

УДК 535.645.646

### Анализ систем МКО

1. Ложкин Леонид Дидимович

Доктор технических наук, профессор кафедры Основы конструирования и технологий радиотехнических систем. Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Россия, г. Самара

2. Кузьменко Александр Александрович

Магистрант. Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Россия, г. Самара

Со временем развития цветного телевидения было разработано достаточно большое количество различных систем цветных пространств с координатами для измерения цвета, такие как RGB, XYZ (МКО-31), МКО 1960 (u, v), МКО LAB(u\*, v\*), LAB(a\*, b\*) и так далее, но в чём причина такого разнообразия цветных пространств, в чём же отличия и к чему стремятся учёные создавая такое разнообразие цветных пространств. В данной статье рассмотрены основные колориметрические системы цветных пространств МКО используемые в телевидении, переходы между пространствами, а также достоинства и недостатки той или иной системы. Также представлен сравнительный анализ этих цветных пространств и выбрана наиболее равноконтрастная цветовое пространства, основываясь на сравнении эллиптичности эллипсов Мак Адама в различных цветных пространствах.

**Ключевые слова:** цветное пространство, системы МКО, порог цветоразличения, эллипсы Мак Адама.

### Analysis of CIE systems

1. Lozhkyn Leonid Didimovich

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Fundamentals of the design and technology of radio engineering systems. Volga Region State University of Telecommunications and Informatics, Russia, Samara

2. Kuzmenko Alexander Alexandrovich

Magistrant. Volga Region State University of Telecommunications and Informatics, Russia, Samara

With the development of color television, a large number of different color space systems with coordinates for color measurement have been developed, such as RGB, XYZ (MCE-31), MCO 1960 (u, v), MAB LAB (u \*, v \*), LAB (A \*, b \*) and so on, but what is the reason for such a variety of color spaces, what are the differences and what do scientists seek to create such a variety of color spaces. In this article, the main colorimetric systems of color spaces of MCEs used in television, transitions between spaces, as well as advantages and disadvantages of this or that system are considered. A comparative analysis of these color spaces is also presented, and the most equi-contrast color space is chosen, based on comparing ellipticity of MacAdam ellipses Different color spaces.

**Keywords:** color space, CIE system, the threshold of color identification, ellipses of Mac Adam.

### Система координат RGB (МКО-31)

Данная система координат является исходной точкой построения других колориметрических систем цветных пространств и использует реально существующие цвета, а именно R (Red) – красный, G (Green) – зелёный, B (Blue) – синий.

Данная система построена на кривых смешения цветов RGB, экспериментально полученной в 1931 году двумя независимыми учеными Райтом (США) и Гилдом (Англия)[3]. Их экспериментальные данные были в хорошем согласовании и как следствие их удалось усреднить и интерпретировать как кривые сложения цветов для стандартного наблюдателя. Кривые полученные Райтом и Гилдом обозначаются как  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$ . На рисунке 1 представлены кривые смешения RGB:

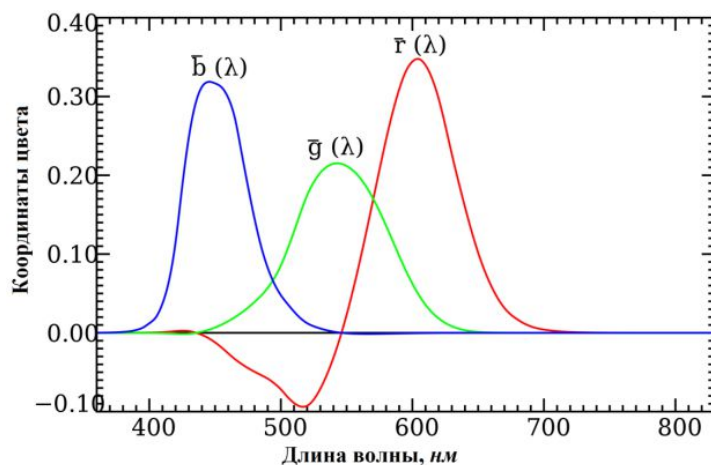


Рисунок 1. Кривые сложения цветов RGB систем координат при  $R=700\text{нм}$ ,  $G=546.1\text{нм}$ ,  $B=435.8\text{нм}$  по Райтеру и Гилду[3].

Недостатком данной системы было то, что у кривой сложения красного было отрицательное значение координаты цвета, это видно из рисунка 1 в диапазоне длины волны  $435.8\text{нм}-546.1\text{нм}$ . Также данная система не охватывает спектральные и пурпурные цвета.

### Система координат XYZ МКО-1931

Данная система координат была введена для того, чтобы избежать отрицательных значений кривых сложений. Для этого кривые сложения RGB были подвергнуты линейному математическому преобразованию, в результате чего были получены новые кривые сложения  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ . Данные кривые получили название кривые сложения цветов стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931г. и представлена на рисунке 2:

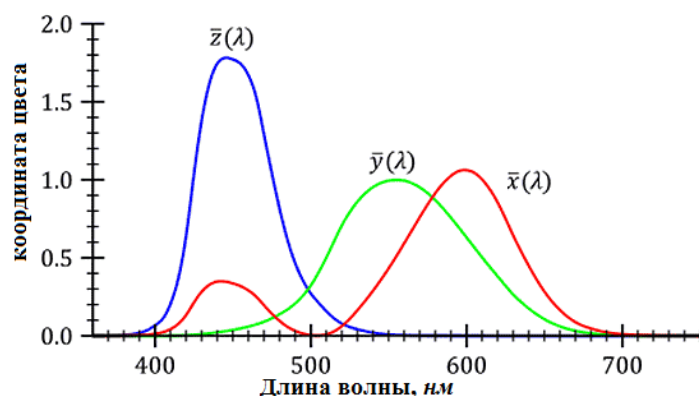


Рисунок 2. Кривые сложения  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  МКО 1931[1].

Цвета X, Y, Z в отличие от R, G, B реально не существуют и играют лишь вспомогательную математическую роль.

Переход от основных цветов RGB к XYZ происходит в соответствии с рекомендацией МКО по следующим формулам[5]:

$$\begin{aligned} X &= 0.49000R + 0.31000G + 0.20000B, \\ Y &= 0.17697R + 0.81240G + 0.01063B, \\ Z &= 0.00000R + 0.01000G + 0.99000B. \end{aligned} \quad (1)$$

Или используя матрицы:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.49000 & 0.31000 & 0.20000 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00000 & 0.01000 & 0.99000 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2)$$

где R, G, B – это основные цвета с длинами волн R=700нм, G=546.1нм, B=435.8нм[3].

Вычисления в данной системе координат производятся путём измерения интенсивности света в зависимости от длины волны  $\lambda$  во всем видимом участке спектра  $\Phi(\lambda)$ , после чего производятся вычисление интегралов по формулам[2]:

$$\begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) \cdot k(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y &= \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) \cdot k(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) \cdot k(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (3)$$

В реальности интегрирование заменяют сложением с шагом  $\Delta\lambda$ :

$$\begin{aligned} X &= \sum_{380}^{780} \Phi(\lambda) \cdot k(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \\ Y &= \sum_{380}^{780} \Phi(\lambda) \cdot k(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \\ Z &= \sum_{380}^{780} \Phi(\lambda) \cdot k(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot \Delta\lambda. \end{aligned} \quad (4)$$

Далее находится модуль цвета  $M=X+Y+Z$  после чего координаты цветности определяются как:

$$x = \frac{X}{M}, \quad y = \frac{Y}{M}, \quad z = \frac{Z}{M} \quad (5)$$

При этом получается следующее соотношение:

$$x + y + z = 1 \quad (6)$$

График цветностей системы МКО XYZ 1931 представляет собой прямоугольный треугольник, катеты которого координаты  $x$  и  $y$ , а гипотенуза  $z$ , но т.к. координату  $z$  можно вычислить по формуле (6), то ей обычно пренебрегают. Также на график наносится линия спектральных и пурпурных цветов, что представляет собой охват цветного человеческого зрения[2]. На рисунке 3 изображена система МКО 1931:

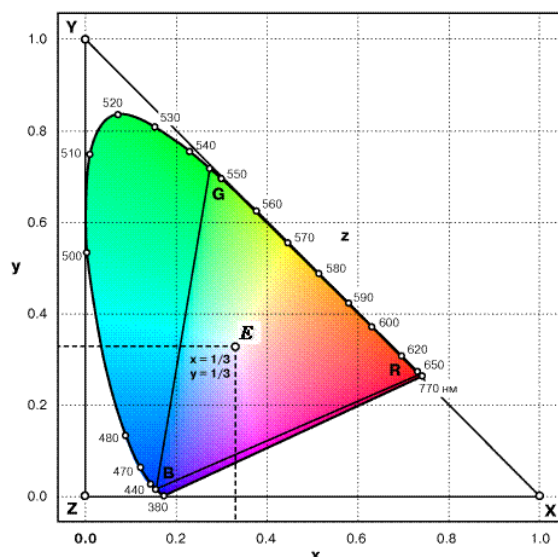


Рисунок 3. График цветностей XYZ МКО 1931г.

Недостатком системы XYZ МКО 1931г. является то, что в диапазоне длин волн от 380нм до 460нм значения функции сложения цветов были слишком малыми, вследствие чего МКО приняла решение повторить эксперименты Райта и Гилда.

### Система координат МКО-1960

Новые кривые сложения были найдены на основе многократных опытов, которые были проведены Стайлсом и Берчем (Англия), Сперанской (СССР). Опыт, проведённый ими, отличался от опыта 1931г. тем, что угол зрения при уравнивании цветов был не  $2^\circ$ , а  $10^\circ$ [2].

Данные полученные в ходе экспериментов были хорошо коррелированы со старыми, отсюда и было принято решение использовать обе системы. При этом МКО рекомендовало кривые 1931г. к использованию при оценивании небольших по размеру цветовых образов, а кривые 1960г. при оценивании больших по размеру цветовых образов.

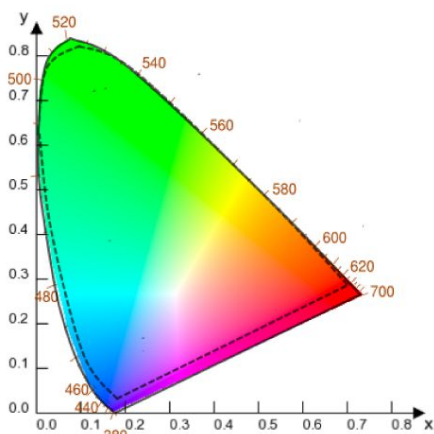


Рисунок 4. Цветовой locus системы стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931г. и 1960г. (пунктир).

Существенным недостатком цветового пространства XYZ МКО являлось то, что одинаковым изменениям координат цвета не соответствует равнозначные изменения цветовых ощущений, т.е. ощущения при изменении координат между двумя соседними точками в одной области цветового пространства будут более заметны, чем при изменении координат в другой области цветового пространства. Данный недостаток выявился в ходе экспериментов Мак Адама, в ходе которых он четко показал, что изменения координат цвета по ощущению наблюдателя различны для различных областей и имеют форму эллипса, а не круга. Данные эллипсы получили название эллипсы Мак Адама и представлены на рисунке 5 в системе XYZ МКО 1931. Из-за этого недостатка ученые начали разработку равноконтрастных цветовых систем.

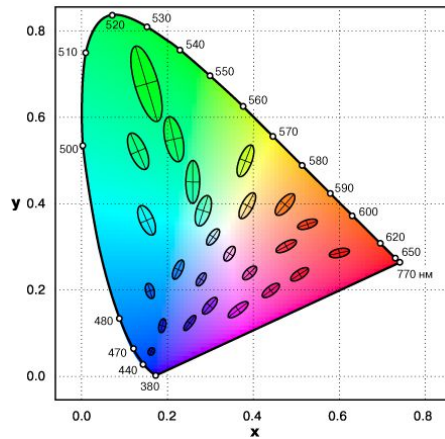


Рисунок 5. Эллипсы Мак Адама, на графике МКО(x,y) 1931г. (для наглядности эллипсы увеличены в 10 раз).

### Система МКО 1960 (u,v)

Из-за недостатка цветового пространства МКО(x, y)-1931 были начаты поиски решений для устранения данного недостатка. Впоследствии было выяснено, что избежать этого невозможно, а лишь свести их к минимуму.

В ходе многочисленных дискуссий МКО в 1960 году временно утвердило равноконтрастный цветовой график разработанный Мак Адамом и получившим название МКО 1960 (u, v).

Переход от координат МКО(x, y) к МКО (u, v) производился по следующим формулам[1]:

$$u = \frac{4 \cdot x}{x + 15 \cdot y + 3 \cdot z}, \quad v = \frac{6 \cdot y}{x + 15 \cdot y + 3 \cdot z}. \quad (7)$$

На рисунке 6 представлена полученная система с нанесёнными эллипсами Мак Адама:

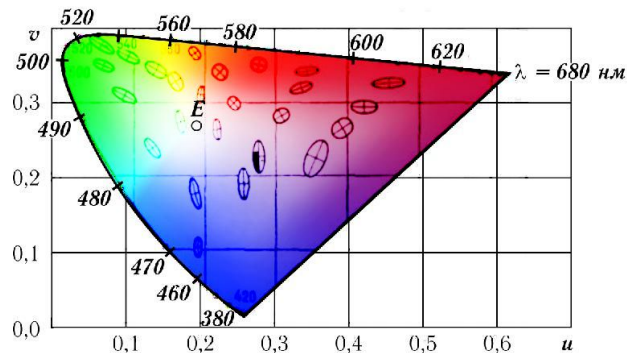


Рисунок 6. Система МКО (u, v) 1960 года с эллипсами Мак Адама

Как видно из рисунка данная система также не была лишена недостатков так, желтые, оранжевые и красные линии были заметней сжатей по сравнению с другими.

### Система МКО 1964 (u', v')

Из-за недостатков системы МКО(u, v) она была подвергнута модификации введением новых координат u' и v'. Перерасчёт был осуществлен по следующим формулам:

$$u' = \frac{4 \cdot x}{x + 15 \cdot y + 3 \cdot z}, \quad v' = \frac{9 \cdot y}{x + 15 \cdot y + 3 \cdot z}. \quad (8)$$

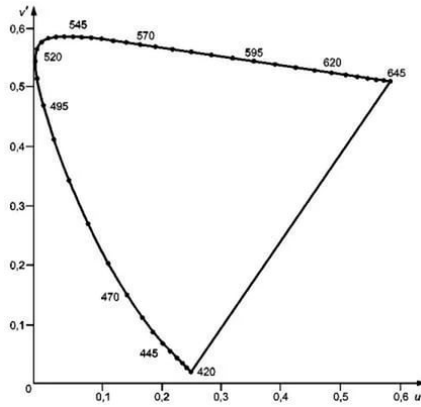


Рисунок 7 Цветовое пространство МКО ( $u'$ ,  $v'$ )

В связи с тем, что цветовое пространство МКО ( $u'$ ,  $v'$ ) не полностью решила данную проблему, было решено подвергнуть её дальнейшей доработки.

### Система МКО LAB( $u^*$ , $v^*$ ) и LAB( $a^*$ , $b^*$ )

В 1960 году МКО приняла решение о расширении системы МКО ( $u'$ ,  $v'$ ) до трёхмерного цветового пространства. Для этого была введена новая координата  $W^*$ .

Перерасчёты были произведены по следующим формулам:

$$\begin{aligned} W^* &= 25 \cdot \sqrt[3]{y} - 17, \\ U^* &= 13 \cdot W \cdot (u - u_0), \\ V^* &= 13 \cdot W \cdot (v - v_0). \end{aligned} \quad (9)$$

где  $u_0$  и  $v_0$  – цветности опорного белого света и  $1 \leq Y \leq 100$ .

Полученное цветовое пространство было равноконтрастным и стало называться МКО LABUV ( $W^*U^*V^*$ ), но уже в 1976 году было предложено две её модификации[4]:

$$\begin{aligned} L^* &= 25 \cdot \sqrt[3]{\frac{100 \cdot Y}{Y_0}} - 16, \\ u^* &= 13 \cdot L^* \cdot (u' - u'_0), \\ v^* &= 13 \cdot L^* \cdot (v' - v'_0). \end{aligned} \quad (10)$$

и

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - 16, \\ a^* &= 500 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{X}{X_0}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} \right), \\ b^* &= 200 \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_0}} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

где  $u'_0$  и  $v'_0$  - цветности излучателя белого света,  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  - его цветовые координаты и  $1 \leq Y \leq 100$ .

$$\text{Если } \frac{X}{X_0} \leq \varepsilon, \text{ то } \sqrt[3]{\frac{X}{X_0}} = \left[ \frac{k \cdot \left( \frac{X}{X_0} \right) + 16}{116} \right] \quad (12)$$

$$\text{Если } \frac{Y}{Y_0} \leq \varepsilon, \text{ то } \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} = \left[ \frac{k \cdot \left( \frac{Y}{Y_0} \right) + 16}{116} \right] \quad (13)$$

$$\text{Если } \frac{Z}{Z_0} \leq \varepsilon, \text{ то } \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_0}} = \left[ \frac{k \cdot \left( \frac{Z}{Z_0} \right) + 16}{116} \right] \quad (14)$$

где  $\varepsilon = 216/24389$  и  $k = 24389/27$ .

В модифицированных системах в функцию  $L^*$  в явном виде был введён коэффициент яркости  $Y_0$  белого излучателя, также константа 17 была заменена на 16 с целью того, чтобы при  $Y_0 = 100$  значение функции  $L^*$  тоже приближалась к 100.

Отличие системы  $LAB(a^*, b^*)$  от системы МКО  $LABUV$  состоит в том, что она является криволинейными равноконтрастным преобразованием системы МКО  $XYZ$ , т.е. прямые линии, построенные в системе МКО  $XYZ$ , будут кривыми после переноса в систему  $LAB(a^*, b^*)$ .

Для удобства использования в систему МКО  $LAB(a^*, b^*)$  была трансформирована из прямоугольной в полярную с введением цветового тона ( $H^0$ ) и насыщенности ( $C^*$ ):

$$H^0 = \tan^{-1} \left( \frac{b}{a} \right), \quad C^* = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (15)$$

На графике координата  $H^0$  определяется углом, а  $C^*$  - радиусом относительно центра координат.

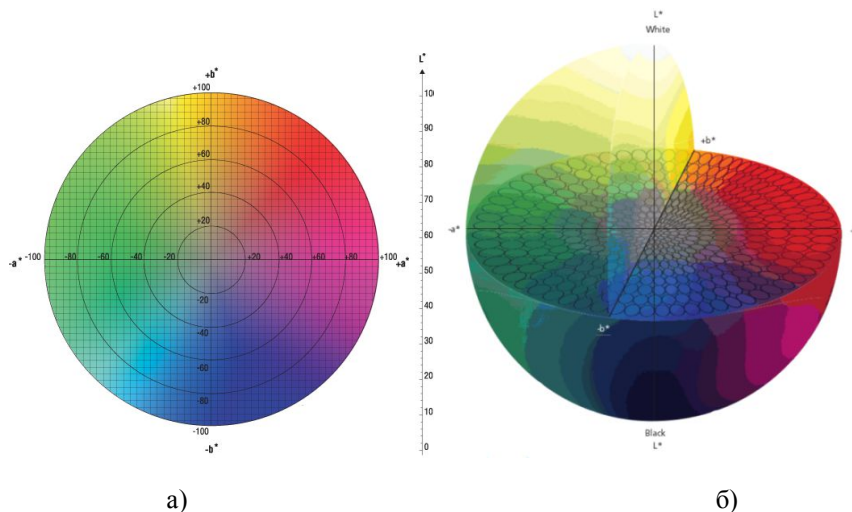


Рисунок 8. График цветового пространства  $LAB(a^*, b^*)$  в полярных координатах  $C^*H^0$  (а) и цветое тело системы  $LAB(a^*, b^*)$ .

### Анализ рассмотренных систем

При рассмотрении цветовых систем было сказано, что они не идеальны. Давайте же рассмотрим их различия.

Большая часть цветовых систем старалась приблизиться к равноконтрастной, так что рассмотрим отношения площадей эллипсов Мак Адама для каждой из систем. Для нахождения площадей эллипсов были оцифрованы двадцать пять эллипсов Мак Адама и представлены в таблице 1[2]:

Таблица 1. Соотношение размеров эллипсов Мак Адама для различных цветовых систем.

Цветовая система	Отношение площадей эллипсов Мак Адама	Величина порога цветоразличения	Эллиптичность, $\epsilon$
МКО 1931 (RGB)	158.8	0.0146	24
МКО 1931 (x,y)	83	0.0059	25.9
МКО 1960 (u,v)	7.2	0.0038	2.2
МКО 1964 (u',v')	228.8	4.9275	13.9
МКО LAB (a*,b*)	22.8	3.0624	15.4

Как видно из таблицы наиболее равноконтрастным цветовым пространством является МКО 1960 (u,v), в связи с тем, что её эллиптичность меньше чем у остальных. Отсюда значит, что эллипсы Мак Адама наиболее сильно приближены к окружности (при эллиптичности равной 0 эллипсы это окружность, т.е. эллиптичность это отношение максимального радиуса к минимальному с вычитанием единицы).

### Список литературы:

1. Ложкин, Л.Д. Дифференциальная колориметрия в телевидении [Текст]: автореф. дис. ... д-ра тех. наук / Л.Д. Ложкин – Санкт-Петербург, 2014.
2. Ложкин, Л.Д. Цвет в телевидении [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ложкин Л.Д. – Самара, 2016.
3. CIE (Commission Internationally de l'Eclairage). Publication N. 15.2, Colorimetry. Official Recommendations of the International Commission on Illumination, Second edition. [Text]/ Vienna, Austria. Central Bureau of the CIE. - 1986.
4. M. R. Luo, G. Cui and B. Rigg. The Development of the CIE 2000 Colour Difference Formula: CIEDE2000. Colour Imaging Institute University of Derby, UK.
5. Wright W.D. Researches on Normal end Defective Color Vision. [Text]/ W.D. Wright// London. H. Kampton. -1946.