

УДК 691.397

О. В. ГОФАЙЗЕН

Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова

В. В. ПИЛЯВСКИЙ

Украинский научно-исследовательский институт радио и телевидения

**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ГРАНИЦ ОБЛАСТИ ЦВЕТОВ
В РАВНОКОНТРАСТНОМ ЦВЕТОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ,
ПЕРЕДАВАЕМЫХ И ВОСПРОИЗВОДИМЫХ ТВ СИСТЕМАМИ**

Аннотация. Представлен метод построения области цветов, передаваемых и воспроизводимых ТВ системами и другими видеоприложениями, построенными на основе использования аддитивной колориметрии.

Ключевые слова: видеоприложение, область передаваемых цветов, равноконтрастное цветовое пространство, ТВ колориметрия, ТВ системы, CIECAM02, CAM02-USC

OLEG VICTOROVICH GOFÄIZEN

Odessa National Academy of Telecommunications named after O. S. Popov

VLADIMIR VASILEVICH PILYAVSKIY

Ukrainian Research Institute of Radio and TV

**THE METHOD OF DETERMINATION BOUNDARIES OF COLOR GAMUT TRANSMITTED
AND REPRODUCED BY TV AND OTHER IMAGING SYSTEMS IN UNIFORM COLOR SPACE**

Abstract – A method of definition color gamut, transmitted and reproduced by TV systems and by other video applications, built on the basis of use of the additive colorimetry.

Keywords: video applications, color gamut transmitted, uniform color space, TV colorimetry, TV systems, CIECAM02, CAM02-USC

Область цветов, которые могут быть переданы ТВ системой, является одним из основных показателей уровня совершенства этой системы, поскольку она характеризует способность системы передавать изображения реального мира. Поэтому интерес к этой характеристике будет проявляться всегда, когда будет приниматься техническое решение, которое может повлиять на область передаваемых цветов.

Отсюда следует, что было бы желательно располагать алгоритмом определения области передаваемых цветов, доступным для специалистов.

Следует иметь в виду, что эти пространство сигналов красного, зелёного и синего основных цветов RGB, и колориметрическое пространство XYZ МКО-31, наиболее широко используемые для цветовых расчётов, не являются евклидовыми по отношению к человеческому цветовосприятию. Равные расстояния между точками цветов в этих пространствах не соответствуют равным цветовым различиям.

Поэтому для того, чтобы корректно количественно судить о размерах области цветов, которая может быть передана телевизионной системой, необходимо использовать представление цветов точками равноконтрастного цветового пространства, в котором равные расстояния между точками цветов соответствуют равным цветовым различиям во всём цветовом пространстве. Такое представление может быть реализовано в при условии использования современных моделей цветовосприятия, среди которых наиболее совершенной можно считать модель CIECAM02 [1, 2] с учётом её дальнейшего усовершенствования в виде модели CAM02-USC, предложенной Люо и др. [3].

В настоящем документе дано описание метода построения области цветов, которые могут быть переданы телевизионной системой, с представлением границ этой области на плоскости координат a'_M, b'_M зелено-пурпурной и сине-жёлтой оппонентных осей пространства CAM02-USC.

Для построения области цветов, которые могут быть переданы ТВ системой, исходными являются параметры, определяющие колориметрию ТВ системы, а именно координаты цветности основных цветов и координаты опорного белого.

Для представления области передаваемых цветов в равноконтрастном цветовом пространстве необходимо задать следующие данные, характеризующие адаптационные свойства модели цветовосприятия:

- яркость адаптации L_A в кд/м^2 , которую обычно принимают равной $L_A = 0,2L_{DW}$, где L_{DW} – яркость опорного белого в воспроизводимом изображении;

- условия окружения (среднее, тусклое или тёмное), которые определяются соотношением яркостей окружающего фона L_{SW} , цвет которого принимается соответствующим опорному белому, и белого цвета L_{DW} на оцениваемом изображении;

- выбор варианта модели среди предложенных в работе [3], соответствующего малым (CAM02-SCD), большим (CAM02-LCD) цветовым различиям и комбинации малых и больших (CAM02-USC), рассчитанной на универсальный случай. Для вещательных телевизионных и родственных им приложений можно считать предпочтительным выбор модели CAM02-USC.

Построение области передаваемых цветов в равноконтрастном цветовом пространстве можно представить состоящим из следующих этапов:

- задание координат цветности основных цветов и опорного белого системы, а также уровня относительной яркости Y , для которых определяются границы области передаваемых цветов;
- задание параметров модели равноконтрастного цветового пространства: яркости адаптации L_A , условий окружения; выбор варианта модели CAM02-UCS;
- определение яркостных коэффициентов основных цветов L_R, L_G, L_B ;
- построение уравнений пограничных прямых на плоскости координат цветности r, g, b пространства сигналов R, G, B , являющихся границами области передаваемых цветов для заданной относительной яркости Y ;
- преобразование уравнений пограничных прямых в пространстве R, G, B в уравнения пограничных прямых в пространстве X, Y, Z в функции координат цветности этого пространства x, y, z для области цветов, определяемой соотношением относительной яркости Y и яркостных коэффициентов основных цветов L_R, L_G, L_B ;
- определение границ области передаваемых цветов, являющейся объединением сторон сечения цветового треугольника и пограничной прямой для заданных уровней относительной яркости в функции координат цветности x, y, z ;
- определение границ области передаваемых цветов в равноконтрастном пространстве CAM02-UCS с использованием моделей CIECAM02 и CAM02-USC.

Ниже описаны отдельные этапы этих преобразований.

Пограничные прямые области передаваемых цветов в системе координат цветности r, g, b определяются в соответствии с уравнениями [4, 5]:

$$b \leq \frac{(L_R - L_G) \cdot r + L_G}{Y + (L_G - L_B)}; \quad r \leq \frac{(L_B - L_G) \cdot b + L_G}{Y + (L_G - L_B)}; \quad g \leq \frac{(L_R - L_B) \cdot r + L_B}{Y + (L_B - L_G)}.$$

Переход в пространство X, Y, Z осуществляется для заданного Y путём преобразования координат точек пограничных линий, представленных в координатах r, g, b , в представление в координатах x, y, z в соответствии с SMPTE RP.177 [6], которое сводится к следующему.

Исходными являются относительная яркость Y и координаты цветности r, g, b заданного цвета.

Задаём матрицу координат цветности основных цветов и вектор координат цветности опорного белого:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} x_W / y_W \\ 1 \\ z_W / y_W \end{bmatrix}.$$

Находим матрицу преобразования:

$$\mathbf{NPM} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} = \mathbf{P} \cdot \text{diag}(\mathbf{P}^{-1} \cdot \bar{\mathbf{w}}),$$

элементы которой являются абсолютными координатами основных цветов.

Осуществляем переход в пространство X, Y, Z :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{NPM}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

Здесь:

$$R = Y \frac{r}{L_R r + L_G g + L_B b}; \quad G = Y \frac{g}{L_R r + L_G g + L_B b}; \quad B = Y \frac{b}{L_R r + L_G g + L_B b}$$

– уровни сигналов основных цветов, нормированные к единичному уровню;

$$L_R = Y_R; \quad L_G = Y_G; \quad L_B = Y_B$$

– яркостные коэффициенты основных цветов (2-я строка матрицы \mathbf{NPM}).

Определяем координаты цветности в пространстве X, Y, Z :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}; \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Пограничные прямые, характеризующие ограничение области передаваемых цветов со стороны вершин R, G, B треугольника основных цветов в системе ТВЧ для уровней относительной яркости, равных

$Y = 0,01; 0,1; 0,2; \dots 0,8; 0,9$, представлены на рис. 1–3.

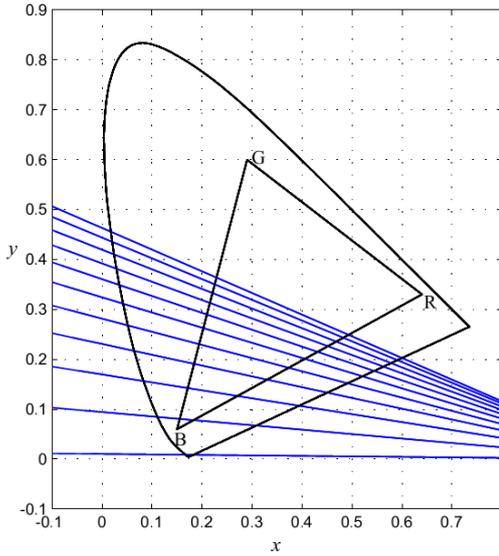


Рис. 1. Пограничные прямые, ограничивающие область синего

На рисунках 4–6 представлены примеры построения границ области передаваемых цветов, иллюстрирующие, с одной стороны, принцип построения области передаваемых цветов, с другой стороны, трудности формализации построения этой области.

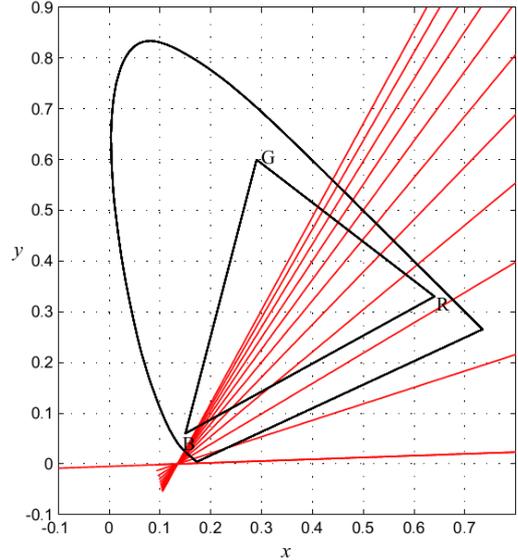


Рис. 2. Пограничные прямые, ограничивающие область красного

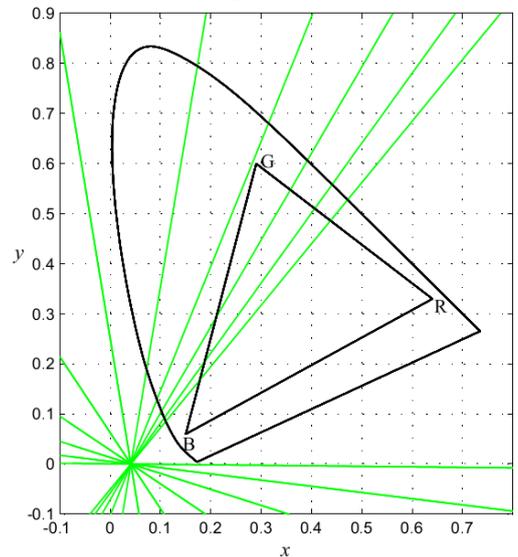


Рис. 3. Пограничные прямые, ограничивающие область зелёного

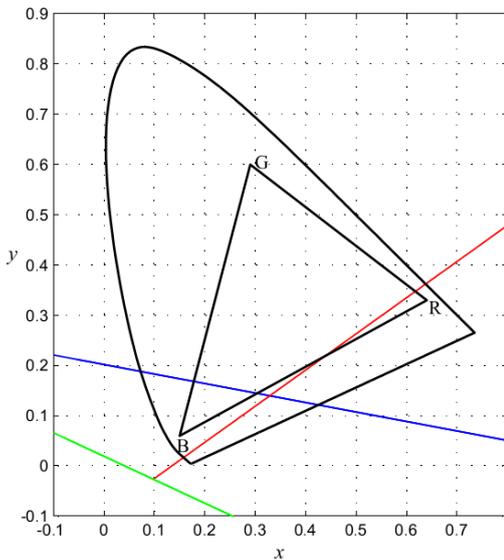


Рис. 4. Пограничные прямые, ограничивающие области красного, зелёного и синего для относительной яркости $Y = 0,25$

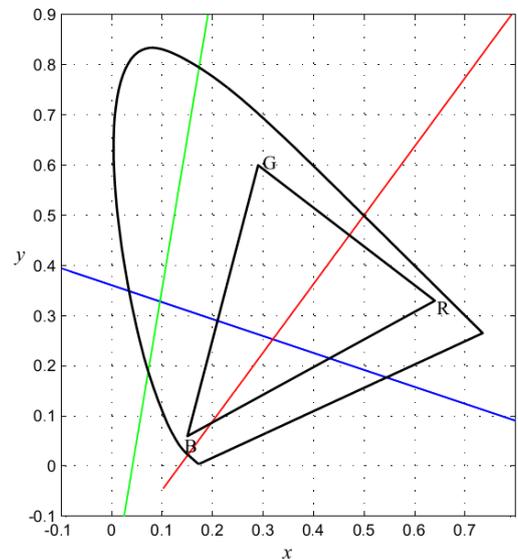


Рис. 5. Пограничные прямые, ограничивающие область красного, зелёного и синего для относительной яркости $Y = 0,6$

Определение области передаваемых цветов для заданной относительной яркости Y может быть осуществлено для двух случаев, когда треугольник основных цветов находится внутри диаграммы цветности или охватывает ее. Оба случая с точки зрения определения границ этой области равнозначны.

После того, как определены пограничные линии, задача определения области передаваемых цветов сводится к тому, чтобы построить границы области в виде кривой, объединяющей участок диаграммы цветности или треугольника основных цветов, включающий точку опорного белого, и участок пограничной линии. Это может быть реализовано в различных вычислительных средах. Например, в среде MATLAB граница области может быть представлена и графически отображена как граница многоугольника, вершинами которого являются точки монохроматических цветов и точки пограничной кривой. На рисунках 7–9 представлены этапы построения области передаваемых цветов в виде последовательной реализации ограничений со стороны вершин R, G, B .

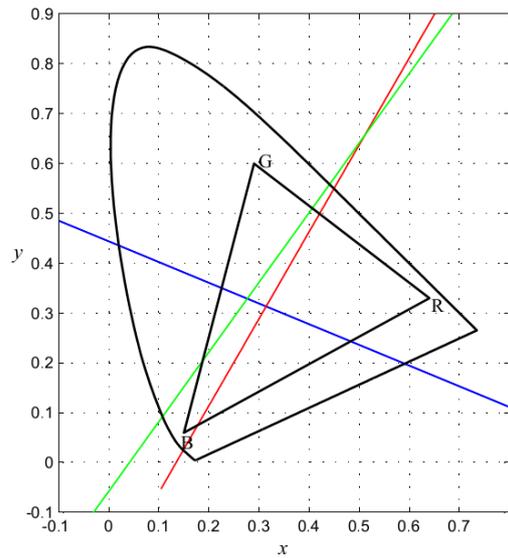


Рис. 6. Пограничные прямые, ограничивающие область красного, зелёного и синего при относительной яркости стимула $Y = 0,9$

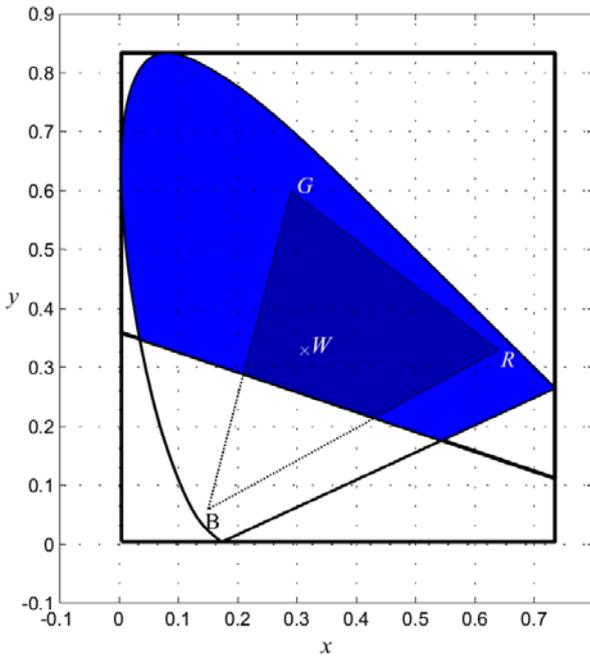


Рис. 7. Ограничение области синего для $Y = 0,6$

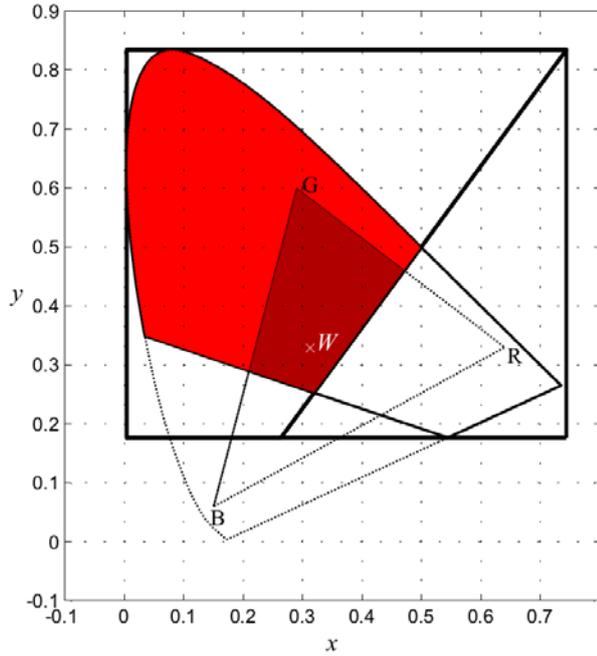


Рис. 8. Ограничение области красного для $Y = 0,6$

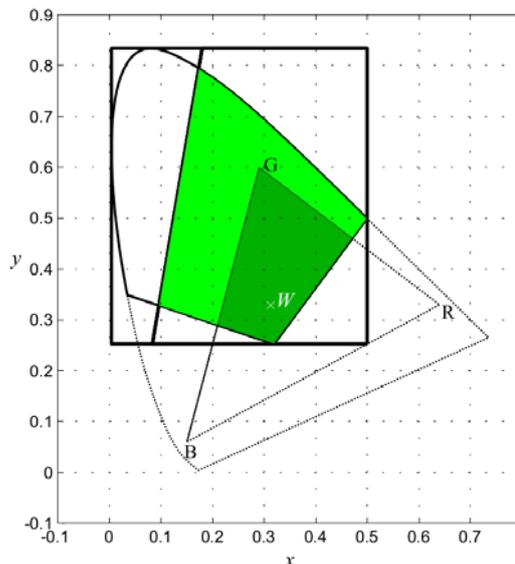


Рис. 9. Ограничение области зеленого для $Y = 0,6$

Завершающим этапом преобразования является переход от координат Y, x, y пространства X, Y, Z к координатам светлоты и цветности J', a'_M, b'_M пространства CIECAM02. Пример области передаваемых цветов представлен на рисунках 10.

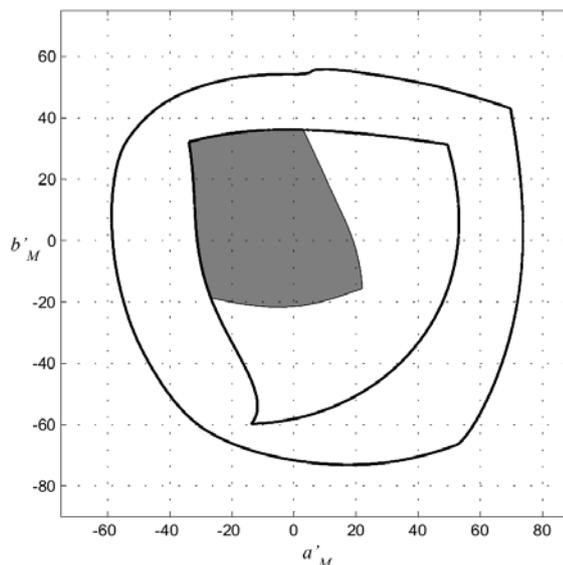


Рис. 10. Представление в координатах CAM02-UCS для яркости адаптации наблюдателя $L_A = 20$ кд/м²: кривой спектральных и пурпурных цветов, треугольника основных цветов системы телевидения высокой чёткости и области цветов, которые могут быть воспроизведены при относительной яркости $Y = 0,6$

Вывод: Представленный метод определения границ области цветов, передаваемых ТВ системами с учётом ограничения диапазона изменения сигналов основных цветов и ограниченной их максимальной яркости исходя из условия получения равносигнального опорного белого цвета, применим к любым видеоприложениям, основанным на реализации аддитивной колориметрии.

Этот метод использован при построении границ области передаваемых цветов в документах [4,7–9], в которых представлены соответствующие оценки применительно к системам ТСЧ, ТВЧ, ТСВЧ, цифрового кино и ряда мультимедийных приложений.

Представление области передаваемых цветов в равноконтрастном цветовом пространстве является крайне полезным, поскольку оно позволяет судить о реальном выигрыше в части совершенства ТВ систем и родственных видеоприложений с непосредственным учётом свойств цветовосприятия человека в заданных условиях.

Литература

1. CIE 159:2004 Technical Report. A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02
2. Mark D. Fairchild Color Appearance Models – Second Edition, Wiley-IS&T series in imaging science and technologies, 2005
3. M. Ronnier Luo, Guihua Cui, Changjun Li Uniform Colour Spaces based on CIECAM02 Colour Appearance Model – Colour Research and Application, Volume 31, Issue 4, May 2005
4. Ukraine. Range of colors transmitted and reproduced by TV system. Document 6C/74, October 2012
5. Гофайзен О.В. Область кольорів, передаваних системами цифрового телебачення / Гофайзен О.В., Пилявський В.В. // Цифрові технології. – 2012. – №11. – С.47–70
6. SMPTE RP 177–1993(R1997) derivation of basic television color equations
7. Ukraine. Colorimetric characteristics of new video applications: Digital cinema and digital TV systems matching. Document 6C/165. April 2013
8. Ukraine. Some colour spaces for use in different industries and colour spaces of digital TV systems matching.. Document 6C/166. April 2013
9. Ukraine. Use of multi-primary reproduction of TV images produced by SDTV, HDTV and UHD TV systems. Document 6C/167. April 2013

References

1. CIE 159:2004 Technical Report. A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02
2. Mark D. Fairchild Color Appearance Models – Second Edition, Wiley-IS&T series in imaging science and technologies, 2005
3. M. Ronnier Luo, Guihua Cui, Changjun Li Uniform Colour Spaces based on CIECAM02 Colour Appearance Model – Colour Research and Application, Volume 31, Issue 4, May 2005

4. Ukraine. Range of colors transmitted and reproduced by TV system. Document 6C/74, October 2012
5. Gofaizen O.V., Pilyavskiy V.V. Color gamut transmitted by digital television systems / Digital Technologies. – 2012. – No. 11. – Pp. 47– 70
6. SMPTE RP 177–1993(R1997) derivation of basic television color equations
7. Ukraine. Colorimetric characteristics of new video applications: Digital cinema and digital TV systems matching. Document 6C/165. April 2013
8. Ukraine. Some colour spaces for use in different industries and colour spaces of digital TV systems matching.. Document 6C/166. April 2013
9. Ukraine. Use of multi-primary reproduction of TV images produced by SDTV, HDTV and UHDTV systems. Document 6C/167. April 2013

Рецензія/Peer review : 19.10.2013 р.

Надрукована/Printed :31.10.2013 р.

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради
Хмельницького національного університету,
протокол № 2 від 30.10.2013 р.**

Підп. до друку 1.11.2013 р. Ум.друк.арк. 19,34 Обл.-вид.арк. 18,5
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. № 337/11

Тиражування здійснено редакційно-видавничим центром
Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63