

For citation:

Levskii M. V. Features of Attitude Control of a Spacecraft, Equipped with Inertial Actuators, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 188–195.

DOI: 10.17587/mau.16.188-195

References

1. **Levskii M. V.** *Kosmicheskie Issledovaniya*, 2011, vol. 49, iss. 6 (in Russian).
2. **Levskii M. V.** *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2012, no. 4 (in Russian).
3. **Raushenbakh B. V., Tokar' E. N.** *Upravlenie orientatsiei kosmicheskikh apparatov* (Control of the orientation of spacecraft), Moscow, Nauka, 1974 (in Russian).
4. **Levskii M. V.** *Kosmonavtika i Raketostroenie*, 1999, no. 16 (in Russian).
5. **Branets V. N., Shmyglevskii I. P.** *Primenenie kvaternionov v zadachakh orientatsii tverdogo tela* (The use of quaternions in problems of orientation of a rigid body), Moscow, Nauka, 1973 (in Russian).
6. **Levskii M. V.** *Byulleten' "Izobreteniya. Zayavki i Patenty"*, 1997, no. 29 (in Russian).
7. **Kastruchchio I.** *Voprosy Raketnoi Tekhniki*, 1973, no. 10 (in Russian).

8. **Sarychev V. A., Belyaev M. Yu., Zykov S. G., Sazonov V. V., Teslenko V. P.** *Preprint IPM im. M. V. Keldysha AN SSSR*, 1989, no. 10 (in Russian).

9. **Kovtun V. S., Mitrikas V. V., Platonov V. N., Revniykh S. G., Sukhanov N. A.** *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya Kibernetika*, 1990, no. 3 (in Russian).

10. **Sarychev V. A., Belyaev M. Yu., Zykov S. G., Zueva E. Yu., Sazonov V. V., Saigirayev Kh. U.** *Trudy XXV chtenii, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idei K. E. Tsiolkovskogo. Sektsiya "Problemy raketnoi i kosmicheskoi tekhniki"*, Moscow, 1991 (in Russian).

11. **Levskii M. V.** *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2011, no. 1 (in Russian).

12. **Alekseev K. B., Bebenin G. G.** *Upravlenie kosmicheskimi letatel'nymi apparatami* (The space vehicles control), Moscow, Mashinostroenie, 1974 (in Russian).

13. **Levskii M. V.** *Kosmicheskie Issledovaniya*, 2007, vol. 45, iss. 3 (in Russian).

Corresponding author:

Levskii Mikhail V., Leading Researcher, Maximov Research Institute of Space Systems as Branch of the Khrunichev State Research and Production Space Center, Yubileiny, Moscow oblast, e-mail: dp940@mail.ru

УДК 629.73.02; 629.73.05/.06; 535.643

А. В. Шукалов, ген. директор, **П. П. Парамонов**, д-р техн. наук, проф., советник ген. директора, **И. О. Жаринов**, д-р техн. наук, доц., руководитель учебно-научного центра, igor_rabota@pisem.net, ФГУП "Санкт-Петербургское ОКБ "Электроавтоматика" имени П. А. Ефимова",

О. О. Жаринов, канд. техн. наук, доц.,

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

М. О. Костишин, аспирант,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО)

Алгоритм и методика автоматизации процедуры оценивания координат цветности элементов изображения бортовых средств индикации в авионике

Рассматривается задача исследования бортовых средств отображения информации в целях определения автоматизированным способом координат цветности элементов изображения, обладающих повышенными характеристиками восприятия для человека в условиях воздействия внешней освещенности. Рассматриваются различные системы кодирования цвета, применяемые в бортовых индикаторах, выполненных на базе жидкокристаллической панели. Предлагается схема автоматизированного рабочего места для проведения исследования, приводятся описания и назначение компонентов системы автоматизации проектирования, установленной в составе рабочего места. Обсуждаются результаты экспериментов по измерению яркости и оценке яркостного контраста изображений в различных цветах. Предлагается алгоритм автоматизированного поиска глобального максимума двумерной поверхности распределения контраста изображения на плоскости координат цветности. Результатами исследования являются методика и алгоритм поиска координат цветности с максимальным значением яркостного контраста, а также сами координаты цветности в точке максимума контраста.

Ключевые слова: индикация, авионика, яркостный контраст, системы кодирования цвета, преобразование Грассмана, задача оптимизации

Введение

В процессе проектирования бортовых средств отображения пилотажно-навигационной информации и геоинформационных данных разработчики бортового авиационного оборудования сталкиваются с задачей выбора желаемых значений координат цветности индицируемых элементов изображения. По сложившейся в авиационной промышленности практике соответствие вида параметра и наименования цвета, которым отображается этот

параметр, определено в действующей нормативно-технической документации (НТД).

Так, например, согласно отечественному руководству 25-11А по сертификации систем электронной индикации самолетов транспортной категории индикация:

- указателя угла крена должна осуществляться белым цветом;
- указателя заданного путевого угла ортодромии — голубым цветом;
- шкалы крутящих моментов — салатным цветом;

- индекса скорости поднятия стойки шасси — коричневым цветом;
- указателя азимута радиомаяка — желтым цветом и т. д.

Руководство 25-11 А, таким образом, определяет общепринятые в международной практике создания авиационных объектов наименования цветов для индикации каждого вида информации или параметра, но не определяет значения (x, y) -координат цветности для каждого наименования цвета. Координаты цветности на XY -плоскости связаны со значениями кодов RGB (Red, Green, Blue) цветов, используемых разработчиками при подготовке палитры функционального программного обеспечения. Индикация элементов изображения осуществляется на борту летательного аппарата (ЛА) на жидкокристаллическом (ЖК) экране многофункциональных цветных индикаторов (МФЦИ).

Из практики применения МФЦИ известно [1–3], что восприятие пилотом значений параметров, индицируемых на ЖК экране, затрудняется при наличии прямой солнечной засветки, создающей в плоскости экрана уровень внешней освещенности до 75 клк. Внешняя освещенность существенно снижает значение яркостного контраста индицируемого изображения за счет перераспределения отношения яркости цветного изображения и яркости фона. В связи с этим требуются специальные проектные решения для определения компонентов цветов и оттенков, устойчивых к восприятию человеком в условиях воздействия на средство индикации повышенной внешней освещенности.

Таким образом, решение задачи выбора желаемых значений координат цветности элементов изображения авионики должно быть основано на:

- выполнении существующих авиационных требований НТД;
- введении критерия качества процедуры выбора (контраста индицируемого изображения во всех используемых в палитре МФЦИ цветах);
- выполнении процедуры оптимизации выбора по заданному критерию, осуществляемой в целях определения экстремума (максимума) критерия качества на основе математических методов поиска оптимальных проектных решений.

1. Принцип формирования изображения в бортовых системах индикации

Изображение на экране МФЦИ формируется путем отображения в различных цветах всех пикселей ЖК экрана. Совокупности пикселей, структурированные определенным образом, образуют знаки, мнемосимволы, линии, секторы, дуги, окружности с заливкой и без и т. д., индицируемые на экране МФЦИ. Цвет отображаемых пикселей определяется углами поворота кристаллов в красном (R — Red), зеленом (G — Green) и синем (B — Blue) компонентах цвета, поляризирующих задний или боковой подсвет белого спектра свечения, создаваемый лампами подсвета ЖК панели.

Число отображаемых на МФЦИ оттенков каждого цвета определяется разрядностью данных ЖК панели и особенностями построения тракта видеоОЗУ графического контроллера [4–7] МФЦИ. Так, для ЖК панели с 6-битным форматом данных по компонентам RGB возможно отображение 2^6 оттенков для каждого из основных цветов:

- красного цвета (двоичный позиционный код управления углом поворота кристалла каждого пикселя $R_0...R_5 = \{000000\}, \{000001\}, \dots, \{111111\}$);
- зеленого цвета (двоичный позиционный код управления углом поворота кристалла каждого пикселя $G_0...G_5 = \{000000\}, \{000001\}, \dots, \{111111\}$);
- синего цвета (двоичный позиционный код управления углом поворота кристалла каждого пикселя $B_0...B_5 = \{000000\}, \{000001\}, \dots, \{111111\}$), и их 2^{18} комбинаций, образующих полную цветовую палитру ЖК матрицы. Аналогично для 8-битного формата данных ЖК панели $\{R_0...R_7, G_0...G_7, B_0...B_7\}$ число отображаемых на экране МФЦИ цветов и оттенков составит 2^{24} , что повышает номенклатуру воспроизводимых на борту ЛА цветовых оттенков.

Функциональная схема тракта формирования изображения в графическом контроллере (модуле графическом) МФЦИ приведена на рис. 1.

Канал формирования изображения состоит из трех банков видеоОЗУ; элементов программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС); ПЗУ знаков и цветов, программируемого пользователем извне; шинного формирователя (ШФ), необходимого для поддержки межмодульного интерфейса графического контроллера; ПЗУ загрузки ПЛИС и передатчика интерфейса LVDS (Low Voltage Digital Signal) — интерфейса ЖК панели.

Соответствие каждого цвета, заданного кодом RGB в видеоОЗУ графического контроллера, координатам цветности воспроизводимого цвета основано на преобразованиях (прямом и обратном) Грассмана, связывающих код цвета (рис. 2, а, см. третью сторону обложки) в компонентах $R, G, B \in [0, 255]$

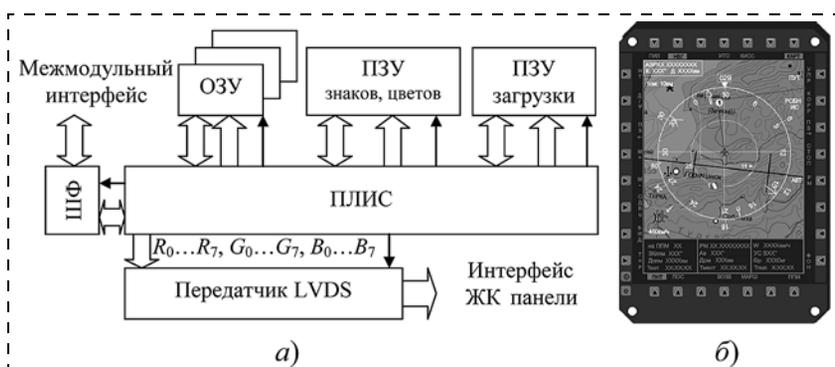


Рис. 1. Функциональная схема тракта формирования изображения в МФЦИ (а) и пример индикационного кадра на МФЦИ (б)

в десятичной системе счисления со значениями сторон $X, Y, Z \in [0, 1]$ цветового треугольника Максвелла (рис. 2, б, см. третью сторону обложки). Уравнения прямого $RGB \rightarrow XYZ$ и обратного $XYZ \rightarrow RGB$ преобразования имеют, соответственно, вид [8–11]:

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

где X, Y, Z — компоненты цвета в системе XYZ ; $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ — компоненты цвета, определенные Международной комиссией по освещению (МКО) и используемые в качестве эталона для точного стандарта определения цвета; R, G, B — код цвета (в десятичной системе счисления) компонентов основных цветов (красный, зеленый, синий) в системе RGB . Компоненты X_r, Y_r, Z_r определяют правило преобразования для эталонного значения красного цвета, компоненты X_g, Y_g, Z_g и X_b, Y_b, Z_b — для зеленого и синего цветов соответственно.

Переход от значений сторон X, Y, Z треугольника Максвелла к (x, y) -координатам цветности (рис. 2, в, см. третью сторону обложки) элементов изображения осуществляется по формулам

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

координата z при таком преобразовании может не рассчитываться.

2. Автоматизированное рабочее место оператора МФЦИ

Подготовка палитры функционального программного обеспечения (ФПО) выполняется на инструментальной ЭВМ (ИЭВМ) в системе автоматизированного проектирования (САПР) автоматизированного рабочего места (АРМ) [12–15] оператора МФЦИ. АРМ устанавливается на предприятии-разработчике МФЦИ и может использоваться на сторонних предприятиях, специализирующихся на проведении испытаний и на сертификации авиационных систем индикации, входящих в состав информационно-управляющего поля кабины летательного аппарата.

САПР АРМ МФЦИ составляют (рис. 3):

1. Программное обеспечение (ПО) САПР, включающее компоненты данных, компоненты ФПО и тестового программного обеспечения (ТПО), компоненты прикладного ПО для загрузки данных и программ в МФЦИ. Компонентами ПО являются доку-

менты с текстами программ и кодами данных. Компонентами данных являются:

- палитра (таблица десятичных кодов RGB цветов, используемых разработчиками ПО при создании индикационных кадров авионики, включающих отображение пилотажно-навигационных параметров и геоинформационных данных);
- библиотека шрифтов и символов согласованной конфигурации, представленных в памяти графического контроллера МФЦИ в векторном и растровом виде для различных по размеру (в пикселях) знакомест (библиотека включает изображения букв и символов согласованной конфигурации различных языков (русских букв, латиницы и др.), цифры в римском и арабском алфавите и т. д.);
- библиотека внутренних углов (приращений, рассчитанных по тригонометрическим функциям для построения на экране МФЦИ графических примитивов типа "дуга" и "окружность" с использованием аппроксимации вписанным многоугольником).

ПО САПР позволяет оператору решать автоматизированным способом следующие задачи:

- создавать и редактировать на ИЭВМ файлы загрузочных компонентов данных, используемых при отображении индикационных кадров МФЦИ;
- заносить из ИЭВМ в память графического контроллера МФЦИ по технологическому интерфейсу загрузочные компоненты данных;
- заносить из ИЭВМ в память вычислительного модуля МФЦИ компоненты ФПО и ТПО для оценки работоспособности изделия во всех режимах работы.

2. Математическое обеспечение САПР, включающее совокупность математических методов и критериев качества, математических моделей и алгоритмов автоматизации проектирования, необходимых для выполнения процедуры оптимизации

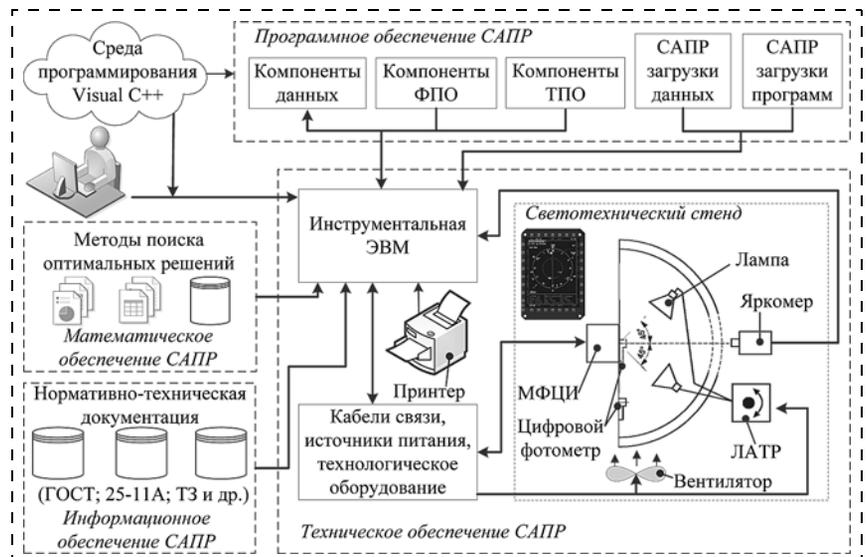


Рис. 3. Компоненты САПР автоматизированного рабочего места МФЦИ

процесса выбора оператором цветовой палитры МФЦИ. Математическое обеспечение САПР позволяет оператору решать следующие задачи:

- осуществлять выбор методов и критериев, приемлемых для выполнения процедуры оптимизации выбора цветовой палитры;
- проводить математический анализ данных, полученных в результате измерения яркости и оценки яркостного контраста изображения, в целях поиска компонентов цветов и оттенков, обладающих повышенными характеристиками восприятия для человека.

3. Информационное обеспечение САПР, включающее совокупность сведений, необходимых для выполнения процедур автоматизированного выбора. Основой информационного обеспечения САПР являются автоматизированные банки данных, которые состоят из различных баз данных САПР и систем управления базами данных. В информационное обеспечение САПР автоматизированного рабочего места МФЦИ входят:

- НТД (в частности, руководство 25-11А), государственные и отраслевые стандарты на средства отображения информации индивидуального и коллективного использования, стандарты на оформление документации, техническое задание (ТЗ) на разработку МФЦИ;
- существующие (полученные ранее другими разработчиками) типовые проектные решения МФЦИ

с указанием значимых для процедуры выбора параметров изделий;

- существующие системы кодирования изображений (математические зависимости, связывающие коды, координаты цветности и длины волн цветов и оттенков) [8—11].

Информационное обеспечение САПР позволяет оператору решать следующие задачи:

- осуществлять выбор актуального для авионики подмножества цветов и оттенков, используемых при отображении пилотажно-навигационных параметров и геоинформационных данных, из полного множества цветов и оттенков (2^{18} для 6-битного ЖК экрана или 2^{24} для 8-битного ЖК экрана), потенциально воспроизводимых на МФЦИ;
- осуществлять выбор системы кодирования изображения, в которой будет выполняться процедура выбора желаемых значений координат цветности;
- осуществлять выбор системы кодирования изображения, в которой будет выполняться проектирование физического устройства — графического контроллера МФЦИ;
- осуществлять выбор системы кодирования изображения, в которой будет выполняться программирование физического устройства.

4. Техническое обеспечение САПР, включающее совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для

выполнения процедуры оптимизации выбора цветовой палитры МФЦИ. Техническое обеспечение САПР МФЦИ позволяет оператору решать автоматизированным способом следующие задачи:

- подготовка компонентов данных, компонентов ФПО и ТПО. Техническое обеспечение САПР МФЦИ, предназначенное для решения этой задачи, составляет ИЭВМ. ИЭВМ с установленным ПО позволяет оператору осуществлять программным способом процедуры автоматизации подготовки и редактирования компонентов данных и компонентов программ перед их вводом в МФЦИ. ИЭВМ предоставляет оператору возможность кодирования загружаемых компонентов, сохранения данных и программ на жестком диске ИЭВМ и редактирования созданных ранее данных;
- передача данных. Группу технического обеспечения САПР, предназначенного для решения этой задачи, составляют: ИЭВМ, кабели связи и источники питания. Группа предоставляет оператору возможность ввода данных в МФЦИ, визуального и аппаратурного кон-

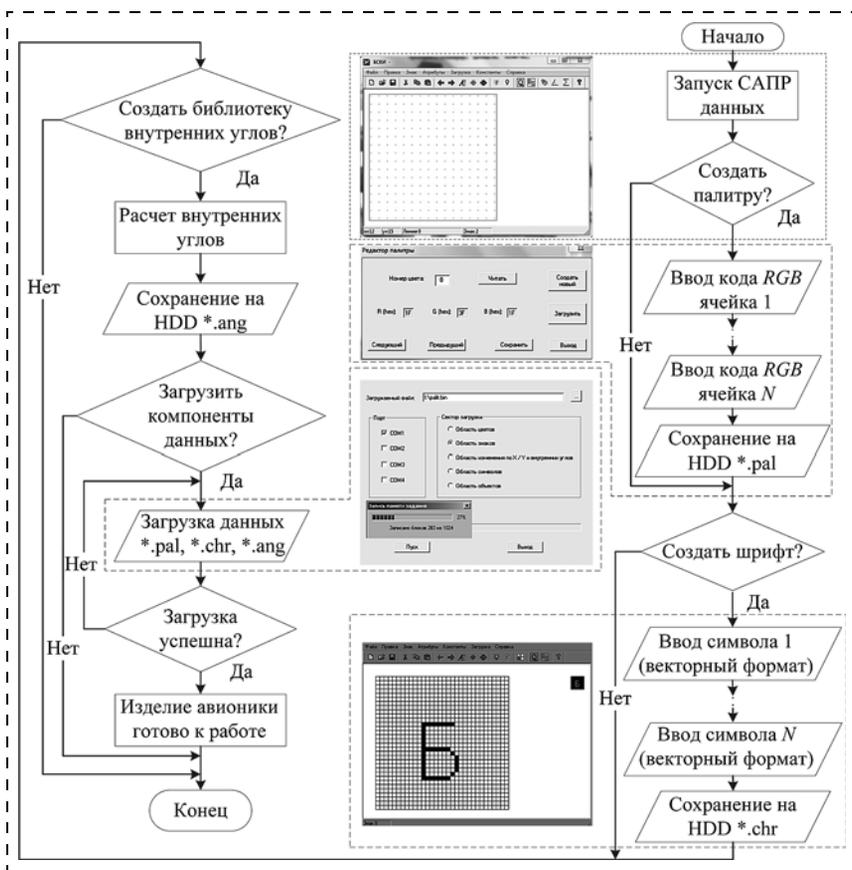


Рис. 4. Алгоритм подготовки и загрузки компонентов данных в МФЦИ

троля целостности занесения данных по значениям контрольных сумм. Алгоритм подготовки и занесения в МФЦИ компонентов данных и программ приведен на рис. 4. Загружаемые файлы компонентов данных условно обозначены как *.pal, *.chr, *.ang соответственно для файлов палитры, библиотеки шрифтов и символов согласованной конфигурации, библиотеки внутренних углов;

- программная обработка данных. Группу технического обеспечения САПР, предназначенного для решения этой задачи, составляют: ИЭВМ; светотехнический стенд, включающий цифровой фотометр, яркомер, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), лампы внешней освещенности и вентилятор обдува ЖК экрана; технологическое оборудование и кабели связи; источники питания. Группа предоставляет оператору возможность измерения яркости свечения экрана МФЦИ в любом цвете (оттенке цвета), включая фоновый (черный, серый), передачи результатов измерений яркости ЖК экрана МФЦИ в ИЭВМ по технологическому интерфейсу, расчета яркостного контраста элементов изображения на экране МФЦИ в условиях воздействия внешней освещенности уровня от 0 до 75 клк;
- отображение и документирование данных. Группу технического обеспечения САПР, предназначенного для решения этой задачи, составляют ИЭВМ и принтер. Группа предоставляет оператору возможность оперативного представления и документирования полученных результатов (проектных решений) по выбору компонентов цветовой палитры МФЦИ, возможность подготовки научно-технического отчета о полученных результатах исследования. Группа позволяет оператору изменять производительность своей работы на АРМ путем использования ИЭВМ разного типа, путем использования мультипрограммных и диалоговых режимов работы прикладного ПО, установленного на ИЭВМ;
- поддержка архивирования готовых проектных решений. Техническое обеспечение САПР, предназначенное для решения этой задачи, составляет ИЭВМ. ИЭВМ позволяет оператору сохранять полученные в процессе исследования компоненты цветовой палитры МФЦИ, а также сравнивать результаты проектных решений, полученных для различных моделей МФЦИ, выполненных на базе ЖК экранов различных фирм-производителей, в условиях воздействия различных уровней внешней освещенности.

3. Методика и алгоритм автоматизации процедуры поиска проектного решения по выбору координат цветности палитры МФЦИ

Методика автоматизации поиска проектного решения. В процессе использования АРМ МФЦИ оператор получает автоматизированным способом

набор измерений яркости, выполняемых с помощью яркомера, и набор оценок яркостного контраста, вычисляемых на ИЭВМ, для цветов и оттенков, воспроизводимых на МФЦИ. Результатами измерений и оценок, полученных техническим обеспечением САПР в условиях воздействия на ЖК экран МФЦИ внешней освещенности уровня 75 клк, являются наборы значений:

$$\{x_1^{c_1}, \tilde{x}_1^{c_1}, y_1^{c_1}, \tilde{y}_1^{c_1}, \tilde{b}_1^{c_1}, k_1^{c_1}\}, \{x_2^{c_1}, \tilde{x}_2^{c_1}, y_2^{c_1}, \tilde{y}_2^{c_1}, \tilde{b}_2^{c_1}, k_2^{c_1}\}, \dots,$$

$$\{x_{m_1}^{c_1}, \tilde{x}_{m_1}^{c_1}, y_{m_1}^{c_1}, \tilde{y}_{m_1}^{c_1}, \tilde{b}_{m_1}^{c_1}, k_{m_1}^{c_1}\},$$

$$\{x_1^{c_2}, \tilde{x}_1^{c_2}, y_1^{c_2}, \tilde{y}_1^{c_2}, \tilde{b}_1^{c_2}, k_1^{c_2}\}, \{x_2^{c_2}, \tilde{x}_2^{c_2}, y_2^{c_2}, \tilde{y}_2^{c_2}, \tilde{b}_2^{c_2}, k_2^{c_2}\}, \dots,$$

$$\{x_{m_2}^{c_2}, \tilde{x}_{m_2}^{c_2}, y_{m_2}^{c_2}, \tilde{y}_{m_2}^{c_2}, \tilde{b}_{m_2}^{c_2}, k_{m_2}^{c_2}\},$$

...

$$\{x_1^{c_s}, \tilde{x}_1^{c_s}, y_1^{c_s}, \tilde{y}_1^{c_s}, \tilde{b}_1^{c_s}, k_1^{c_s}\}, \{x_2^{c_s}, \tilde{x}_2^{c_s}, y_2^{c_s}, \tilde{y}_2^{c_s}, \tilde{b}_2^{c_s}, k_2^{c_s}\}, \dots,$$

$$\{x_{m_s}^{c_s}, \tilde{x}_{m_s}^{c_s}, y_{m_s}^{c_s}, \tilde{y}_{m_s}^{c_s}, \tilde{b}_{m_s}^{c_s}, k_{m_s}^{c_s}\},$$

где x^c, y^c — координаты цветности, рассчитанные по формулам (1), (2) для десятичных кодов RGB c -го цвета (оттенка), отображаемого на экране МФЦИ; \tilde{x}^c, \tilde{y}^c — координаты цветности, полученные от измерительной аппаратуры на АРМ для c -го цвета (оттенка); \tilde{b}^c — измеренная яркость c -го цвета (оттенка); k^c — оцененное значение яркостного контраста c -го цвета (оттенка); m — число существующих измерений для одного наименования цвета; s — число цветов (оттенков), имеющих различные наименования и используемых в палитре МФЦИ; $c \in c_1, \dots, c_s, m \in m_1, \dots, m_s$.

Опытным путем замечено, что расчетные и измеренные значения (x, y) -координат цветности в ряде экспериментов с ЖК экранами МФЦИ различных производителей не совпадают с точностью до погрешности измерений. Значимые отклонения $|x - \tilde{x}|, |y - \tilde{y}|$ обусловлены особенностями технологии изготовления ЖК матриц и принятыми разработчиками решениями по соблюдению баланса белого цвета (точки белого). В частности, может использоваться как стандарт МКО, принятый в 1931 г., так и стандарт МКО, принятый в 1964 г. В выражении (1) следует использовать соответствующие принятому стандарту МКО значения $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ — "профиль" ЖК матрицы, — являющиеся уникальными для разных систем кодирования цвета и балансов белого цвета. Примеры [17] значений параметров XYZ преобразования (1) и координат цветности точки белого цвета преобразования (2) в стандартах МКО 1931 г., МКО 1964 г. приведены в таблице. Нижний индекс 10 у переменных X, Y, Z, x, y определяет принадлежность этих величин к МКО 1964 г.

Значения параметров XYZ и (x, y)-координат цветности для точки белого цвета в стандартах МКО 1931 г., 1964 г.

Тип системы представления точки белого	Цветовое пространство XYZ, МКО, 1931 г.			Координаты цветности точки белого	
	X	Y	Z	x	y
D-50	96,41	100	82,50	0,3457	0,3585
D-55	95,68	100	92,14	0,3324	0,3474
D-65	95,04	100	108,9	0,3127	0,329
D-75	94,97	100	122,6	0,2991	0,3149
Тип системы представления точки белого	Цветовое пространство X ₁₀ Y ₁₀ Z ₁₀ , МКО, 1964 г.			Координаты цветности точки белого	
	X ₁₀	Y ₁₀	Z ₁₀	x ₁₀	y ₁₀
D-50	96,71	100	81,41	0,3477	0,3596
D-55	95,80	100	90,93	0,3341	0,3488
D-65	94,81	100	107,3	0,3138	0,331
D-75	94,42	100	120,6	0,2997	0,3174

Важно также заметить, что число m существующих результатов измерений для одного фиксированного наименования цвета (оттенка) определяется:

- диапазоном длин волн, отведенных в НТД для данного наименования оттенка (цвета), т. е. существуют (x_{\min}^c, y_{\min}^c) , (x_{\max}^c, y_{\max}^c) , такие что $x_{\min}^c = x_1^c, y_{\min}^c = y_1^c, x_{\max}^c = x_{m_s}^c, y_{\max}^c = y_{m_s}^c$, и видом ограничивающей функции (рис. 5, а, см. третью сторону обложки), определяющей область одного цвета на XY-плоскости, внутри которой наименование цвета считается "постоянным";
- дискретностью изменения (x, y)-координат, определяемой путем решения уравнений (1) и вычисления преобразований (2) для каждого дискретного шага кода RGB.

Оценка яркостного контраста для c -го цвета в точке (x_i, y_j) вычисляется как

$$k^c(x_i, y_j) = (\tilde{b}^c - \tilde{b}_0) / \tilde{b}_0, \quad i = 1, 2, \dots, m_s, j = 1, 2, \dots, s, \quad (3)$$

где \tilde{b}_0 — измеренное яркомером значение яркости фона. Черному фону соответствует цвет, индицируемый на экране МФЦИ с комбинацией десятичных кодов $R = G = B = 0$.

На рис. 5, б (см. третью сторону обложки) приведен пример поверхности, полученной в результате оценок распределения значений яркостного контраста изображения в окрестностях (x, y)-координат белого цвета [0,3...0,35] для ограничивающей функции типа квадрат. Как следует из анализа рис. 5, б, в распределении яркостного контраста присутствуют точки локальных и глобального максимумов, имеющих проекции на XY-плоскость, и точки минимума значений k . Для практического использования важными являются значения k , превышающее установленное в НТД для бортового средства отображения информации значение 2, т. е. $k > 2$.

При решении оптимизационной задачи актуальным является значение \hat{k} в точке глобального максимума (супремума) и соответствующие этому значению $(\hat{x}, \hat{y})|_c = \text{white}$ — координаты цветности.

Очевидно, координаты $(\hat{x}, \hat{y})|_c = \text{white}$ определяют точку на графике рис. 2, в, обладающую для данного МФЦИ наилучшими визуальными характеристиками восприятия человеком (в белом цвете). Аналогично могут быть получены распределения поверхностей для значений яркостного контраста изображений и соответствующие им точки супремумов $\{\hat{k}^c, (\hat{x}^c, \hat{y}^c)\}$, $c = 1, 2, \dots, s$, в зеленом, красном, синем, голубом, коричневом, желтом и др. цветах (оттенках), предусмотренных руководством 25-11А для использования при создании бортовых индикационных кадров авионики.

Алгоритм автоматизации поиска проектного решения. Алгоритм поиска точки глобального максимума на двумерной поверхности реализуется на ИЭВМ технического обеспечения САПР и приведен на рис. 6. Основу алгоритма составляет математический аппарат метода пошагового поиска, который является разновидностью метода градиентного поиска [16], относящегося к категории методов автоматизированного поиска оптимальных проектных решений, включенных в математическое обеспечение САПР автоматизированного рабочего места МФЦИ.

Метод предусматривает пошаговый анализ значений дискретной функции поверхности, в которых определен контраст изображения для каждого фиксированного цвета ($c = \text{const}$), с вычислением целевой функции вида

$$\hat{k}^c = \max\{k^c(x_i^c, y_j^c)\}, \quad i = 1, 2, \dots, m_s, j = 1, 2, \dots, s, \quad (4)$$

где $x_{\min}^c \leq x_i^c \leq x_{\max}^c, y_{\min}^c \leq y_j^c \leq y_{\max}^c$, т. е. анализ проводится в окрестностях значений (x, y)-координат для c -го цвета.

Начальными условиями для алгоритма рис. 6 являются:

- матрица "профиля" ЖК экрана с переменными $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$, значения которых определяются стандартом МКО и выбранным в нем оператором типом системы оценки баланса белого цвета (точки белого цвета) — D-75, D-65, D-55, D-50;
- координаты $(x_{\min}^c, y_{\min}^c), (x_{\max}^c, y_{\max}^c)$, задающие на XY-плоскости граничные условия для цвета (оттенка), в пределах которого наименование цвета остается "постоянным".

Основу алгоритма составляет тройной цикл полного перебора десятичных кодов RGB, изменяющих свое значение в пределах [0...255], последовательно для всех трех компонентов (красного, зеленого и си-

него), с вычислением в каждой точке, удовлетворяющей условию $x_{\min}^c \leq x_i^c \leq x_{\max}^c$, $y_{\min}^c \leq y_j^c \leq y_{\max}^c$, значения яркостного контраста изображения. Шаг инкрементирования каждого десятичного компонента RGB минимально возможный, дискретный, равен единице.

Одновременно в цикле модифицируются переменные, определяющие точку экстремума $\{\hat{k}^c, (\hat{x}^c, \hat{y}^c)\}$ с максимальным значением контраста в данном цвете, фиксируется также значение кода $\hat{R} \hat{G} \hat{B}$, при котором достигается эта точка. Яркость фона \tilde{b}_0 в алгоритме определяется на начальном этапе путем измерения на ЖК экране МФЦИ яркости изображения, индицируемого с кодами $R = G = B = 0$.

Граничные условия определяются видом и параметрами ограничивающей функции для каждого фиксированного цвета (оттенка) и могут быть рассчитаны непосредственно в цикле анализа значений точек поверхности. В предлагаемом алгоритме ограничивающей функцией является прямоугольник, координаты которого задаются на начальном этапе эксперимента для каждого наименования цвета, используемого в цветовой палитре МФЦИ.

Как следует из анализа рис. 5, а, перспективными для практического использования могут также быть ограничивающие функции типа окружность. В работе [18] приведена методика Мак-Адама, описывающая принцип построения на XU -плоскости ограничивающих функций типа эллипс с оценкой значений параметров эллипсов в зависимости от длины световой волны для различных цветов и оттенков.

Важно заметить, что в отличие от методов случайного поиска, где анализируются значения функции поверхности в случайно выбираемых точках (x_i, y_j) , наличие граничных условий на изменение аргументов функции поверхности и априори дискретный характер изменения этих аргументов

$\Delta x^c = x_{i+1}^c - x_i^c$, $\Delta y^c = y_{j+1}^c - y_j^c$ позволяют методу пошагового поиска гарантировать нахождение глобального максимума поверхности автоматизированным способом за ограниченное время.

Поскольку алгоритм поиска реализуется на ИЭВМ технического обеспечения САПР в составе АРМ МФЦИ, у оператора нет необходимости проводить процедуру измерения яркости каждого цвета (оттенка) и процедуру оптимизации поиска максимума контраста изображения на измеренном

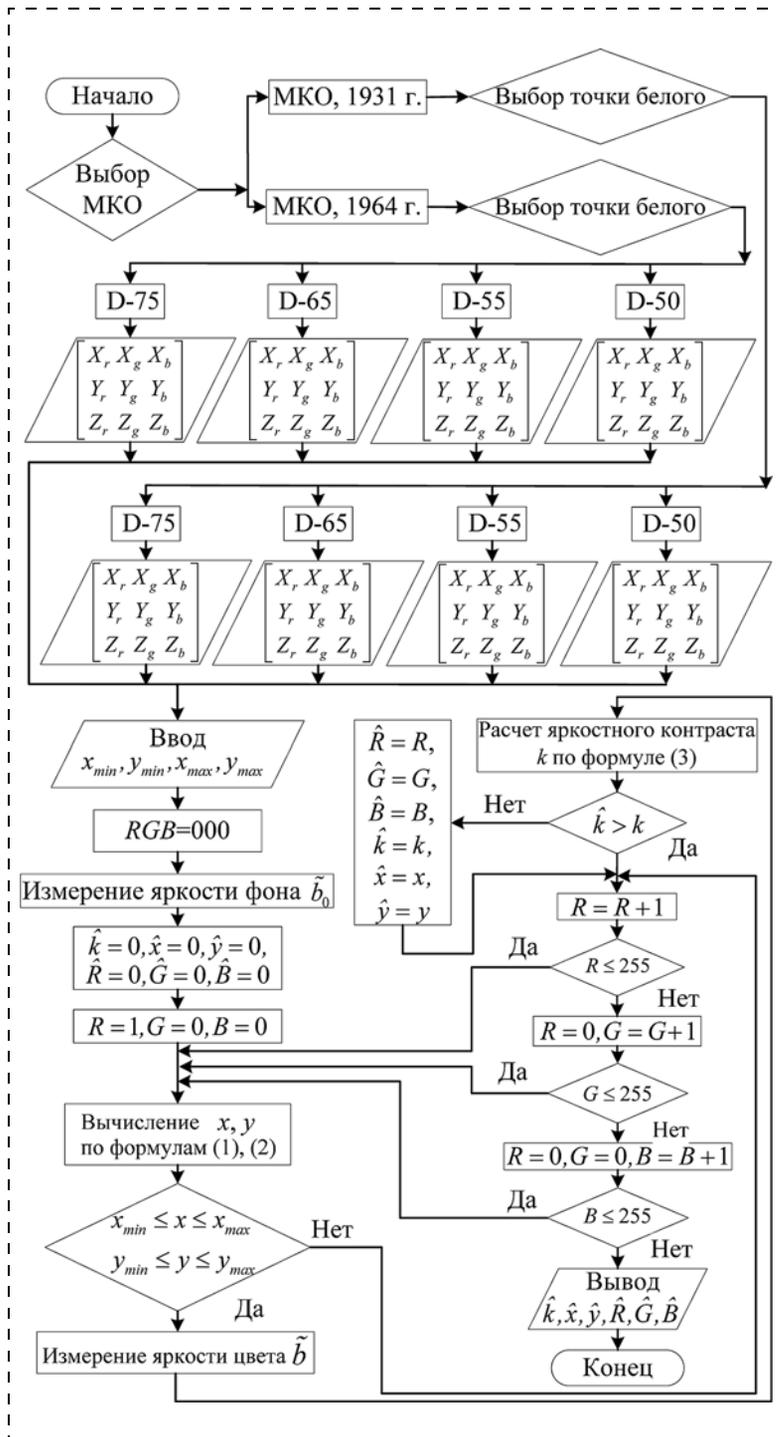


Рис. 6. Алгоритм поиска глобального максимума двумерной поверхности распределения контраста изображения в одном цвете

множестве точек отдельно. Расчеты и измерения осуществляются непосредственно в основном цикле алгоритма автоматизированным способом и только для тех точек XU -плоскости, которые оказываются внутри граничных условий. Объединение процедур позволяет оператору существенно сократить время (трудоемкость) поиска оценок значений координат цветности, обладающих наилучшими визуальными характеристиками восприятия для человека.

4. Результаты оценки значений координат цветности для цветовой палитры МФЦИ

Для определения компонентов кода *RGB* цветов, используемых при индикации пилотажно-навигационных параметров и геоинформационных данных во всех режимах эксплуатации аппаратуры, была проведена серия экспериментов с участием САПР АРМ МФЦИ. Оценке подлежала цветовая палитра, используемая в составе МФЦИ, и возможности МФЦИ для отображения палитры. На МФЦИ отображались фрагменты рабочих кадров изображений [19], формируемых в режиме имитации работы пилотажно-навигационного комплекса. Цветовая палитра соответствовала требованиям руководства 25-11А по сертификации систем электронной индикации самолетов.

Как показали эксперименты, МФЦИ в режиме индикации, предложенной первоначально разработчиками и соответствующей руководству 25-11А цветовой палитры, не отвечает требованиям НТД, ГОСТ к средствам отображения информации по значению яркостного контраста. С целью определить значения кодов компонентов *RGB* цветов, устойчивых к уровню внешней засветки изображения на ЖК экране, с участием авторов была разработана специализированная программа для модификации кодов *RGB* в цветовой палитре, заносимых в ПЗУ цветов графического контролера (см. рис. 1) на АРМ.

Уникальные коды *RGB* цветов, соответствующие требованиям НТД по значению яркостного контраста и полученные в результате серии экспериментов, впоследствии были преобразованы как $RGB \rightarrow XYZ \rightarrow (x, y)$ -координаты цветности и сформировали палитру, внедренную сегодня в изделиях МФЦИ.

Результаты преобразований $RGB \rightarrow XYZ \rightarrow (x, y)$ приведены на рис. 7 (см. третью сторону обложки) отдельно для цветов, используемых для отображения значений пилотажно-навигационных параметров (рис. 7, а), и цветов, используемых для отображения геоинформационных данных (рис. 7, б). В общем случае это две различных цветовой палитры, так как цвета, используемые в режиме совмещения изображения не должны сливаться на одном средстве индикации. Штриховой линией на рис. 7 выделена видимая человеческим глазом часть цветов и оттенков на XY -плоскости.

Заключение

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией координаты цветности цветовой палитры являются специфическими для каждого вида отображаемой в авионике информации:

- пилотажно-навигационных параметров;
- картографической (геоинформационной) информации;
- метеорадиолокационной информации и т. д.

Вместе с тем, известно, что МФЦИ работает в режимах индикации, предполагающих совмещение

(одновременное отображение) индикационных кадров, содержащих информацию разных видов: навигационную и картографическую, навигационную и метеорадиолокационную и т. д. В этом случае фоном изображения будет не черный или серый цвет, как это принято в авиационной промышленности, а цвет изображения, на фоне которого осуществляется вывод информации. В частности, в режиме "навигация и картография" пилотажно-навигационные параметры индицируются на фоне "подложки" — цифровой цветной карты местности, смещающейся на экране МФЦИ в соответствии с движением летательного аппарата.

Таким образом, проблема выбора компонентов цветов цветовой палитры, устойчивой для восприятия человеком, должна решаться путем анализа измерений яркости (оценки яркостного контраста) элементов изображения, выводимых на фоне всех возможных цветов цветовой палитры МФЦИ, которые могут быть задействованы в качестве фоновой "подложки" изображения.

Кроме того, в результате проведенных экспериментов замечено, что ЖК экранам, выполненным на базе газоразрядных ламп подсвета, свойственно постепенное увеличение яркости изображения из-за разогрева инертного газа, возникающего как под воздействием напряжения поджига, формируемого инвертором, так и под воздействием собственной теплоты от работы ламп в конструктиве ЖК экрана конечного объема. Рост яркости в течение первых 10...15 мин работы составляет [20] до 30...40 % от уровня яркости по включению.

В связи с этим измерение яркости элементов изображения, выводимых на экран МФЦИ с газоразрядным подсветом, необходимо выполнять после достижения стационарного (по яркости свечения экрана) режима индикации параметров, не ранее, чем через 15...20 мин после начала работы изделия. В МФЦИ с ЖК экранами, выполненными на базе подсвета из светодиодов, данный эффект отсутствует. Яркость изображения таких МФЦИ также превосходит в несколько раз яркость изображения МФЦИ с газоразрядным подсветом ЖК экрана.

Список литературы

1. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: учеб. пособие // Информационно-управляющие системы. СПб: ГУАП, 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 индикаторы на плоских жидкокристаллических панелях: наукоемкие аппаратно-программные решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 3. С. 238—245.
4. **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.

5. **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.

6. **Парамонов П. П., Костишин М. О., Жаринов И. О., Нецаев В. А., Сударчиков С. А.** Принцип формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 136—142.

7. **Костишин М. О., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Нецаев В. А., Сулов В. Д.** Оценка точности визуализации местоположения объекта в геоинформационных системах и системах индикации навигационных комплексов пилотируемых летательных аппаратов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1. С. 87—93.

8. **Мартынюк М. В.** Оценка границ областей метамерии для набора светочувствительных приемников // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2012. № 20. С. 81—90.

9. **Хоруужий М. Д., Газеева И. В., Гусев В. П., Трубинова Т. А.** Оценка качества цветопередачи в системах визуализации цифровых изображений: учеб. пособие. СПб: Изд. СПбГУКиТ, 2010. 95 с.

10. **Бондаренко М. Ф., Шабанов-Кушнаренко С. Ю., Шабанов-Кушнаренко Ю. П.** Разработка системы кодирования цвета // Бионика интеллекта: научно-технический журнал. 2009. № 2. С. 13—23.

11. **Хоруужий М. Д.** Метод количественной оценки цветовых различий при восприятии цифровых изображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. № 1. 2008. С. 136—144.

12. **Парамонов П. П., Гатчин Ю. А., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Дейко М. С.** Принципы построения отраслевой сис-

темы автоматизированного проектирования в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6. С. 111—117.

13. **Сабо Ю. И., Жаринов И. О.** Критерий подобия проектных решений требованиям технического задания в авионике // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 3. С. 57—63.

14. **Гатчин Ю. А., Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Архитектура программного обеспечения автоматизированного рабочего места разработчика бортового авиационного оборудования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2. С. 140—141.

15. **Дейко М. С., Жаринов И. О.** Применение симплекс-метода и метода искусственного базиса при проектировании бортового приборного оборудования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 1. С. 124—129.

16. **Гайкович А. И.** Основы теории проектирования сложных технических систем. СПб: НИЦ "МОРИНТЕХ", 2001. 432 с.

17. **Janos Schanda.** Colorimetry Understanding the CIE System. Wiley-Interscience John Wiley & Sons, INC., Publication, 2007, 499 p.

18. **Агостон Ж.** Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 184 с.

19. **Парамонов П. П., Коновалов П. В., Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Уткин С. Б.** Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 165—167.

20. **Жданкин В.** Передовые технологии фирмы Sharp в изготовлении ЖК-дисплеев для различных применений // Современная электроника. 2006. № 1. С. 14—19.

Algorithm and Methodology for Automation of Estimation Procedure of Chromaticity Coordinates of Pixel Airborne Avionics Display

A. V. Shukalov, P. P. Paramonov, I. O. Zharinov, igor_rabota@pisem.net,
SPb Scientific Design Bureau "Electroavtomatca" n. a. P. A. Efimova,
198095, Saint Petersburg, Russian Federation,

O. O. Zharinov, Saint-Petersburg state university of aerospace equipment,
190000, Saint Petersburg, Russian Federation,

M. O. Kostishin, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, 197101, Saint Petersburg, Russian Federation

Date received: 19.05.2014

The authors discuss the design of modern on-board equipment for visualization of the air navigation parameters and geo-details (digital district map) with certain requirements to the quality of the visualized information to be displayed. This kind of quality may be characterized in terms of brightness contrast for each color displayed on the screen. In order to ensure stable readability of the image for a pilot, a special procedure should choose chromaticity the coordinates of the image elements. The problem is considered of the research of the avionics on-board indication equipment in order to determine the set of chromaticity coordinate values for the displayed image with the use of automated design tools, which would allow an enhanced visual perception of the image details in the presence of intense external illumination. Various color coding systems used in the on-board indication equipment based on liquid crystal panels (systems of RGB and XY formats) are examined. The calculation of the chromaticity coordinates was based on Maxwell's color mixing triangle by mutual transformations between the elements of XY-plane and decimal codes of RGB-palette, used in the software of the on-board indication equipment. The scheme workstation for the research is proposed, the main components of the developed automated design tools, installed as part of the workstation, are described. The experimental results containing the measures of the brightness levels and estimated brightness contrast values, which were obtained for the given set of colors, are presented. An algorithm for an automated search for a global maximum on the function of two variables, which represents brightness contrast distribution in the chromaticity coordinates plane, is proposed. The decision-making rule approving the use of RGB-codes is the case when the brightness contrast of the test image displayed in any predefined color exceeds two. The results of the research are the methodology and the algorithm of searching the chromaticity coordinate values, which ensure the maximal brightness contrast level and the corresponding values of chromaticity coordinates at the points of maximal contrast.

Keywords: display, avionics, luminance contrast, color coding system, the transformation of the Grassmann, optimization problem

For citation:

Shukalov A. V., Paramonov P. P., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O. Algorithm and Methodology for Automation of Estimation Procedure of Chromaticity Coordinates of Pixel Airborne Avionics Display, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 195–204.

DOI: 10.17587/mau.16.195-204

References

1. **Zharinov I. O., Zharinov O. O.** *Informacionno-upravljajushhie sistemy* (Information and Control Systems). SPb: GUAP, 2005. 144 p. (in Russian).
2. **Zharinov I. O., Emec R. B.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2003, no. 11, pp. 193–195 (in Russian).
3. **Paramonov P. P., Koporskiy N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2004, no. 3, pp. 238–245 (in Russian).
4. **Paramonov P. P., Il'chenko Ju. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Ju.** *Aviakosmicheskoe Priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 50–57. (in Russian).
5. **Paramonov P. P., Il'chenko Ju. A., Zharinov I. O.** *Datchiki i Sistemy*, 2001, no. 8, pp. 15–19 (in Russian).
6. **Paramonov P. P., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechaev V. A., Sudarchikov S. A.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 6, pp. 136–142 (in Russian).
7. **Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Nechaev V. A., Suslov V. D.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2014, no. 1, pp. 87–93 (in Russian).
8. **Martynjuk M. V.** *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseeva*, 2012, no. 20, pp. 81–90 (in Russian).
9. **Horunzhij M. D., Gazeeva I. V., Gusev V. P., Trubnikova T. A.** *Ocenka kachestva cvetoperedachi v sistemah vizualizacii cifrovyyh izobrazhenij: uchebnoe posobie* (Quality assessment of color in visualization systems digital imaging), Saint Petersburg, Izdatel'stvo SPbGUKiT, 2010, 95 p. (in Russian).
10. **Bondarenko M. F., Shabanov-Kushnarenko S. Ju., Shabanov-Kushnarenko Ju. P.** *Bionika Intellekta: Nauchno Tekhnicheskij Zhurnal*, 2009, no. 2, pp. 13–23 (in Russian).
11. **Horunzhij M. D.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2008, no. 1, pp. 136–144 (in Russian).
12. **Paramonov P. P., Gatchin Ju. A., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Dejko M. S.** *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki*, 2012, no. 6, pp. 111–117 (in Russian).
13. **Sabo Ju. I., Zharinov I. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2010, no. 3, pp. 57–63 (in Russian).
14. **Gatchin Ju. A., Zharinov I. O., Zharinov O. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2012, no. 2, pp. 140–141 (in Russian).
15. **Dejko M. S., Zharinov I. O.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 1, pp. 124–129 (in Russian).
16. **Gajkovich A. I.** *Osnovy teorii proektirovaniya slozhnyh tekhnicheskikh system* (Fundamentals of the theory of the design of complex technical systems), Saint Petersburg, NIC "MORINTEH", 2001, 432 p. (in Russian).
17. **Janos Schanda.** *Colorimetry Understanding the CIE System*. Wiley-Interscience John Wiley & Sons, INC., Publication, 2007, 499 p.
18. **Agoston Zh.** *Teoriya cveta i ee primenenie v iskusstve i dizajne*: Per. s angl, Moscow, Mir, 1982, 184 p. (in Russian).
19. **Paramonov P. P., Konovalov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Ju. A., Utkin S. B.** *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 2, pp. 165–167 (in Russian).
20. **Zhdankin V.** *Sovremennaja Jelektronika*, 2006, no. 1, pp. 14–19 (in Russian).

Corresponding author:

Zharinov Igor O., chef of learning-scientists center, Dr. Techn. Sci, Assistance of Professor, SPb Scientific Design Bureau "Electroavtomatika" n. a. P. A. Efimova, 198095, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: igor_rabota@pisem.net

УДК 626.02.008

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, зав. лаб., filaret@pma.ru,

А. Ю. Коноплин, ассистент, kayur-prim@mail.ru,

Н. Ю. Коноплин, лаборант, konoplin.nikita@gmail.com

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,

Дальневосточный федеральный университет

Метод синтеза систем автоматической коррекции линейных перемещений подводных аппаратов¹

Обсуждается метод синтеза системы автоматической коррекции линейных перемещений подводного аппарата. Предложенная система при нежелательных отличных от нуля значениях углов его крена и дифферента, вызванных внешними силовыми и моментными воздействиями, автоматически изменяя тяги соответствующих движителей в зависимости от текущих значений указанных углов, неизменно обеспечивает высокоточное перемещение этого аппарата в заданном направлении. Кроме того, система позволяет устранить смещения подводного аппарата от заданной пространственной траектории, вызванные его несимметричностью, а также различными значениями присоединенных масс жидкости и коэффициентов вязкого трения при движении этого аппарата по разным степеням свободы.

Представлены результаты моделирования, подтверждающие высокую эффективность функционирования синтезированной комплексной системы управления, которая имеет простую практическую реализацию и не требует установки на подводный аппарат дополнительного оборудования и навигационных комплексов.

Ключевые слова: подводный аппарат, система управления, автоматическая коррекция, линейные перемещения, доплеровский лаг

¹ Работа проводилась при финансовой поддержке Научного фонда ДВФУ (соглашение № 13-06-0112-м а), Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственное задание 1141), а также РФФИ (грант 13-07-00741).