

Вычисление цветовых различий между двумя цветами*Л.Д. Ложкин, А.А. Вороной, А.А. Солдатов, В.А. Неганов*

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Российская Федерация, г. Самара
ул. Л. Толстого, 23

В данной работе рассматриваются проблемы вычисления цветовых различий между двумя заданными цветами в существующих колориметрических системах МКО, а также точности цветовых различий полученных с помощью специальных формул: *JPC-79*; *СМС* на основе *JPC-79*, разработанной Комитетом по колориметрии Королевского общества красильщиков и колористов; а также формулой, рекомендованной в 1994 г. МКО. В свое время, одним из авторов (проф. Ложкиным Л.Д.) была предложена строго равноконтрастная цветовая система, защищенная патентом на изобретение, но в этой системе был применен достаточно сложный математический аппарат, основанный на тензорном исчислении. В данной работе используется простая методика вычисления цветовых различий, и достаточно несложный математический аппарат. Приведены результаты вычисления цветовых различий между двумя заданными цветами. Для этого была специально создана компьютерная программа, позволяющая проводить вычисления цветовых различий.

Ключевые слова: цветовые системы, эллипсы Мак Адама, цветовая шкала, геометрия Римана, строго равноконтрастное цветовое пространство.

Введение

Напомним высказывание Д. Джадда и Г. Вышецки «Воспринимаемая равноконтрастная трехмерная цветовая шкала, явилась бы не только большим научным достижением, но и оказалась бы полезной с любой точки зрения. Ее применение упростило бы определение цвета и установление цветовых допусков, внесло бы ясность в вопрос интерпретации одномерных цветовых шкал для идентификации несколько отличающихся цветов, служило бы руководством при изготовлении стандартных образцов цвета и оказало бы помощь в выборе гармоничных цветовых сочетаний. К сожалению, попытки создать такую шкалу до сих пор не привели к успеху. Скорее наоборот, они подтвердили предположение, что такую строго равноконтрастную трехмерную шкалу вообще невозможно создать. Однако эти попытки, по крайней мере, указывают на то, что возможны достаточно хорошие аппроксимации идеального равноконтрастного цветового пространства [1].

Одному из авторов настоящей статьи (проф. Ложкину Л.Д.) в свое время удалось разработать строго равноконтрастную цветовую систему координат. Разработка этой системы была произведена с помощью уравнения состояния гравитационного поля, известного как уравне-

ние А. Эйнштейна. Графическое представление, полученного строго равноконтрастного цветового пространства, использует геометрию Римана и систему подвижных координат и отражена в ряде публикаций [2–5]. В этих работах приведено теоретическое обоснование и отражены предпосылки создания строго равноконтрастного цветового пространства. В некоторых работах намечен путь расчета цветовых различий между двумя цветами, выраженных в порогах Мак Адама.

Данная работа посвящена разработке точного метода, с реализацией в виде математических формул расчета цветовых различий между двумя цветами.

1. Цветовые различия в «плоских» колориметрических системах МКО

Рассмотрим значения цветовых различий между двумя цветами в «плоских» колориметрических системах. Прежде всего, определимся с понятием «плоская» колориметрическая система. Под «плоской» колориметрической системой мы будем понимать такую систему, которая в графическом виде отображается на плоскости и имеет обычную декартову систему координат. Из известных колориметрических систем координат к этим системам относятся следующие

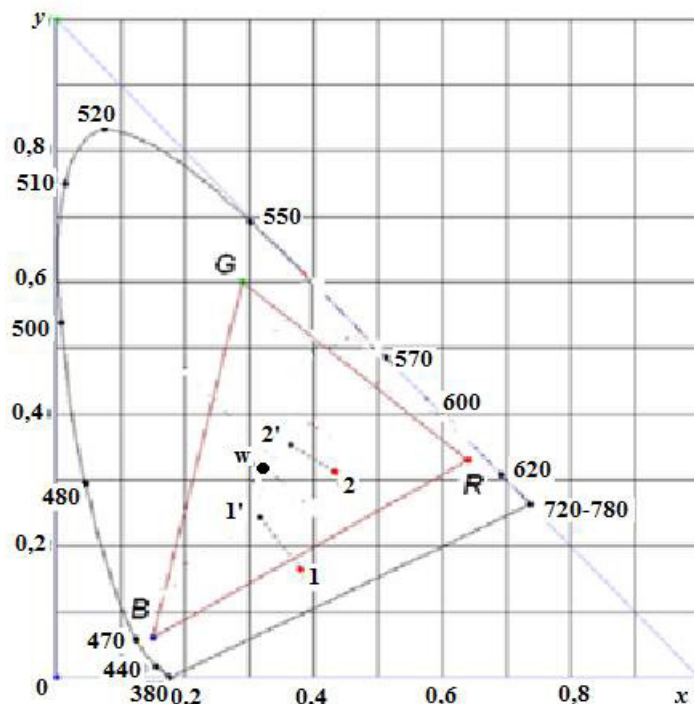


Рис. 1. Цветовой локус, на котором показан треугольник цветового охвата экрана телевизионного приемника (RGB). Пунктирными линиями 1-1' и 2-2' показаны цветовые искажения в телевизионной системе [6]

системы МКО: 1931 г. (r, g, b); 1931 г. (x, y, z); 1960 г. (u, v, w).

Эти системы МКО опираются на три координаты, а значит, должны строиться в трехмерном пространстве. Но это не совсем так. Ввиду того, что сумма координат равна единице, для конкретного цвета, то достаточно двухмерной плоскости, отображающей график цветностей, как это показано на рис. 1.

Поясним рис. 1. Пусть перед телевизионной камерой установлен некий объект, имеющий цветность 1 (или 2), тогда его изображение на телевизионном экране – это точка с координатами цветности 1' (или 2'). Разница между этими точками (цветовое различие) будет отражать цветовые искажения телевизионной системы. Очевидно, что цвет в точке 1 в принципе не может быть воспроизведен на телевизионном экране, так как его координаты цветности выходят за пределы цветового охвата телевизионного экрана. Если телевизионная система настроена правильно, то цветность опорного белого W (для европейского стандарта, а также Российского, это цветность стандартного источника D6500) будет принята без искажений.

Таким образом, определение величины цветовых различий между цветами является величиной, характеризующей погрешность цвето-спроизведения. В данном случае – телевизионной системой в целом.

2. Пороги цветоразличения

В 1943 г. Мак Адам опубликовал результаты проведенных экспериментов по определению порогов цветоразличения [7]. Впоследствии эти результаты стали называть – эллипсами Мак Адама, так как пороги цветоразличения глаза человека выглядели на цветовых диаграммах как эллипсы. Для дальнейших рассуждений приведем результаты экспериментов Мак Адама на рис. 2.

Как видно, из рис. 2, величина порога цветоразличения между двумя цветами (цветностями) зависит от положения этих цветов на цветовом локусе. Тогда измерения и вычисления цветовых различий в координатах колориметрических систем будут аналогичны измерениям, проведенным «резиновым метром», т. е. результаты измерений будут различны в зависимости от конкретных цветов объектов. Это обстоятельство значительно влияет на качество и точность измерения цветовых различий между цветами. В связи с этим были разработаны другие цветовые системы МКО. Такие как: МКО 1960 г. (u, v, w); МКО 1976 г. (L, a, b) или просто Lab ; МКО 1976 г. (L^*, u^*, v^*) и ряд других. Эти системы называются равноконтрастными, но к большому сожалению, в этих колориметрических системах не удалось избавиться от эллипсов (т. е. эллипсы не превратились в окружности равного диаметра).

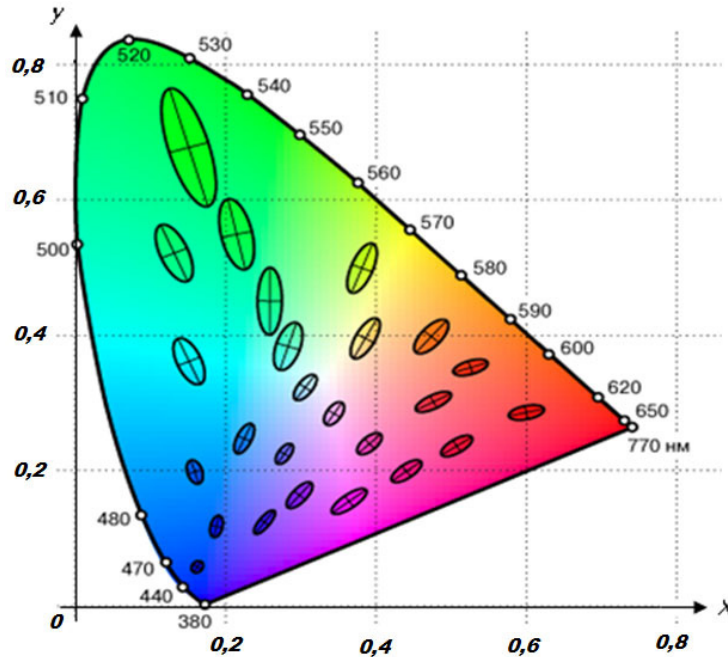


Рис. 2. Эллипсы Мак Адама в системе координат МКО 1931 г. (x , y , z) (для наглядности размеры эллипсов увеличены в 10 раз)

тра), хотя размеры и их различие от цветности, в некоторой степени, уменьшились. Таким образом, эти колориметрические системы можно назвать квазиравноконтрастные системы.

Разработка строго равноконтрастных колориметрических систем продолжается. Например, авторы [8] разработали колориметрическую систему на базе МКО 1931 г. (x , y , z), в которой эллипсы Мак Адама трансформируются в равновеликие окружности. Это решение (преобразование) было сделано на базе метрического тензора и оно не очень простое, к тому же данное преобразование предусматривает двухмерную колориметрическую модель для цветностей (МКО 1931 г. (x , y , z)).

Разработка трехмерного строго равноконтрастного цветового пространства для любой известной колориметрической системы МКО описана в [2–5]. Но данные преобразования были осуществлены в пространстве Шварцшильда с применением тензорного исчисления [9], геометрии Римана с подвижной системой координат, т. е. достаточно сложного математического аппарата.

Необходимо иметь ввиду еще одно обстоятельство: любой эллипс Мак Адама, с точки зрения глаза человека, представляет собой точку, так как для глаза цветность внутри эллипса неразличима. Другими словами, глаз воспринимает одинаково цветность любой точки, расположенной внутри кривой, описывающей эллипс.

3. Формулы цветовых различий

Выше было показано, что существующие цветовые пространства не обладают однозначностью измерений цветовых различий, т. е. величина пороговых изменений цветностей в них зависит от области на цветовом пространстве (от конкретного значения координат сравниваемых цветов), поэтому для вычисления цветовых различий ни одно из имеющихся цветовых пространств не обладает нужной точностью. Но, тем не менее, формула цветового различия *MКОLab* стала одной из двух первых формул, рекомендованных МКО для количественной оценки воспринимаемого различия двух цветов. И все же, попытки ее использования для вычисления цветовых различий показали необходимость дальнейшего ее уточнения.

Оценка точности формул вычисления цветового различия представляет сложную проблему. Так, например, Луо и Риг использовали пять характеристик для сравнительной оценки точности формул цветового различия [10]. Однако, в первом приближении, одной из характеристик пригодности формул для вычисления цветовых различий является процент ошибочных решений. Исследования Мак Дональда показали, что формула *ANLAB-40*, упрощением которой является формула цветовых различий *MКОLab*, дает приблизительно 20 % ошибочных решений, в то время как визуальные оценки экспертов только 17 % [10]. Таким образом, недостат-

ки метрики *MКОLab* вскоре стали очевидными и потребовали ее уточнения. Первой модификацией *MКОLab*, нашедшей широкое применение в вычислениях цветовых различий, стала формула *JPC-79*, задаваемая следующими соотношениями:

$$DE_{jpc-79} = \sqrt{\left(\frac{DL}{L_t}\right)_2^2 + \left(\frac{DC}{C_t}\right)_2^2 + \left(\frac{DH}{H_t}\right)_2^2}, \quad (1)$$

где

$$L_t = \frac{0,08195L_1}{1 + 0,01756L_1},$$

$$C_t = \frac{0,0638C_1}{1 + 0,0131C_1} + 0,638,$$

$$H_t = TC_t.$$

Если $C_t < 0,638$ то $T = 1$, иначе:

$$T = 0,36 + |0,4\cos(q_1 + 35)| \text{ для } 345 < q_1 < 164,$$

$$\text{и, } T = 0,56 + |0,2\cos(q_1 + 168)| \text{ для } 164 < q_1 < 345.$$

DL , DC , DH – различие между эталонным и испытуемым образцами по светлоте, насыщенности и цветовому тону соответственно, вычисленное по формуле *MКОLab*; L_1 , C_1 , q_1 – относятся к эталонному образцу.

Принципиальным отличием формулы *JPC-79* от формулы *MКОLab* стало то, что путем введения в формулу масштабирующих коэффициентов – L_t , C_t , H_t , задали изменение допуска по светлоте при изменении светлоты стандарта, по насыщенности – при изменении насыщенности стандарта, и изменение допуска по цветовому тону в зависимости от насыщенности. Хотя общий вид формулы *JPC-79* похож на формулу, определяющую евклидово расстояние в трехмерном пространстве, цветовое различие, вычисленное по *JPC-79*, строго говоря, не может быть интерпретировано как геометрическое расстояние между точками некоторого цветового пространства. Это обусловлено тем, что шкалы цветового тона и насыщенности в формуле *JPC-79* перестали быть взаимно независимыми. Таким образом, различие, вычисленное по *JPC-79*, утратило наглядность интерпретации, какой обладало различие по *MКОLab*. Конкретный вид масштабирующих коэффициентов в формуле *JPC-79* определен при выполнении оценок приемлемости цветовых различий экспертами. Если $DE_{jpc-79} = 1$, то это означает, что вероятность принятия образца при достаточно большом числе визуальных оценок равна 0,5 (50 %). Таким образом, $DE_{jpc-79} < 1$ означает вероятность принятия образца 0,5 (50 %). Ясно,

что *JPC-79* является формулой приемлемых, а не воспринимаемых различий. В формуле приемлемости отношение между компонентами общего цветового различия светлоты, насыщенности, цветового тона получается из оценок, в то время как в формуле для воспринимаемых различий отношение этих компонент должно быть фиксированным. Формула шкалирования по воспринимаемым различиям была бы более универсальной. Разработка такой формулы была осуществлена Комитетом по колориметрии Королевского общества красильщиков и колористов (*СМС*) на основе *JPC-79*. В результате получили формулу *СМС*, определяемую соотношениями (2) [1]:

$$DE_{cmc} = \left[\left(\frac{DL}{S_l}\right)^2 + \left(\frac{DC}{S_c}\right)^2 + \left(\frac{DH}{S_h}\right)^2 \right]^{0,5}, \quad (2)$$

где $S_l = 0,040975L_1 / (1 + 0,01756L_1)$, если $L_1 < 16$, то $S_l = 0,511$;

$$S_c = 0,0638C_1 / (1 + 0,0131C_1) + 0,638;$$

$$S_h = S_c (Tf + 1 - f);$$

$$f = \{(C_1)^4 / [(C_1)^4 + 1900]\}^{1/2},$$

$$T = 0,36 + |0,4\cos(q_1 + 35)| \text{ для } 345 < q_1 < 164;$$

$$\text{и, } T = 0,56 + |0,2\cos(q_1 + 168)| \text{ для } 164 < q_1 < 345;$$

DL , DC , DH – различие между эталонным и испытуемым образцами по светлоте, насыщенности и цветовому тону, соответственно, вычислено по формуле *MКОLab*; L_1 , C_1 , q_1 – относятся к эталонному образцу.

Общий вид формул *JPC-79* и *СМС* ($l:c$) отличается тем, что в последнюю введены изменяемые множители l и c , которые обозначают отношение весов светлоты к насыщенности и цветовому тону и позволяют использовать формулу для вычисления как воспринимаемых, так и приемлемых цветовых различий. В формуле *СМС* (Ec) зависимость шкалы цветового тона от насыщенности стала еще более сложной. Многочисленные промышленные испытания показали, что формула *СМС* (Ec) гораздо лучше коррелирует с визуальными оценками приемлемых и воспринимаемых; малых и средних цветовых различий, чем *MКОLab*, и оценка по *СМС* (Ec) надежнее, чем оценка каждого отдельного наблюдателя. В результате, формула *СМС* ($l:c$) принята как стандарт оценки общего цветового различия в Великобритании, США и *ISO*. Однако она наследует недостаток формулы *JPC-79*, а именно:

она не дает наглядной интерпретации общего цветового различия, так как не связана с евклидовым цветовым пространством. Хотя формула *СМС* (*l:c*) подразделяет общее цветовое различие на три компонента – светлость, насыщенность и цветовой тон, она не позволяет, как *MКОLab* определить, например, в какую сторону отличается конкретный образец от эталона – в синеву или в желтизну. Для этого по-прежнему приходится использовать формулу и пространство *MКОLab*. Следующей попыткой улучшить формулу *СМС* (*l:c*) стала формула *BFD*, опубликованная в 1987 г. Имея более сложную по сравнению с формулой *СМС* структуру, она не вносит в вычисление цветового различия ничего принципиально нового и дает незначительное улучшение согласованности с визуальными оценками. Видимо, в силу этих причин она не нашла пока широкого применения [10].

Похожую с *СМС* (*l:c*) структуру имеет формула вычисления цветового различия (3), рекомендованная в 1994 г. МКО, но в отличие от *СМС* (*l:c*) она использует простую линейную зависимость от насыщенности для получения значений S_C и S_h [10].

$$DE_{CIE94} = \left[\left(\frac{DL}{k_l S_l} \right)^2 + \left(\frac{DC}{k_c S_c} \right)^2 + \left(\frac{DH}{k_h S_h} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (3)$$

где $S_l = 1$; $S_c = 1 + 0,045C_l$; $S_h = 1 + 0,015C_l$; C_l – относятся к эталонному образцу.

Для этого соотношения также DL , DC , DH – различие между эталонным и испытуемым образцами по светлоте, насыщенности и цветовому тону, соответственно, вычисленное по формуле. Это различие включает в себя три весовых параметра k_l , k_c , k_h для светлоты, насыщенности и цветового тона, соответственно. При этом для оценки образца цвета на соответствие цветовому допуску рекомендуется $k_l = 2$, $k_c = 1$, $k_h = 1$, хотя в общем случае, при оценке цветового различия $k_l = k_c = k_h = 1$. Предполагается, что точные значения этих параметров должны устанавливаться с учетом влияния внешнего освещения поверхности образца цвета и других факторов на согласованность с визуальными оценками.

Всем перечисленным выше формулам присущ один общий недостаток – они сугубо эмпирические. Каждая из них отличается тем, что при ее выводе (или оптимизации) был использован конкретный экспериментальный материал. Поэтому продолжают появляться новые формулы. В частности, *ISO* недавно утвердила две формулы:

формулу *СМС* для вычисления цветовых различий и формулу, предложенную Швейцарской комиссией по испытаниям устойчивости окрасок для оценки изменений цвета в испытаниях на устойчивость окрасок [1]. Хотя, по сути, вычисление малых цветовых различий и оценка изменений цвета при испытаниях устойчивости окраски – одна и та же задача.

Необходимо отметить, что данные формулы пригодны лишь при субтрактивном смешении цветов, т. е. эти формулы применимы в полиграфии, текстильной промышленности, фотографии и других подобных отраслях народного хозяйства, где объект цветового сравнения можно наблюдать лишь при внешнем освещении, а источник света можно и нужно установить стандартный и рекомендованный МКО, например, *D6500* [10].

В устройствах воспроизведения, где цветное изображение получается за счет аддитивного сложения основных цветов (телевидение, экран монитора компьютера), эти формулы непригодны, так как принципиально нельзя получить все существующие цвета на экранах монитора или телевизора, или экранах воспроизведения видеоизображения.

4. Цветовые различия

в колориметрических системах МКО

Для вычисления конкретных значений цветовых различий при аддитивном синтезе цвета была разработана специальная программа. Она производит вычисление цветовых различий между двумя цветами, заданными координатами цветности в системе МКО – 1931 г. (x , y) [10]. На рис. 3 представлены результаты вычисленных цветовых различий между двумя цветами с координатами x и y , как для первого, так и для второго цветов. Необходимо отметить, что колориметрические системы МКО 1931 г. (x , y , z), (r , g , b) и МКО 1960 г. (u , v) являются двухмерными и определяют только цветность объекта, поэтому при вычислении цветовых различий определялось различие цветности между двумя исходными цветами, которое соответствует геометрическому расстоянию между точками на графиках МКО:

$$\Delta E = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}; \quad (4)$$

где x_1 , y_1 , x_2 , y_2 – координаты цветности в двухмерной системе координат либо МКО 1931 г. (x , y , z), (r , g , b), либо МКО 1960 г. (u , v , w). Но,

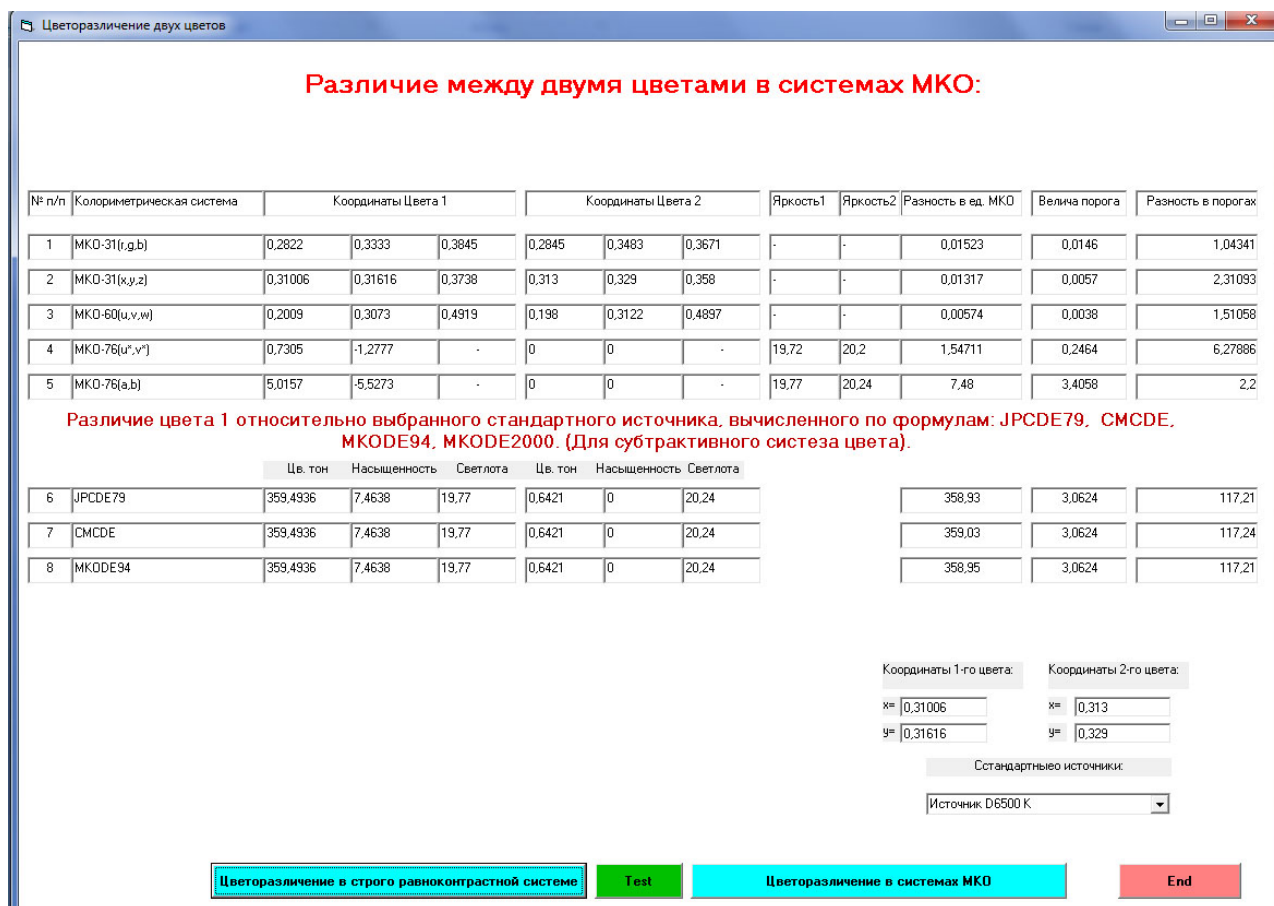


Рис. 3. Результаты вычисления различий между двумя цветами в различных колориметрических системах

поскольку, третья координата (будь то z , или b или w) зависит от значений x , y , или r , g , или u , v – то эта координата в (4) не учитывается. В формуле (4) не учитывается значение яркости, поскольку указанные колориметрические системы являются двухмерными (как это было сказано выше). Поэтому на рис. 3 результаты расчетов показаны именно для цветностей сравниваемых цветов.

Переход из системы МКО 1931 г. (x , y , z) в систему МКО 1931 г. (r , g , b) производится в соответствии со следующим матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1191 & 0,9505 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,2408 & -1,5372 & -0,4985 \\ -0,9693 & 1,8760 & 0,0416 \\ 0,0557 & -0,2040 & 1,0573 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}.$$

Для перехода в МКО 1960 г. (u , v , w) используются следующие формулы:

$$u = \frac{2x}{6y - x + 1,5}; \quad v = \frac{3y}{6y - x + 1,5}.$$

В случае трехмерных колориметрических систем, к примеру, МКО 1976 г. (U^* , V^* , L^*) или (MКОLab) цветовое различие определяется:

$$\Delta E = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (L_1 - L_2)^2}.$$

Где x_1 , y_1 , x_2 , y_2 – координаты цвета u^* , v^* , или a , b колориметрических систем МКО 1976 г. для первого и второго цвета, соответственно. В свою очередь u^* , v^* определяются:

$$u^* = 13 L^* (u' - u'_0), \quad a^* = 500 \left(3 \sqrt{\frac{X}{X_0}} - 3 \sqrt{\frac{Y}{Y_0}} \right),$$

$$v^* = 13 L^* (v' - v'_0), \quad b^* = 200 \left(3 \sqrt{\frac{Y}{Y_0}} - 3 \sqrt{\frac{Z}{Z_0}} \right).$$

Для системы МКО 1976 (U^* , V^* , L^*), значение яркости определяется:

$$L^* = 25 \sqrt[3]{\frac{100Y}{Y_0}} - 16.$$

Для системы МКО Lab, значение яркости определяется:

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - 16.$$

В этих формулах координаты цвета с индексом 0, обозначают координаты «белого», обычно это координаты источника D6500.

Координаты цвета X, Y, Z можно получить из координат цветности x, y, z путем умножения на 100. В этом случае получаем относительные координаты цвета.

Координаты цветности u' и v' определяются:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}.$$

В колонке «разность в ед. МКО» (рис. 3) показана величина цветовых различий между двумя заданными цветами («цвет1» и «цвет2»). Как видно из рис. 3, величина цветовых различий значительно отличается в зависимости от колориметрической системы. Это факт объясняется тем, что каждая колориметрическая система имеет «свои масштабы» координатных осей, поэтому значения цветовых различий между двумя заданными цветами зависят от конкретной колориметрической системы. Тот же самый результат мы наблюдаем при вычислении цветовых различий между двумя исходными цветами, выраженными в порогах Мак Адама, а этот факт объясняется тем, что системы МКО не являются равноконтрастными. Это подтверждается значениями в последней колонке на рис. 3. В предпоследней колонке показаны значения порогов цветоразличения Мак Адама для различных колориметрических систем МКО.

В таблице на рис. 3 показаны цветовые различия между двумя цветами, определенные по формулам (1)–(3). Как видно из данных, приведенные значения мало чем отличаются друг от друга (последняя колонка результатов, рис. 3).

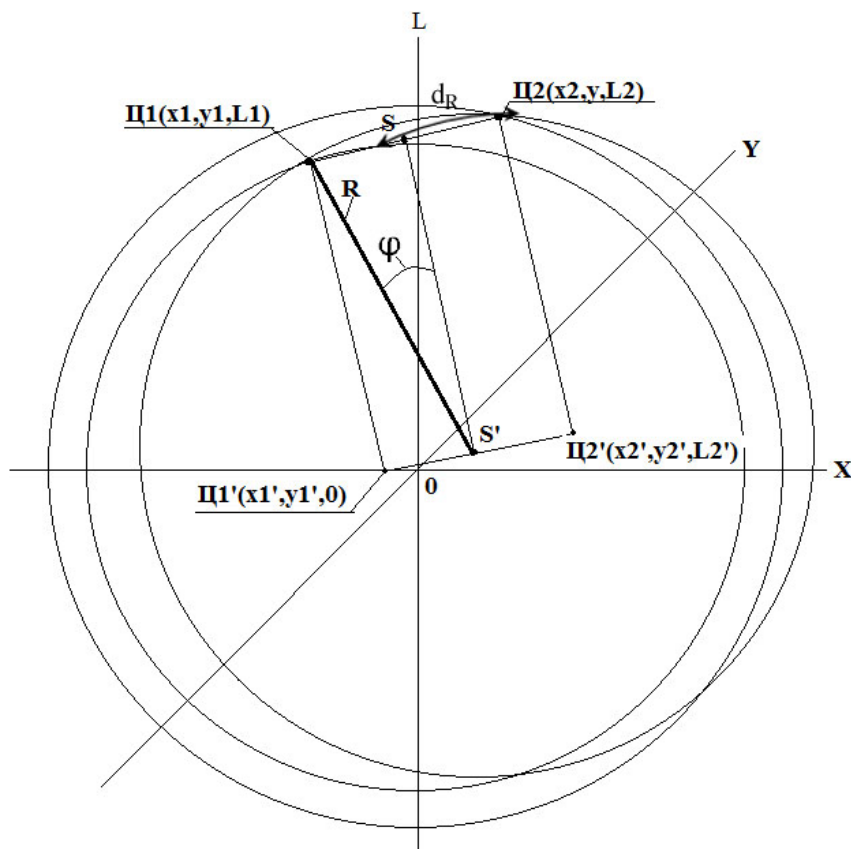
5. Вычисление цветовых различий между двумя цветами в строго равноконтрастной цветовой системе

В предыдущем разделе мы указали, что цветовое различие, выраженное в порогах Мак Адама между двумя цветами, определяется в зависимости от колориметрической системы. В [2–5] приведено описание строго равноконтрастного цветового пространства. Причем перевод в это, строго равноконтрастное цветовое пространство возможно из любой колориметрической системы МКО. Но есть некоторые отличия, связанные с предварительными преобразованием для плоских колориметрических систем МКО. К этим системам, как уже было сказано выше, отно-

сятся системы $x, y, z; r, g, b; u, v, w$. Это преобразование сводится к параллельному переносу осей координатной системы, так, чтобы начало координат находилось в точке координат равноэнергетического источника E . Например, система координат МКО (x, y) передвигается на $-0,3333$ как по x , так и по y . Этот сдвиг системы координат необходим, чтобы можно было определить цветовой тон и насыщенность цвета. Аналогично, сдвигается начало координат системы r, g и u, v значений координат цветности источника E , определенных в этих системах.

Для трехмерных систем координат (МКО 1976 г.) эти преобразования не требуются [2–5].

Из вышеуказанных источников следует, что колориметрическое пространство (цветовой locus) описывает сферу, радиус которой пропорционален яркости конкретного объекта, выраженного точкой с определенными координатами колориметрической системы. Таким образом, если необходимо вычислить цветовое различие между двумя цветами Ц1 и Ц2, которые имеют разные яркости ($L1$ и $L2$), то эти точки будут находиться на двух концентрических сферах (рис. 4). В этом случае цветовое различие будет определяться длиной дуги от точки Ц1 к точке Ц2. Наша задача – вычислить радиус данной дуги и ее центр. Если исходные цвета Ц1 и Ц2 имеют одинаковые яркости ($L1 = L2 = L$) (что встречается довольно редко), то они находятся на сфере определенного радиуса, и поставленная задача решается довольно просто. В противном случае, решение этой задачи – усложняется. Поступим следующим образом: соединим прямой исходные точки (Ц1 и Ц2) и найдем длину полученной хорды. Это довольно тривиальная задача [11]. Далее найдем координаты середины хорды (на рис. 4 – точка S), что также не представляет сложности [11]. Из полученной точки S опустим перпендикуляр в сторону начала координат 0. На этом перпендикуляре найдем точку S' , определяемую разностью яркостей точек Ц1 и Ц2 ($L1 - L2$), т. е. яркость точки S минус минимальная яркость из исходных цветов (на рис. 4 это яркость $L1$ цвета Ц1). Полученная точка и будет центром искомой дуги. Из этого построения получаем два равных прямоугольных треугольника $\Delta S'S$ Ц1 и $\Delta S'S$ Ц2 (равенство этих треугольников легко доказывается). Гипотенуза « S' Ц1» и будет – искомый радиус R дуги, ее длина (d_R) определяется следующим выражением [11]:

Рис. 4. Вычисление длины дуги d_R

$$d_R = 2\varphi R, \quad (5)$$

где угол φ можно определить как $\arctg = (|CS|/|SS'|)$.

В источниках [2–5] указано, что разработанная строго равноконтрастная система отображается в геометрии Римана в подвижной системе координат, причем коэффициент сжатия (или удлинения осей координат) для различных колориметрических систем МКО будет различен [3]. Назовем этот коэффициент буквой K . Он может меняться в широких пределах. В [3] данный коэффициент представлен вектором, у нас этот вектор представляется скалярной величиной. Но здесь нет ошибки, так точка S' (рис. 4) может быть переопределена с учетом коэффициента K :

$$S'' = |SS'|K,$$

где $|SS'|$ – длина отрезка SS' , а левый символ S'' обозначает новое положение центра искомой дуги, который имеет новые координаты x'' , y'' и L'' , которые можно связать со старыми посредством коэффициентов K_1 , K_2 и K_3 , что аналогично [3].

Не нарушая установившихся традиций (все колориметрические системы МКО, разработанные после 8 сессии 1931 г., в качестве базовой

системы используют систему МКО 1931 г. (x , y , z)), будем считать для базовой системы коэффициент $K = 1$. Таким образом, для других колориметрических систем, отличных от системы МКО 1931 г. (x , y , z) положение точки S'' , будет отличаться, с учетом K .

На рис. 5 приведены результаты вычисления цветовых различий между двумя цветами в строго равноконтрастном пространстве. Здесь же приведены значения коэффициента K .

Некоторые пояснения к рис. 5. Для двухмерных колориметрических систем (МКО 1931 г. и МКО 1960 г.) яркость исходных (исследуемых) цветов приведена к единице. Это сделано для того, чтобы отличия координат цветности и значения яркости были одного порядка.

Заключение

В данной статье приведена сравнительно точная и не требующая сложных вычислений методика вычисления цветовых различий двух цветов в строго равноконтрастной цветовой системе. Показано, что величины цветовых различий, выраженные в порогах цветоразличения Мак Адама, не зависят от выбора колориметрических систем. Это замечание хорошо согласуется



Рис. 5. Вычисление цветовых различий между двумя цветами в строго равноконтрастном цветовом пространстве

с расчетами цветовых различий, сделанных по формулам *JPCDE-79*, *CMCDE*, *MKODE-94* [10].

Приведенную методику вычисления цветовых различий между двумя цветами рекомендуется использовать на практике.

В работе приведены, полученные значения коэффициента K для колориметрических систем МКО 31 (x, y), МКО 60 (u, v), МКО-76 (U^*, V^*) и МКО-76 (Lab).

Данную методику можно использовать как для аддитивного синтеза цвета, так и для субтрактивного.

Список литература

1. Джадд Д., Выщецки Г. Цвет в науке и технике; пер. с англ. под ред. Л.Ф. Артюшина. М.: Мир, 1978. 428 с.
2. Ложкин Л.Д., Неганов В.А. Способ преобразования цветового пространства. Патент на изобретение. № 2494461 от 27.09.2013 г. Приоритет от 08.07.2011 г. Бюл. № 27 от 27.09.2013. МПК J06K 9/68 (2006.01).
3. Ложкин Л.Д. Дифференциальная колориметрия в телевидении. Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2014.
4. Ложкин Л.Д., Осипов О.В., Вороной А.А. Цветокоррекция в трехцветных устройствах цветовоспроизведения // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 1. С. 88–94.
5. Threshold color differentiation, and the Einstein equation / L.D. Lozhkin [et al.] // International Journal of Advanced Research. 2017. № 5(7). P. 510–516.
6. Ложкин Л.Д. Цвет в телевидении: уч. пос. Самара: ФГОБУ ПГУТИ, 2016. 424 с.
7. Mac Adam D.L. Specification of small chromaticity differences // Josa. 1943. Vol. 33. P. 18–26.
8. Scalar curvature of space as a source of information of new uniformity aspects concerning to color representation systems / J.R. Jimenez [et al.] // Optics (Paris). 1993. Vol. 24. № 6. P. 243–249.
9. Schwarzschild K. Eber das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie // Sitzungsberichte der KцniglichPreussischenAkademie der Wissenschaften 1. 1916. P. 189–196. (Шварцшильд К. О гравитационном поле точечной массы в эйнштейновской теории // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979. С. 199–207.)
10. Фершильд М.Д. Модели цветового восприятия; 2-е изд. М.: издательство А. Шадрин, 2004. 438 с.
11. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике; 10-е изд., стереотипное. М.: Наука, 1973. 870 с.

Calculation of color differences between two colors

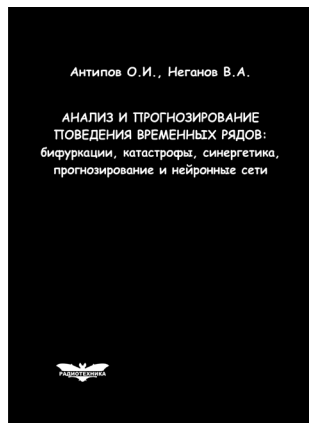
L.D. Lozhkin, A.A. Soldatov, A.A. Voronoy, V.A. Neganov

In this paper, we consider the problem of computing color differences between two specified colors in the existing color systems by international Commission on illumination, or as to the accuracy of the color differences obtained by using specific formulas: JPC-79; CMC-based JPC-79 developed by the Committee on colorimetry of the Royal society of dyers and colourists; and the formula recommended in 1994 by international Commission on illumination. At the time, one of the authors (Prof. Lozhkin L.D.) was offered strictly equicontrasting color system, protected by a patent for an invention, but this system was applied to rather complicated mathematical apparatus, based on tensor calculus. This work uses a simple method of calculating color differences, and a fairly simple mathematical apparatus. The results of calculating color differences between two specified colors. This was specially created computer program that allows you to calculate color differences.

Keywords: color systems, Mac Adama ellipses, color scale, Riemann geometry, strictly equal color space.

Антипов, О.И.

Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети / О.И. Антипов, В.А. Неганов. – М.: Радиотехника, 2011. – 350 с. ISBN 978-5-88070-294-7



УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

Монография посвящена объединению нескольких направлений в науке: бифуркаций в нелинейных динамических (или детерминированных) системах, причем внимание уделяется бифуркациям-кризисам, которые отождествляются с катастрофами в синергетике – науке о самоорганизации в сложных системах, где велика роль коллективных, кооперативных эффектов, возникновения порядка – фрактальных структур в турбулентности (или хаосе). В синергетике общим является принцип подчинения, который позволяет исключать большое число переменных в сложных системах и описывать в них сложные процессы. Использование в роли одной из основных количественных характеристик катастроф фрактального показателя Херста связывает фракталы с бифуркациями. Объединение этих четырех направлений позволяет упростить проектирование прогнозирующих нейронных сетей, которое в настоящее время отчасти является искусством.

Даны авторские модификации некоторых известных фрактальных методов, позволяющие проводить более глубокий анализ хаотических процессов. Эти результаты, на наш взгляд, должны являться необходимой частью полного алгоритма построения прогностических моделей, описанного в книге. В частности, описан авторский алгоритм определения временного лага, необходимого для реконструкции аттрактора динамической системы, и модификация метода ближайших ложных соседей, которую можно использовать в качестве индикатора приближающейся катастрофы.

Приведены конкретные примеры из таких областей науки, как радиотехника, экономика и медицина.

Монография представляет интерес для научных работников, аспирантов и докторантов, работающих в области прикладных задач анализа, моделирования и прогнозирования хаотических процессов в нелинейных системах из различных отраслей науки и техники.