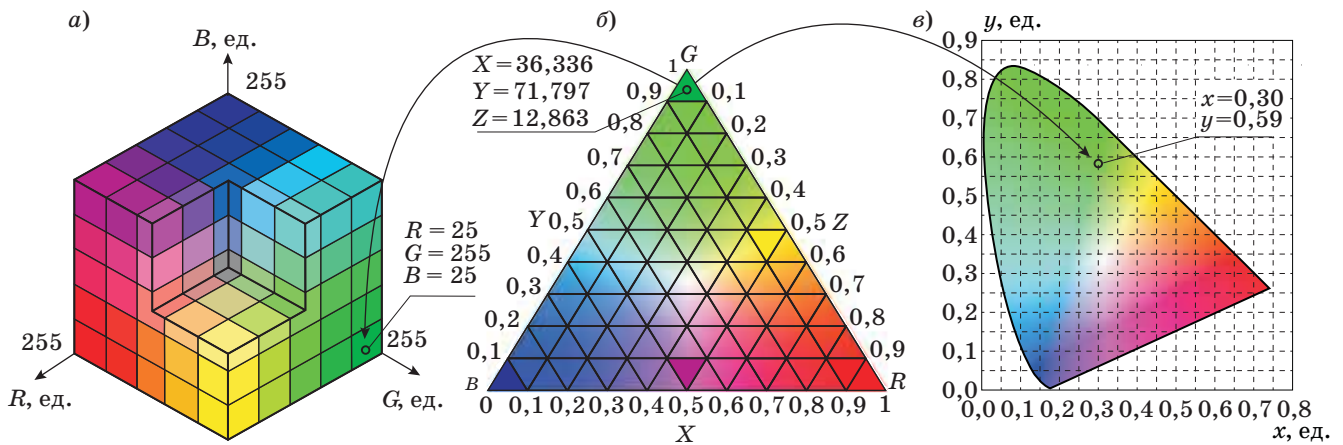
Системы кодирования цвета. Преобразование Грассмана

Система RGB (рис. 1, *а*) предполагает способ задания каждого цвета или оттенка цвета в виде двоичного позиционного кода, в котором присутствуют группы разрядов, соответствующие компонентам основных цветов (красного, зеленого, синего). Значения кодов основных цветов могут находиться в произвольных пропорциях. На практике коды RGB принято представлять в десятичной системе счисления.

Система XY предполагает способ задания каждого цвета или оттенка цвета в виде пары вещественных (x, y) -координат цветности на XY -плоскости.

Переход из одной системы кодирования цвета в другую осуществляется через цветовой треугольник Максвелла (рис. 1, *б*) по правилам прямого и обратного преобразования Грассмана [5, 6]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (1)$$



■ Рис. 1. Графическое представление систем кодирования цвета: а — система RGB; б — цветовой треугольник Максвелла; в — XY-плоскость

где X, Y, Z — координаты цвета в системе XYZ; $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ — коэффициенты матрицы преобразования; R, G, B — компоненты кода цвета в системе RGB, управляющие жидкими кристаллами панели.

Коэффициенты X_r, Y_r, Z_r определяют правило преобразования кода RGB для красного цвета, коэффициенты X_g, Y_g, Z_g и X_b, Y_b, Z_b — для зеленого и синего цвета соответственно. В совокупности коэффициенты $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ составляют профиль ЖК-панели и являются искомыми параметрами модели цветопередачи ЖК-панели.

Переход от значений координат цвета X, Y, Z к (x, y) -координатам цветности на XY-плоскости (рис. 1, в) осуществляется по формулам [3, 4]

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}. \quad (2)$$

Преобразования (1), (2) определяют модель цветопередачи ЖК-панели.

Внешний контур области рис. 1, в (замкнутая линия спектральных цветностей) — это геометрическое место точек для всех составляющих спектра света, сосредоточенных в видимой зоне длин волн.

Совокупность координат цветности XY-плоскости для всех цветов, воспроизводимых на ЖК-панели, аппроксимируется треугольником цветового охвата, вписанным в видимую зону. Координаты вершин $(x_R, y_R), (x_G, y_G), (x_B, y_B)$ треугольника цветового охвата определяются из соотношений [7]

$$R: \left\{ x_R = \frac{X_r}{X_r + Y_r + Z_r}, y_R = \frac{Y_r}{X_r + Y_r + Z_r} \right\};$$

$$G: \left\{ x_G = \frac{X_g}{X_g + Y_g + Z_g}, y_G = \frac{Y_g}{X_g + Y_g + Z_g} \right\};$$

$$B: \left\{ x_B = \frac{X_b}{X_b + Y_b + Z_b}, y_B = \frac{Y_b}{X_b + Y_b + Z_b} \right\}.$$

Отличия в значениях коэффициентов $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ для ЖК-экранов различных изготовителей приводят к изменению положения треугольника цветового охвата на XY-плоскости, в результате которого один и тот же цвет, программно заданный кодом RGB, имеет на экранах разных изготовителей разные координаты цветности воспроизводимого изображения.

Оценка параметров модели цветопередачи ЖК-панели на основе координат цветности, заданных в документации

Преобразование Грассмана (1) и расчетные соотношения на его основе предполагают, что коэффициенты $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ профиля ЖК-панели считаются априори известными. Однако на практике иностранные разработчики ЖК-экранов приводят в документации только координаты вершин треугольника цветового охвата $(x_R, y_R), (x_G, y_G), (x_B, y_B)$ и координаты (x_W, y_W) точки белого цвета. Значения коэффициентов профиля ЖК-панели не приводятся. Для описания свойств цветопередачи ЖК-панели необходимо получить оценку значений коэффициентов $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$.

Вычисление оценок коэффициентов предполагает, что (x_R, y_R) -координаты треугольника получены на основе (1), (2) по коду RGB = (255, 0, 0); (x_G, y_G) -координаты — по коду RGB = (0, 255, 0); (x_B, y_B) -координаты — по коду RGB = (0, 0, 255); (x_W, y_W) -координаты — по коду RGB = (255, 255, 255).

Тогда выражения (1), (2) могут быть представлены в виде системы уравнений

$$\begin{cases} x_R(\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) = \hat{X}_r = \frac{x_R}{y_R} \hat{Y}_r \\ y_R(\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) = \hat{Y}_r = \frac{y_R}{x_R} \hat{X}_r \\ x_G(\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) = \hat{X}_g = \frac{x_G}{y_G} \hat{Y}_g \\ y_G(\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) = \hat{Y}_g = \frac{y_G}{x_G} \hat{X}_g \\ x_B(\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) = \hat{X}_b = \frac{x_B}{y_B} \hat{Y}_b \\ y_B(\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) = \hat{Y}_b = \frac{y_B}{x_B} \hat{X}_b \\ x_W(\hat{X}_r + \hat{X}_g + \hat{X}_b + \hat{Y}_r + \hat{Y}_g + \hat{Y}_b + \hat{Z}_r + \hat{Z}_g + \hat{Z}_b) = \hat{X}_r + \hat{X}_g + \hat{X}_b \\ y_W(\hat{X}_r + \hat{X}_g + \hat{X}_b + \hat{Y}_r + \hat{Y}_g + \hat{Y}_b + \hat{Z}_r + \hat{Z}_g + \hat{Z}_b) = \hat{Y}_r + \hat{Y}_g + \hat{Y}_b \end{cases} \quad (3)$$

Система (3) состоит из восьми уравнений и имеет девять неизвестных: $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$ — искомые оценки коэффициентов профиля ЖК-панели.

Для решения системы уравнений (3) необходимо ввести девятое уравнение, связывающее коэффициенты профиля между собой. Недостающее уравнение имеет вид

$$\hat{Y}_r + \hat{Y}_g + \hat{Y}_b = 1.$$

Связь Y-коэффициентов второй строки матрицы преобразования (1) обусловлена принятым в колориметрии балансом белого цвета [8], в котором Y-составляющая в белом цвете при коде $RGB = (255, 255, 255)$ обладает максимальным значением, принимаемым за 100%. Тогда система уравнений (3) примет вид

$$\begin{cases} \hat{X}_r = \frac{x_R}{y_R} \hat{Y}_r \\ \hat{Y}_r = \frac{y_R}{x_R} \hat{X}_r \\ \hat{X}_g = \frac{x_G}{y_G} \hat{Y}_g \\ \hat{Y}_g = \frac{y_G}{x_G} \hat{X}_g \\ \hat{X}_b = \frac{x_B}{y_B} \hat{Y}_b \\ \hat{Y}_b = \frac{y_B}{x_B} \hat{X}_b \\ \hat{X}_r + \hat{X}_g + \hat{X}_b = \frac{x_W}{y_W} \\ \hat{Y}_r + \hat{Y}_g + \hat{Y}_b = 1 \\ \hat{Z}_r + \hat{Z}_g + \hat{Z}_b = \frac{1 - x_W - y_W}{y_W} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \hat{X}_r = \frac{x_R}{y_R} \hat{Y}_r \\ \hat{Y}_r = \frac{y_R}{x_R} \hat{X}_r \\ \hat{X}_g = \frac{x_G}{y_G} \hat{Y}_g \\ \hat{Y}_g = \frac{y_G}{x_G} \hat{X}_g \\ \hat{X}_b = \frac{x_B}{y_B} \hat{Y}_b \\ \hat{Y}_b = \frac{y_B}{x_B} \hat{X}_b \\ \hat{Z}_r = \hat{Y}_r \left(\frac{1 - x_R - y_R}{y_R} \right) \\ \hat{Z}_g = \hat{Y}_g \left(\frac{1 - x_G - y_G}{y_G} \right) \\ \hat{Z}_b = \hat{Y}_b \left(\frac{1 - x_B - y_B}{y_B} \right) \end{cases} \quad (4)$$

при условии

$$\begin{cases} \frac{x_R}{y_R} \hat{Y}_r + \frac{x_G}{y_G} \hat{Y}_g + \frac{x_B}{y_B} \hat{Y}_b = \frac{x_W}{y_W} \\ \hat{Y}_r + \hat{Y}_g + \hat{Y}_b = 1 \\ \hat{Y}_r \left(\frac{1 - x_R - y_R}{y_R} \right) + \hat{Y}_g \left(\frac{1 - x_G - y_G}{y_G} \right) + \hat{Y}_b \left(\frac{1 - x_B - y_B}{y_B} \right) = \frac{1 - x_W - y_W}{y_W} \end{cases} \quad (5)$$

Совместное решение уравнений систем (4), (5) для вычисления оценок $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$ имеет вид

$$\hat{X}_r = \frac{x_R}{y_R} \left(1 - \frac{\frac{x_W - x_R}{y_W - y_R} - \left(\frac{x_R - x_B}{y_R - y_B} + 1 \right) \frac{1 - x_W + x_R - 1 + x_W y_R - y_W x_R \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{\frac{x_R y_B - y_R x_B \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}{\frac{x_g - x_R}{y_g - y_R}} \right); \quad (6)$$

$$\hat{X}_g = \frac{x_G}{y_G} \left(\frac{\frac{x_W - x_R}{y_W - y_R} + \left(\frac{x_R - x_B}{y_R - y_B} \right) \frac{1 - x_W + x_R - 1 + x_W y_R - y_W x_R \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{\frac{x_R y_B - y_R x_B \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}{\frac{x_g - x_R}{y_g - y_R}} \right); \quad (7)$$

$$\hat{X}_b = \frac{x_B}{y_B} \frac{\frac{1 - x_W + x_R - 1 + x_W y_R - y_W x_R \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{y_W - y_R} \cdot \frac{x_G y_R - y_G x_R \cdot y_W \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{\frac{x_R y_B - y_R x_B \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}{\frac{x_G y_R - y_G x_R \cdot y_B \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}; \quad (8)$$

$$\hat{Y}_r = 1 - \frac{\frac{x_W - x_R}{y_W - y_R} - \left(\frac{x_R - x_B}{y_R - y_B} + 1 \right) \frac{1 - x_W + x_R - 1 + x_W y_R - y_W x_R \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{\frac{x_R y_B - y_R x_B \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}{\frac{x_g - x_R}{y_g - y_R}}; \quad (9)$$

$$\hat{Y}_g = \frac{\frac{x_W - x_R}{y_W - y_R} + \left(\frac{x_R - x_B}{y_R - y_B} \right) \frac{1 - x_W + x_R - 1 + x_W y_R - y_W x_R \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{\frac{x_R y_B - y_R x_B \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}{\frac{x_g - x_R}{y_g - y_R}}; \quad (10)$$

$$\hat{Y}_b = \frac{\frac{1 - x_W + x_R - 1 + x_W y_R - y_W x_R \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{y_W - y_R} \cdot \frac{x_G y_R - y_G x_R \cdot y_W \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{\frac{x_R y_B - y_R x_B \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}{\frac{x_G y_R - y_G x_R \cdot y_B \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}; \quad (11)$$

$$\hat{Z}_r = \left(\frac{1 - x_R - y_R}{y_R} \right) \times \left(1 - \frac{\frac{x_W - x_R}{y_W - y_R} - \left(\frac{x_R - x_B}{y_R - y_B} + 1 \right) \frac{1 - x_W + x_R - 1 + x_W y_R - y_W x_R \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{\frac{x_R y_B - y_R x_B \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}{\frac{x_g - x_R}{y_g - y_R}} \right); \quad (12)$$

$$\hat{Z}_g = \left(\frac{1 - x_G - y_G}{y_G} \right) \times \left(\frac{\frac{x_W - x_R}{y_W - y_R} + \left(\frac{x_R - x_B}{y_R - y_B} \right) \frac{1 - x_W + x_R - 1 + x_W y_R - y_W x_R \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{\frac{x_R y_B - y_R x_B \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}{\frac{x_g - x_R}{y_g - y_R}} \right); \quad (13)$$

$$\hat{Z}_b = \left(\frac{1 - x_B - y_B}{y_B} \right) \times \frac{\frac{1 - x_W + x_R - 1 + x_W y_R - y_W x_R \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{y_W - y_R} \cdot \frac{x_G y_R - y_G x_R \cdot y_W \cdot \left(\frac{1 - x_R + x_G - 1}{y_R - y_G} \right)}{\frac{x_R y_B - y_R x_B \cdot y_G \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}{\frac{x_G y_R - y_G x_R \cdot y_B \cdot \left(\frac{1 - x_G + x_R - 1}{y_G + y_R} \right) + \frac{1 - x_B + x_R - 1}{y_B + y_R}}}. \quad (14)$$

Выражения (6)–(14) позволяют вычислять оценки коэффициентов $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$ модели цветопередачи ЖК-экранов непосредственно по значениям координат $(x_R, y_R), (x_G, y_G), (x_B, y_B), (x_W, y_W)$, приведенным разработчиком экранов в технической документации.

Оценка параметров модели цветопередачи ЖК-панели на основе измерений координат цветности

Уравнения вычисления оценок коэффициентов $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$ профиля ЖК-панели для четырех произвольно задаваемых цветов $(R_1, G_1, B_1), (R_2, G_2, B_2), (R_3, G_3, B_3), (R_4, G_4, B_4)$, последовательно индицируемых на экране ЖК-панели в тестовом режиме, и соответствующих этим цветам результатов измерений координат цветности $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$, имеют вид

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_r \\ \hat{X}_g \\ \hat{X}_b \\ \hat{Y}_g \\ \hat{Y}_b \\ \hat{Z}_r \\ \hat{Z}_g \\ \hat{Z}_b \\ \hat{Y}_r = 1 - \hat{Y}_g - \hat{Y}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} & d_{17} & d_{18} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} & d_{27} & d_{28} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} & d_{37} & d_{38} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} & d_{45} & d_{46} & d_{47} & d_{48} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & d_{55} & d_{56} & d_{57} & d_{58} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} & d_{64} & d_{65} & d_{66} & d_{67} & d_{68} \\ d_{71} & d_{72} & d_{73} & d_{74} & d_{75} & d_{76} & d_{77} & d_{78} \\ d_{81} & d_{82} & d_{83} & d_{84} & d_{85} & d_{86} & d_{87} & d_{88} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 R_1 \\ R_1(1 - y_1) \\ x_2 R_2 \\ R_2(1 - y_2) \\ x_3 R_3 \\ R_3(1 - y_3) \\ x_4 R_4 \\ R_4(1 - y_4) \end{bmatrix}, \tag{15}$$

где

$$\begin{aligned} d_{11} &= R_1(1 - x_1), \quad d_{12} = G_1(1 - x_1), \quad d_{13} = B_1(1 - x_1), \quad d_{14} = x_1(R_1 - G_1), \quad d_{15} = x_1(R_1 - B_1), \quad d_{16} = -x_1 R_1, \\ d_{17} &= -x_1 G_1, \quad d_{18} = -x_1 B_1, \quad d_{21} = R_1 y_1, \quad d_{22} = G_1 y_1, \quad d_{23} = B_1 y_1, \quad d_{24} = (R_1 - G_1)(1 - y_1), \\ d_{25} &= (R_1 - B_1)(1 - y_1), \quad d_{26} = R_1 y_1, \quad d_{27} = G_1 y_1, \quad d_{28} = B_1 y_1, \quad d_{31} = R_2(1 - x_2), \quad d_{32} = G_2(1 - x_2), \\ d_{33} &= B_2(1 - x_2), \quad d_{34} = x_2(R_2 - G_2), \quad d_{35} = x_2(R_2 - B_2), \quad d_{36} = -x_2 R_2, \quad d_{37} = -x_2 G_2, \quad d_{38} = -x_2 B_2, \\ d_{41} &= R_2 y_2, \quad d_{42} = G_2 y_2, \quad d_{43} = B_2 y_2, \quad d_{44} = (R_2 - G_2)(1 - y_2), \quad d_{45} = (R_2 - B_2)(1 - y_2), \quad d_{46} = R_2 y_2, \\ d_{47} &= G_2 y_2, \quad d_{48} = B_2 y_2, \quad d_{51} = R_3(1 - x_3), \quad d_{52} = G_3(1 - x_3), \quad d_{53} = B_3(1 - x_3), \quad d_{54} = x_3(R_3 - G_3), \\ d_{55} &= x_3(R_3 - B_3), \quad d_{56} = -x_3 R_3, \quad d_{57} = -x_3 G_3, \quad d_{58} = -x_3 B_3, \quad d_{61} = R_3 y_3, \quad d_{62} = G_3 y_3, \quad d_{63} = B_3 y_3, \\ d_{64} &= (R_3 - G_3)(1 - y_3), \quad d_{65} = (R_3 - B_3)(1 - y_3), \quad d_{66} = R_3 y_3, \quad d_{67} = G_3 y_3, \quad d_{68} = B_3 y_3, \quad d_{71} = R_4(1 - x_4), \\ d_{72} &= G_4(1 - x_4), \quad d_{73} = B_4(1 - x_4), \quad d_{74} = x_4(R_4 - G_4), \quad d_{75} = x_4(R_4 - B_4), \quad d_{76} = -x_4 R_4, \quad d_{77} = -x_4 G_4, \\ d_{78} &= -x_4 B_4, \quad d_{81} = R_4 y_4, \quad d_{82} = G_4 y_4, \quad d_{83} = B_4 y_4, \quad d_{84} = (R_4 - G_4)(1 - y_4), \\ d_{85} &= (R_4 - B_4)(1 - y_4), \quad d_{86} = R_4 y_4, \quad d_{87} = G_4 y_4, \quad d_{88} = B_4 y_4. \end{aligned}$$

Система (15) получена путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \hat{X}_r R_1 + \hat{X}_g G_1 + \hat{X}_b B_1 = x_1 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_1 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_1 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_1 \right) \\ \hat{Y}_r R_1 + \hat{Y}_g G_1 + \hat{Y}_b B_1 = y_1 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_1 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_1 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_1 \right) \\ \hat{X}_r R_2 + \hat{X}_g G_2 + \hat{X}_b B_2 = x_2 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_2 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_2 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_2 \right) \\ \hat{Y}_r R_2 + \hat{Y}_g G_2 + \hat{Y}_b B_2 = y_2 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_2 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_2 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_2 \right) \\ \hat{X}_r R_3 + \hat{X}_g G_3 + \hat{X}_b B_3 = x_3 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_3 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_3 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_3 \right), \\ \hat{Y}_r R_3 + \hat{Y}_g G_3 + \hat{Y}_b B_3 = y_3 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_3 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_3 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_3 \right) \\ \hat{X}_r R_4 + \hat{X}_g G_4 + \hat{X}_b B_4 = x_4 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_4 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_4 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_4 \right) \\ \hat{Y}_r R_4 + \hat{Y}_g G_4 + \hat{Y}_b B_4 = y_4 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_4 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_4 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_4 \right) \\ \hat{Y}_r = 1 - \hat{Y}_g - \hat{Y}_b \end{cases}$$

основанных на преобразованиях (1), (2).

Оценка параметров модели цветопередачи ЖК-панели на основе измерений координат цвета

Для колориметров, осуществляющих измерение координат цвета X, Y, Z , формулы вычисления оценок коэффициентов профиля ЖК-панели имеют вид

$$\begin{pmatrix} \hat{X}_r \\ \hat{X}_g \\ \hat{X}_b \\ \hat{Y}_r \\ \hat{Y}_g \\ \hat{Y}_b \\ \hat{Z}_r \\ \hat{Z}_g \\ \hat{Z}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 & G_1 & B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_1 & G_1 & B_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & G_2 & B_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 & G_2 & B_2 \\ R_3 & G_3 & B_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 & G_3 & B_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & G_3 & B_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix}, \tag{16}$$

где $(R_1, G_1, B_1), (R_2, G_2, B_2), (R_3, G_3, B_3)$ — коды трех произвольно заданных цветов, индицируемых на экране ЖК-панели в тестовом режиме; $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), (X_3, Y_3, Z_3)$ — измеренные колориметром значения координат цвета, соответствующие $(R_1, G_1, B_1), (R_2, G_2, B_2), (R_3, G_3, B_3)$.

Матричное уравнение (16) формируется путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \hat{X}_r R_1 + \hat{X}_g G_1 + \hat{X}_b B_1 = X_1 \\ \hat{Y}_r R_1 + \hat{Y}_g G_1 + \hat{Y}_b B_1 = Y_1 \\ \hat{Z}_r R_1 + \hat{Z}_g G_1 + \hat{Z}_b B_1 = Z_1 \\ \hat{X}_r R_2 + \hat{X}_g G_2 + \hat{X}_b B_2 = X_2 \\ \hat{Y}_r R_2 + \hat{Y}_g G_2 + \hat{Y}_b B_2 = Y_2 \\ \hat{Z}_r R_2 + \hat{Z}_g G_2 + \hat{Z}_b B_2 = Z_2 \\ \hat{X}_r R_3 + \hat{X}_g G_3 + \hat{X}_b B_3 = X_3 \\ \hat{Y}_r R_3 + \hat{Y}_g G_3 + \hat{Y}_b B_3 = Y_3 \\ \hat{Z}_r R_3 + \hat{Z}_g G_3 + \hat{Z}_b B_3 = Z_3 \end{cases},$$

основанных на базовых преобразованиях (1), (2).

Заключение

Способ вычисления оценок $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$ на основе теоретических выражений (6)–(14) является предпочтительным, так как точность вычисления оценок (15) и (16), полученных в результате экспериментов, в значительной степени зависит от погрешностей из-

мерительного прибора (колориметра) [8]. При проведении измерений необходимо обеспечивать тепловой и электрический режим подключения экрана, приближенный к режиму эксплуатации экрана в составе средства отображения. Назначение средств отображения и особенности подключения и термостабилизации ЖК-панелей в составе изделий авиационного приборостроения подробно рассмотрены в работах [9–15].

При использовании колориметров с абсолютной погрешностью менее 0,002 ед. для измерения координат цветности и менее 0,1 ед. для измерения координат цвета оценки, формируемые на основе (15), (16), соответствуют существующему на практике технологическому разбросу колориметрических характеристик ЖК-панелей.

Погрешности измерений координат цвета (цветности) также оказывают влияние на вычислительную устойчивость (15) и (16), в связи с чем формируемая на основе оценок $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$ матрица прямого преобразования (1) может не иметь обратной матрицы. В этом случае необходимо выбрать другие значения управляющих кодов RGB тестовых цветов и повторить измерения. Многократное измерение координат цвета (цветности) для произвольно задаваемых цветов с последующим усреднением значений оценок коэффициентов позволит получить статистически достоверный результат формирования профиля жидкокристаллической панели.

Литература

1. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: учеб. пособие/ ГУАП. — СПб., 2005. — 144 с.

2. **Жаринов И. О., Емец Р. Б.** Индикационное оборудование в авиации XXI века // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2003. № 11. С. 193–195.
3. **Парамонов П. П., Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О.** Многофункциональные индикато-

- ры на плоских жидкокристаллических панелях: наукоёмкие аппаратно-программные решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 3. С. 238–245.
4. **Оценка** точности визуализации местоположения объекта в геоинформационных системах и системах индикации навигационных комплексов пилотируемых летательных аппаратов/ М. О. Костишин, И. О. Жаринов, О. О. Жаринов и др.// Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1. С. 87–93.
 5. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Исследование распределения оценки разрешающей способности преобразования Грассмана в системах кодирования цвета, применяемых в авионике // Программная инженерия. 2014. № 8. С. 40–47.
 6. **Костишин М. О., Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Исследование визуальных характеристик средств отображения пилотажно-навигационных параметров и геоинформационных данных в авионике // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4. С. 61–67.
 7. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Исследование свойства равноконтрастности цветовых пространств, применяемых в авионике // Программная инженерия. 2014. № 11. С. 35–43.
 8. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Оценка инструментальной погрешности косвенного измерения координат цвета в цветовой модели данных, применяемой в авионике // Программная инженерия. 2014. № 12. С. 39–46.
 9. **Гачин Ю. А., Жаринов И. О.** Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики. — М.: Машиностроение, 2010. — 224 с.
 10. **Парамонов П. П., Жаринов И. О.** Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 1–17.
 11. **Реализация** структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации / П. П. Парамонов, П. В. Коновалов, И. О. Жаринов и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 165–167.
 12. **Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О., Тарасов П. Ю.** Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 5. С. 50–57.
 13. **Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О.** Теория и практика статистического анализа картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов // Датчики и системы. 2001. № 8. С. 15–19.
 14. **Принцип** формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации/ П. П. Парамонов, М. О. Костишин, И. О. Жаринов и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 136–142.
 15. **Принципы** построения автоматических систем в канале управления тепловыми и светотехническими характеристиками бортовых средств индикации/ И. О. Жаринов, О. О. Жаринов, П. П. Парамонов и др.// Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 12. С. 34–38.

UDC 629.73.02; 629.73.05/.06; 535.643
doi:10.15217/issn1684-8853.2015.2.49

Evaluation of Parameters of the Mathematical Model of Color Response Performances of LCD-panel

Zharinov I. O.^{a, b}, Dr. Sc., Tech., Head of Department, Head of Learning-Scientist Center, igor_rabota@pisem.net
Zharinov O. O.^c, PhD, Tech., Associate Professor, zharinov@hotmail.ru

^aSaint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bP. A. Efimov Saint-Petersburg Scientific Design Bureau «Electroavtomatika», 40, Marshala Govorova St., 198095, Saint-Petersburg, Russian Federation

^cSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: To describe and study the colorimetric features of LCD panels, we introduce a mathematical model of color rendition specified parametrically. The parameters of the model depend upon the technological features of LCD-panel manufacturers, being unique for every maker. The purpose of our research is developing a technique to evaluate the parameters of this model. **Methods:** The estimates of the model parameters were calculated on the basis of theoretical analysis and processing of the optical measurement results. The theoretical analysis was applied to the chromaticity coordinates of the color coverage triangle vertices and to the coordinates of the white color point suggested by the manufacturer in the technical documentation. The color coordinates or chromaticity coordinates for any given set of colors displayed on the LCD screen in the test mode were obtained during experimental illuminance measurements. **Results:** Mathematical expressions were suggested to evaluate the parameters of the color rendition model, obtained in three different ways based on the solution of a system of equations connecting the parameters: models and chromaticity coordinates for white, blue, red and green points; model and color coordinates for three random colors measured by a colorimeter; models and chromaticity coordinates

for four random colors measured by a colorimeter. **Practical relevance:** The results obtained during the research and development work are used by the designers of modern indication equipment and manufacturers of LCD-panels for colorimetric calculations and for the estimation of technological tolerance of chromaticity coordinates among the display units in mass production.

Keywords— LCD-panel, Color Rendition Model, Parameters Evaluation.

Reference

- Zharinov I. O., Zharinov O. O. *Bortovye sredstva otobrazheniia informatsii na ploskikh zhidkokristallicheskiikh paneliakh* [Onboard Display on Flat Liquid Crystal Panels]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2005. 144 p. (In Russian).
- Zharinov I. O., Emets R. B. Evidence Equipment, Aviation XXI Century. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2003, no. 11, pp. 193–195 (In Russian).
- Paramonov P. P., Koporskii N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O. Implementation of Data Structure in Indication Frame Formation for Onboard Geospatial Data Computer Systems. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2004, no. 3, pp. 238–245 (In Russian).
- Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Nechaev V. A., Suslov V. D. Accuracy Evaluation of the Object Location Visualization for Geo-information and Display Systems of Manned Aircraft Navigation Complexes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2014, no. 1, pp. 87–93 (In Russian).
- Zharinov I. O., Zharinov O. O. Research of Properties of an Assessment of the Resolution of Grassmann's Transformation in Chromaticity Coding Systems, Applied in Avionic Equipment. *Programmnaia inzheneriia*, 2014, no. 8, pp. 40–47 (In Russian).
- Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O. Visual Characteristics of Displaying Air Navigation Parameters and Geoinformation Data in Avionics. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 4, pp. 61–67 (In Russian).
- Zharinov I. O., Zharinov O. O. The Research of Uniform Chromaticity Property of Color Spaces, Used in Avionics Equipment. *Programmnaia inzheneriia*, 2014, no. 11, pp. 35–43 (In Russian).
- Zharinov I. O., Zharinov O. O. The Evaluation of Hardware-Caused Inaccuracy of Indirect Measurements of Chromaticity Coordinates in Color Model Data Used in Avionics. *Programmnaia inzheneriia*, 2014, no. 12, pp. 39–46 (In Russian).
- Gatchin Iu. A., Zharinov I. O. *Osnovy proektirovaniia vychislitel'nykh sistem integrirovannoi modul'noi avioniki* [Basics of Designing Computer Systems Integrated Modular Avionics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 224 p. (In Russian).
- Paramonov P. P., Zharinov I. O. Integrated On-board Computing Systems: Present Situation Review and Development Prospects Analysis in the Aviation Instrument-making Industry. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2, pp. 1–17 (In Russian).
- Paramonov P. P., Konovalov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Iu. A., Utkin S. B. Implementation of Data Structure in Indication Frame Formation for Onboard Geospatial Data Computer Systems. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2, pp. 165–167 (In Russian).
- Paramonov P. P., Il'chenko Iu. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Iu. Structural Analysis and Synthesis of Graphic Images on the Screens of Modern On-board Display on Flat Liquid Crystal Panels. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 50–57 (In Russian).
- Paramonov P. P., Il'chenko Iu. A., Zharinov I. O. Theory and Practice of Statistical Analysis of Cartographic Images in Navigation Systems Manned Aircraft. *Datchiki i sistemy*, 2001, no. 8, pp. 15–19 (In Russian).
- Paramonov P. P., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechaev V. A., Sudarchikov S. A. Formation and Display Principles for an Array of Geoinformation Data by Means of On-board Display Screen. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 6, pp. 136–142 (In Russian).
- Zharinov I. O., Zharinov O. O., Paramonov P. P., Kostishin M. O., Sudarchikov S. A. Principles of Automatic System Design for Control Over Thermal and Lighting Characteristics of Airborne Indication Means. *Izvestiia uzov. Priborostroenie*, 2014, vol. 57, no. 12, pp. 34–38 (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста: входите на страницу <http://www.researcherid.com>, слева под надписью «New to ResearcherID?» нажимаете на синюю кнопку «Join Now It's Free» и заполняете короткую анкету. По указанному электронному адресу получаете сообщение с предложением по ссылке заполнить полную регистрационную форму на ORCID. Получаете ID.