

УДК 629.73.02; 629.73.05/06; 535.643

ОЦЕНКА СМЕЩЕНИЯ КООРДИНАТ ЦВЕТНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ВЫВОДИМОГО НА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПАНЕЛИ С РАЗЛИЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ ПО ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЮ

И.О. Жаринов^a, О.О. Жаринов^b

^a АО «ОКБ «Электроавтоматика», Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация

^b Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Адрес для переписки: igor_rabota@pisem.net

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.10.15, принята к печати 22.01.16

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-237-243

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Жаринов И.О., Жаринов О.О. Оценка смещения координат цветности изображения, выводимого на жидкокристаллические панели с различными свойствами по цветовоспроизведению // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 237–243. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-237-243

Аннотация

Предмет исследования. Рассматривается задача вычисления оценки смещения координат цветности изображения, выводимого на жидкокристаллические панели с различными свойствами по цветовоспроизведению. Свойство цветовоспроизведения экрана описывается математической моделью. Разброс цветовых характеристик экранов имеет статистическую природу. Отличия по цветовоспроизведению экранов воспринимаются наблюдателем в форме различающихся цветов и оттенков, отображаемых на однотипных серийно выпускаемых экранах. Цветовые отличия характеризуются числовой мерой разности цветов и могут быть математически компенсированы. Особую актуальность решение задачи учета статистической природы разброса цветовых характеристик экранов имеет для авиационного приборостроения. **Метод.** Оценка смещения координат цветности изображения основана на применении законов смешения цветов Грассмана. Исходными данными для количественного расчета смещения являются профили двух отличающихся жидкокристаллических панелей, заданные матрицами весов для компонентов основных цветов (красный, зеленый, синий). Расчет основан на решении системы уравнений и вычислении цветовой разницы на XY-плоскости. В общем случае, расчет может быть произведен и в других цветовых пространствах: UV, Lab. Статистическая природа разброса цветовых характеристик экранов учтена в предложенной математической модели, основанной на интервальном задании значений координат цветности вершин треугольника цветного охвата на множестве серийно выпускаемых образцов. **Основные результаты.** Результатом исследования являются математические выражения, позволяющие пересчитывать значения координат цветности изображения, индицируемого на различных образцах жидкокристаллических экранов. Показано, что технологический разброс цветовых характеристик экранов подчиняется с достаточной для практики точностью двумерному нормальному закону распределения. Приведены результаты моделирования. Получены эллипсы сечения гистограмм распределения координат цветности для пяти произвольно заданных цветов, согласующиеся с теоретическими выражениями. **Практическая значимость.** Результаты работы могут использоваться 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

индикация, координаты цветности, жидкокристаллический экран, смещение

EVALUATION OF CHROMATICITY COORDINATES SHIFT FOR IMAGE DISPLAYED ON LIQUID CRYSTAL PANELS WITH VARIOUS PROPERTIES ON COLOR REPRODUCTION

I.O. Zharinov^a, O.O. Zharinov^b

^a SPb Scientific Design Bureau “Electroavtomatika” n.a. P. A. Efimov, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation

^b Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: Igor_rabota@pisem.net

Article info

Received 26.10.15, accepted 22.01.16

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-237-243

Article in Russian

For citation: Zharinov I.O., Zharinov O.O. Evaluation of chromaticity coordinates shift for image displayed on liquid crystal panels with various properties on color reproduction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 237–243. doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-237-243

Abstract

Subject of Research. We consider the problem of evaluation of chromaticity coordinates shift for image displayed on liquid crystal panels with various properties on color reproduction. A mathematical model represents the color reproduction characteristics. The spread of the color characteristics of the screens has a statistical nature. Differences of color reproduction for screens are perceived by the observer in the form of different colors and shades that are displayed on the same type of commercially available screens. Color differences are characterized by numerical measure of the difference of colors and can be mathematically compensated. The solution of accounting problem of the statistical nature of the color characteristics spread for the screens has a particular relevance to aviation instrumentation. **Method.** Evaluation of chromaticity coordinates shift of the image is based on the application of the Grassmann laws of color mixing. Basic data for quantitative calculation of shift are the profiles of two different liquid crystal panels defined by matrixes of scales for components of primary colors (red, green, blue). The calculation is based on solving the system of equations and calculating the color difference in the XY -plane. In general, the calculation can be performed in other color spaces: UV, Lab. The statistical nature of the spread of the color characteristics for the screens is accounted for in the proposed mathematical model based on the interval setting of coordinate values of the color gamut triangle vertices on the set of commercially available samples. **Main Results.** Carried out researches result in the mathematical expressions allowing to recalculate values of chromaticity coordinates of the image displayed on various samples of liquid crystal screens. It is shown that the spread of the color characteristics of the screens follows bivariate normal distribution law with the accuracy sufficient for practice. The results of simulation are given. We present the ellipses of section for histograms of distribution of chromaticity coordinates for five randomly defined colors that are consistent with the theoretical expressions. **Practical Relevance.** Research results are usable for engineers designing modern indication equipment based on LCD-panels and for manufacturers while colorimetric calculations and estimation of technological tolerance of chromaticity coordinates among display units in mass production as well.

Keywords

indication, chromaticity coordinates, liquid crystal screen, shift

Введение

При разработке функционального программного обеспечения бортовых средств индикации класса МФЦИ (многофункциональный цветной индикатор) специалисты решают задачу выбора цветовой палитры изображения, индицируемого на экране жидкокристаллической (ЖК) панели [1, 2]. Выбор цветовой палитры сопряжен с необходимостью выполнения требований нормативно-технической документации, действующей в авиационной промышленности, и с необходимостью представления наблюдателю изображения с наилучшими визуальными характеристиками восприятия [3–5]. Оценка качества бортового средства индикации выполняется в процессе светотехнических испытаний с использованием инструментальных средств измерения, в результате которых формируется искомая цветовая палитра – массив записей, заданных десятичным кодом RGB (R – Red, G – Green, B – Blue), для каждого задействованного цвета [6, 7].

Опыт практической разработки МФЦИ показывает, что сформированная однократно цветовая палитра, подтвержденная результатами и протоколом светотехнических испытаний одного образца МФЦИ, заимствуется в программное обеспечение последующих разработок изделий этого класса. Такой инженерный подход к разработке программ, аргументированный принципом использования максимально возможных унифицированных и стандартизованных успешных проектных решений, имеет ряд недостатков:

- не учитывается разброс координат цветности, обусловленный технологическим разбросом колориметрических характеристик цветовоспроизведения ЖК-панелей одного производителя;
- не учитывается смещение координат цветности, обусловленное разницей в коэффициентах профиля ЖК-панелей нескольких различных производителей, используемых в конструктивных модификациях МФЦИ, изготовленных по одной групповой документации.

В этой связи актуальной является задача оценки смещения (x, y) -координат цветности изображения, воспроизводимого на различных образцах ЖК-панелей как одного, так и различных производителей.

Принцип преобразования цветовых пространств, применяемых в авионике

Анализ результатов эксплуатации МФЦИ, выполненных на базе жидкокристаллической панели, показал, что один и тот же программный код RGB , определяющий цвет индицируемого на экране изображения, имеет различные XYZ -координаты цвета и (x, y) -координаты цветности на разных образцах МФЦИ (рис. 1).

Для каждой пары МФЦИ, в составе программного обеспечения которых используется единая цветовая палитра, в соответствии с правилами [2] преобразования цветовых пространств XY , XYZ и цветовой модели RGB (рис. 2) справедливы следующие преобразования:

$$\begin{bmatrix} X_{r_2} & X_{g_2} & X_{b_2} \\ Y_{r_2} & Y_{g_2} & Y_{b_2} \\ Z_{r_2} & Z_{g_2} & Z_{b_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r_1} & X_{g_1} & X_{b_1} \\ Y_{r_1} & Y_{g_1} & Y_{b_1} \\ Z_{r_1} & Z_{g_1} & Z_{b_1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_{r_2} & X_{g_2} & X_{b_2} \\ Y_{r_2} & Y_{g_2} & Y_{b_2} \\ Z_{r_2} & Z_{g_2} & Z_{b_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{r_1} & X_{g_1} & X_{b_1} \\ Y_{r_1} & Y_{g_1} & Y_{b_1} \\ Z_{r_1} & Z_{g_1} & Z_{b_1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_r & \tilde{X}_g & \tilde{X}_b \\ \tilde{Y}_r & \tilde{Y}_g & \tilde{Y}_b \\ \tilde{Z}_r & \tilde{Z}_g & \tilde{Z}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \frac{x_2 Y_{xy_2}}{y_2} \\ Y_{xy_2} \\ (1-x_2-y_2) \frac{Y_{xy_2}}{y_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_r & \tilde{X}_g & \tilde{X}_b \\ \tilde{Y}_r & \tilde{Y}_g & \tilde{Y}_b \\ \tilde{Z}_r & \tilde{Z}_g & \tilde{Z}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{x_1 Y_{xy_1}}{y_1} \\ Y_{xy_1} \\ (1-x_1-y_1) \frac{Y_{xy_1}}{y_1} \end{bmatrix} \Rightarrow \\
\Rightarrow \begin{cases} \frac{x_2 Y_{xy_2}}{y_2} = \tilde{X}_r \frac{x_1 Y_{xy_1}}{y_1} + \tilde{X}_g Y_{xy_1} + \tilde{X}_b (1-x_1-y_1) \frac{Y_{xy_1}}{y_1} \\ Y_{xy_2} = \tilde{Y}_r \frac{x_1 Y_{xy_1}}{y_1} + \tilde{Y}_g Y_{xy_1} + \tilde{Y}_b (1-x_1-y_1) \frac{Y_{xy_1}}{y_1} \\ (1-x_2-y_2) \frac{Y_{xy_2}}{y_2} = \tilde{Z}_r \frac{x_1 Y_{xy_1}}{y_1} + \tilde{Z}_g Y_{xy_1} + \tilde{Z}_b (1-x_1-y_1) \frac{Y_{xy_1}}{y_1} \end{cases}, \quad (1)
\end{aligned}$$

где X_1, Y_1, Z_1 – координаты цвета изображения на экране первого МФЦИ; X_2, Y_2, Z_2 – координаты цвета изображения на экране второго МФЦИ; x_1, y_1, Y_{xy_1} – координаты цветности и компонент относительной яркости изображения на экране первого МФЦИ; x_2, y_2, Y_{xy_2} – координаты цветности и компонент относительной яркости изображения на экране второго МФЦИ; $X_{r_i}, X_{g_i}, X_{b_i}, Y_{r_i}, Y_{g_i}, Y_{b_i}, Z_{r_i}, Z_{g_i}, Z_{b_i}$ – коэффициенты матриц профиля ЖК-панелей, установленных в МФЦИ; RGB – десятичный код цвета фрагмента изображения.

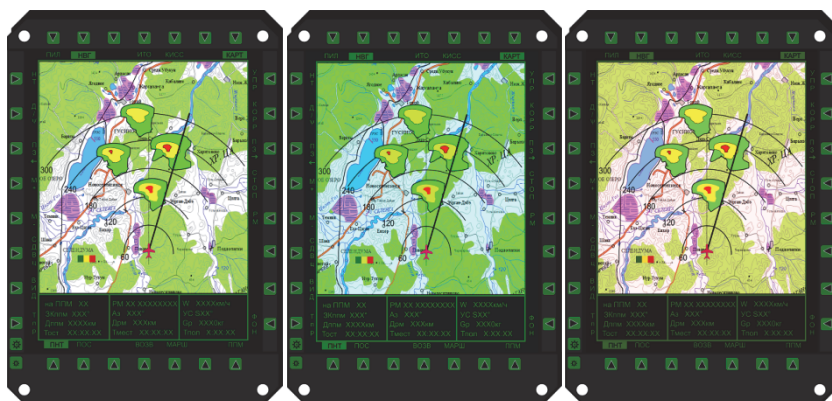
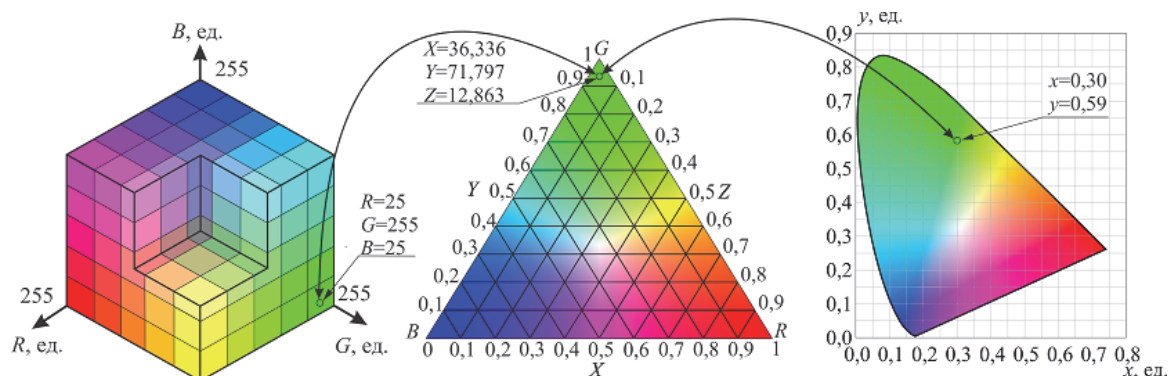


Рис. 1. Пример индикации одного и того же изображения

Рис. 2. Правило преобразования цветовых пространств XY , XYZ и цветовой модели RGB

Эксперименты с применением колориметра и анализ технической документации на ЖК-панели показывают [8–10], что цветовая разница (x, y) -координат для изображения, индицируемого на разных образцах МФЦИ с одним типом экрана и с одним и тем же программным кодом RGB , достигает 0,1 ед. цветности, что чувствительно для наблюдателя и для контрольно-измерительного оборудования.

Оценка смещения координат цветности

Система (1) связывает координаты цветности и компоненты относительной яркости изображения для единой цветовой палитры RGB . Отличия в значениях (x, y) -координат цветности, обусловленные разницей в коэффициентах профиля ЖК-панелей и вычисляемые в результате решения системы (1), имеют следующий вид:

$$x_2 = \frac{\tilde{X}_r \frac{x_1}{y_1} + \tilde{X}_g + \tilde{X}_b (1 - x_1 - y_1) \frac{1}{y_1}}{(\tilde{X}_r + \tilde{Y}_r + \tilde{Z}_r) \frac{x_1}{y_1} + (\tilde{X}_g + \tilde{Y}_g + \tilde{Z}_g) + (\tilde{X}_b + \tilde{Y}_b + \tilde{Z}_b) (1 - x_1 - y_1) \frac{1}{y_1}}, \quad (2)$$

$$y_2 = \frac{\tilde{Y}_r \frac{x_1}{y_1} + \tilde{Y}_g + \tilde{Y}_b (1 - x_1 - y_1) \frac{1}{y_1}}{(\tilde{X}_r + \tilde{Y}_r + \tilde{Z}_r) \frac{x_1}{y_1} + (\tilde{X}_g + \tilde{Y}_g + \tilde{Z}_g) + (\tilde{X}_b + \tilde{Y}_b + \tilde{Z}_b) (1 - x_1 - y_1) \frac{1}{y_1}}. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) определяют правило пересчета координат цветности на XY -плоскости для изображения, заданного одним и тем же кодом RGB , но воспроизводимого на двух индикаторах МФЦИ с отличающимися матрицами профилей ЖК-панелей.

Стохастическая модель цветовоспроизведения ЖК-панелей

Стохастическая модель цветовоспроизведения серийно выпускаемых панелей, учитывающая технологический разброс их колориметрических характеристик, имеет следующий вид [11]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r + \Delta \cdot \xi_{X_r} & X_g + \Delta \cdot \xi_{X_g} & X_b + \Delta \cdot \xi_{X_b} \\ Y_r + \Delta \cdot \xi_{Y_r} & Y_g + \Delta \cdot \xi_{Y_g} & Y_b + \Delta \cdot \xi_{Y_b} \\ Z_r + \Delta \cdot \xi_{Z_r} & Z_g + \Delta \cdot \xi_{Z_g} & Z_b + \Delta \cdot \xi_{Z_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\xi_{X_r} \in [-X_r/2; +X_r/2]$, $\xi_{X_g} \in [-X_g/2; +X_g/2]$, $\xi_{X_b} \in [-X_b/2; +X_b/2]$, $\xi_{Y_r} \in [-Y_r/2; +Y_r/2]$, $\xi_{Y_g} \in [-Y_g/2; +Y_g/2]$, $\xi_{Y_b} \in [-Y_b/2; +Y_b/2]$, $\xi_{Z_r} \in [-Z_r/2; +Z_r/2]$, $\xi_{Z_g} \in [-Z_g/2; +Z_g/2]$, $\xi_{Z_b} \in [-Z_b/2; +Z_b/2]$ – равномерно распределенные случайные величины; Δ – параметр технологического разброса, обусловленного качеством производства экранов одного и того же изготовителя.

Результаты моделирования

На рис. 3 показаны семейства сечений (эллипсов) двумерной гистограммы распределения $p(x, y)$ координат цветности для различных значений параметра технологического разброса: $\Delta=0,2$; $\Delta=0,1$; $\Delta=0,05$; $\Delta=0,01$. Точке центра эллипса, единой для всех значений Δ , соответствует точка (отмечена на рис. 3 знаменем «+») с (x, y) -координатами, рассчитанными по (4) для $\Delta=0$.

Уровень порога L для горизонтального сечения гистограммы распределения $p(x, y)$ координат цветности получен из уравнения

$$L = \arg \min_L \left(\sum_{k_1=0}^{N-1} \sum_{k_2=0}^{N-1} I(H_{k_1, k_2} > L) H_{k_1, k_2} - P_D \right), \quad I(q) = \begin{cases} 0, & q < 0 \\ 1, & q > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где H_{k_1, k_2} – относительные частоты попадания (x, y) -координат цветности в подынтервал построения гистограммы $p(x, y)$; $I(q)$ – индикаторная функция; N – число подынтервалов гистограммы $p(x, y)$ по каждой из координат; P_D – уровень доверительной вероятности.

Уравнение (5) решено относительно L численным методом в среде моделирования MathCad 15.0. Размер подынтервала составил $0,0003 \times 0,0003$ ед. цветности на XY -плоскости.

Горизонтальные сечения гистограммы $p(x, y)$ на рис. 3 показаны для уровня доверительной вероятности $P_D = 0,999$ в различных областях треугольника цветового охвата для пяти различных ненулевых значений кода RGB . В частности, для $\Delta=0,2$ площадь эллипса включает порядка $5 \cdot 10^5$ значений (x, y) -координат цветности. Вершины треугольника цветового охвата получены из модели (4) при $\Delta=0$, т.е. соответствуют типовому значению координат цветности (x_R, y_R) , (x_G, y_G) , (x_B, y_B) ЖК-панелей одного производителя.

Сечения гистограммы $p(x, y)$ на различных уровнях L с достаточной для практики точностью соответствуют сечению, полученному по теоретической двумерной функции плотности вероятности для независимых нормально распределенных случайных величин x, y [12]:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{D_x D_y} \sqrt{1-\rho^2}} \exp \left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\frac{(x-M_x)^2}{D_x} - \frac{2\rho(x-M_x)(y-M_y)}{\sqrt{D_x D_y}} + \frac{(y-M_y)^2}{D_y} \right) \right),$$

$$\rho = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - M_x)(y_i - M_y)}{\sqrt{D_x D_y}}, \quad (6)$$

где ρ – коэффициент корреляции случайных величин x, y ; M_x, M_y – математические ожидания случайных величин x, y ; D_x, D_y – дисперсии случайных величин x, y . В (6) параметры M_x, M_y, D_x, D_y, ρ могут быть заменены соответствующими выборочными оценками, полученными в результате колориметрических измерений с образцами ЖК-панелей.

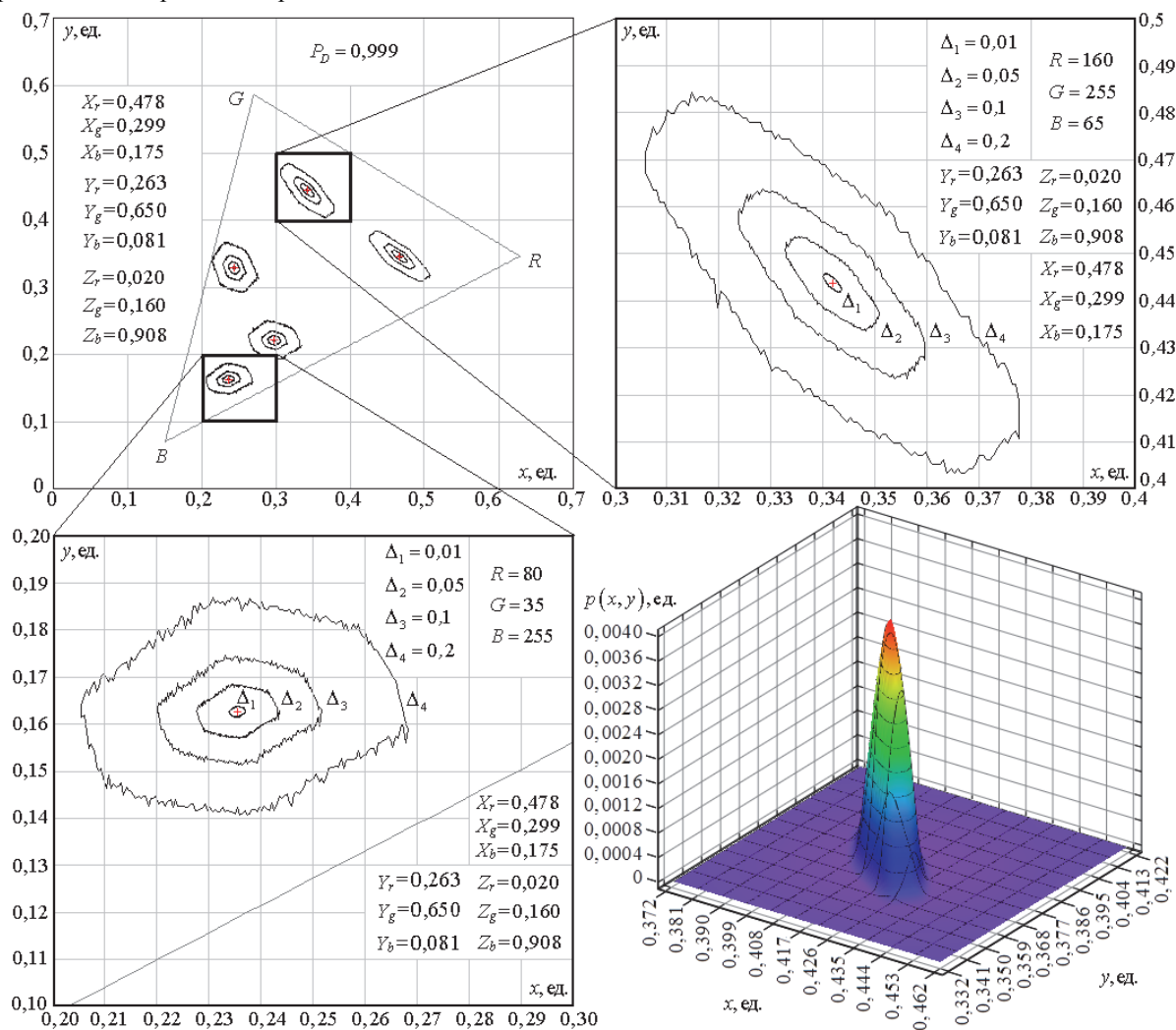


Рис. 3. Горизонтальные сечения гистограммы $p(x,y)$ и двумерная гистограмма распределения $p(x,y)$ для координат цветности на XY -плоскости

Уравнение семейства эллипсов равных плотностей вероятности, образованное горизонтальным сечением функции (6) на уровне λ , имеет вид [12]

$$Q(x, y) = \frac{(x-M_x)^2}{D_x} - \frac{2\rho(x-M_x)(y-M_y)}{\sqrt{D_x D_y}} + \frac{(y-M_y)^2}{D_y} = \lambda^2.$$

Разным значениям параметра λ соответствуют разные, но постоянные вероятности для всех точек эллипса при заданной функции плотности вероятности (6). Вероятность того, что точка плотности (6) со случайными (x,y) -координатами цветности, распределенными по двумерному нормальному закону, окажется внутри эллипса равных вероятностей с фиксированным порогом λ , равно [12]

$$P_D(\lambda) = \frac{1}{2\pi\sqrt{D_x D_y} \sqrt{1-\rho^2}} \iint_{g(\lambda)} \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)} Q(x, y)\right) dx dy = 1 - \exp\left(-\frac{\lambda^2}{2(1-\rho^2)}\right),$$

$$\lambda^2 = -2(1-\rho^2) \ln(1-P_D),$$

где $g(\lambda)$ – область определения плотности распределения координат (x, y) , ограниченная эллипсом сечения. Семейство эллипсов сечений теоретической функции плотности вероятности $f(x, y)$ на XY -плоскости в пределах треугольника цветового охвата приведено на рис. 4.

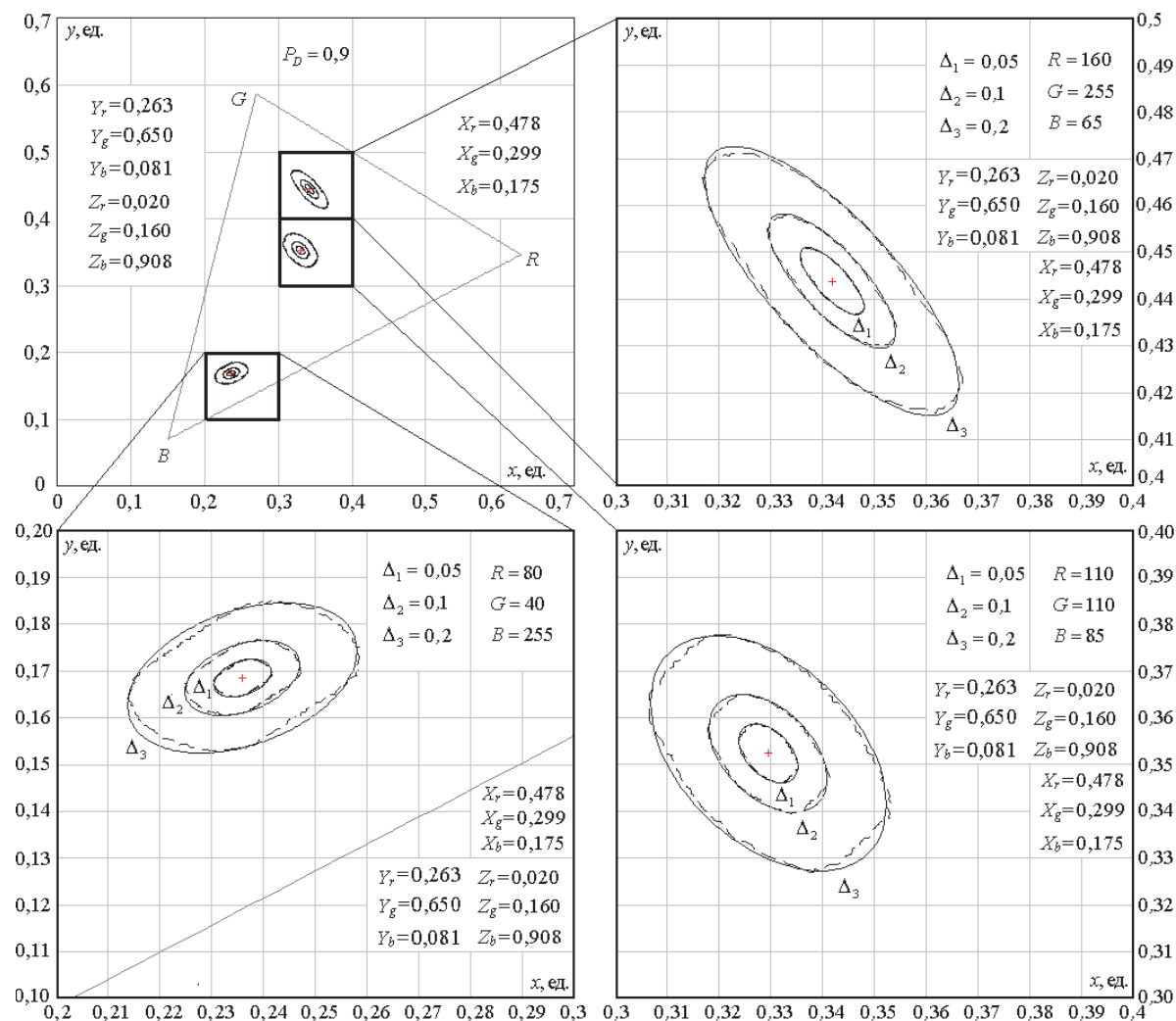


Рис. 4. Семейство эллипсов сечений гистограммы $p(x, y)$ (пунктирная линия) и теоретической функции $f(x, y)$ плотности вероятности (сплошная линия)

Гипотеза о нормальности двумерного распределения (x, y) -координат цветности серийно изготавливаемых ЖК-панелей может быть подтверждена проверкой по критерию согласия Колмогорова–Смирнова, обобщенному в работе [13] на многомерный случай.

Заключение

Анализ рис. 4 показывает, что разброс (x, y) -координат цветности, обусловленный технологическим разбросом параметров изготовления жидкокристаллических панелей, оказывается существенным даже при $\Delta = 0,01$: разброс x -координаты цветности находится в пределах 0,005 ед., разброс y -координаты цветности находится в пределах 0,005 ед. Производители жидкокристаллических панелей сегодня обеспечивают повторяемость изготовления образцов экранов на уровне разброса $0,1 \leq \Delta \leq 0,2$.

Разброс 0,005 ед. цветности при $\Delta = 0,01$ чувствителен для наблюдателя, может быть измерен современными средствами прямых измерений (колориметрами, спектрометрирами) и вполне допустим для качества исполнения аппаратуры бытового применения (мониторы, телевизоры, телефоны, i-Pad и др.), когда наблюдателю одновременно предъявлен один-единственный образец средства отображения

информации. Однако значения $\Delta=0,01$ недостаточно для изготовления жидкокристаллических панелей для многофункциональных индикаторов, когда наблюдатель воспринимает изображение одновременно [14–17] на нескольких (до 6 шт.) якобы идентичных бортовых индикаторах пилотажно-навигационной информации в авионике.

Предложенные математические выражения позволяют получать исходные данные для разработки методики [11] коррекции технологического разброса характеристик цветовоспроизведения серийно изготавливаемых образцов экранов.

Литература

1. Barber S., Dunbar L.L., Hardin D., Seah K. Aeronautical Chart Display Apparatus and Method. Patent US 7417641. 2008.
2. Gatchin Y.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G., Zharinov O.O. Theoretical estimation of Grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems // *Modern Applied Science*. 2015. V. 9. N 5. P. 197–210. doi: 10.5539/mas.v9n5p197
3. Kumar S.V., Ramana P.V. Color selection algorithm design for smart lighting application // *International Journal of Computer Science and Information Technology & Security*. 2014. V. 4. N 1. P. 8–13.
4. Kwak Y., Lee S., Choe W., Kim C.-Y. Optimal chromaticities of the primaries for gamut 3-channel display // *Proceedings of SPIE*. 2005. V. 5667. P. 319–327. doi: 10.1117/12.587338
5. Zharinov I.O., Zharinov O.O., Kostishin M.O. The research of redundancy in avionics color palette for on-board indication equipment // *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*. Omsk, Russian Federation, 2015. Art. 7147313. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147313
6. Заргарьянц Г.С., Михайлов О.М. Интегральный дистанционный колориметр на основе колориметрической системы КЗФ // *Светотехника*. 2008. № 3. С. 19–25.
7. Aleksanin S.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G., Perezyabov O.A., Zharinov O.O. Evaluation of chromaticity coordinate shifts for visually perceived image in terms of exposure to external illuminance // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. N 17. P. 7494–7501.
8. Huang W., Li J.-M., Yang L.-M., Jin Zh.-L., Zhong Zh.-G., Liu Y. Local dimming algorithm and color gamut calibration for RGB LED backlight LCD display // *Optics and Laser Technology*. 2011. V. 43. N 1. P. 214–217. doi: 10.1016/j.optlastec.2010.06.016
9. Menesatti P., Angelini C., Pallottino F., Antonucci F., Aguzzi Y., Costa C. RGB color calibration for quantitative image analysis: the «3D Thin-Plate Spline» warping approach // *Sensors*. 2012. V. 12. N 6. P. 7063–7079. doi: 10.3390/s120607063
10. Seetzen H., Makki S., Ip H., Wan Th., Kwong V., Ward Gr., Heidrich W., Whitehead L. Self-calibrating wide color gamut high dynamic range display // *Proceedings of SPIE*. 2007. V. 6492. Art. 64920Z. doi: 10.1117/12.720875
11. Жаринов И.О., Жаринов О.О. Метод программной компенсации технологического разброса координат цветности жидкокристаллических панелей // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 3. С. 387–397. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-3-387-397
12. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1969. Т. 1. 752 с.
13. Justel A., Pena D., Zamar R. A multivariate Kolmogorov-Smirnov test of goodness of fit // *Statistics and Probability Letter*. 1997. V. 35. N 3. P. 251–259.
14. Livada B. Avionic displays // *Scientific Technical Review*. 2012. V. 62. N 3–4. P. 70–79.
15. Desjardins D.D. *Military Displays: Technology and Applications*. SPIE Press, 2013. 170 p.
16. Богатырев В.А. Надежность и эффективность резервирования компьютерных сетей // *Информационные технологии*. 2006. № 9. С. 25–30.
17. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы // *Информационные технологии*. 2009. № 6. С. 41–47.

Жаринов Игорь Олегович — доктор технических наук, доцент, руководитель учебно-научного центра АО «ОКБ «Электроавтоматика», Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, igor_rabota@pisem.net

Жаринов Олег Олегович — кандидат технических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, zharinov73@hotmail.ru

Igor O. Zharinov — D.Sc., Associate professor, Chief of Learning Scientific Center, SPb Scientific Design Bureau “Electroavtomatika” n.a. P. A. Efimov, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, Igor_rabota@pisem.net

Oleg O. Zharinov — PhD, Associate professor, Associate professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, zharinov73@hotmail.ru