

ИНТЕРВАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЦВЕТА ИЗ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙИ.Г. Пальчикова^{1,2}, Е.С. Смирнов¹¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия,² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Новосибирск, Россия**Аннотация**

Изучается влияние аналого-цифрового преобразования входного сигнала от образца на цветопередачу колориметрического устройства. Показано, что независимо от выбора источника освещения в цветопередачу вносится характерная систематическая ошибка квантования. Настоящая работа содержит анализ ошибки квантования для цветной фотоматрицы с разрешением 8 бит на канал. Разработан алгоритм для нахождения интервалов значений доминирующей длины волны и насыщенности цвета образца. Показано, что близость двух разных цветов образца может быть оценена с помощью коэффициента Жаккара. Методом вычислительного эксперимента найдена спектральная зависимость интервалов параметров цвета, рассчитанных из цифровых изображений. Выявлено, что цвета с меньшей яркостью имеют больший интервал и определяются с меньшей точностью. Предложена гипотеза, объясняющая появление эллипсов Мак Адама на цветовом гамуте, а именно: процесс кодирования зрительных нейронных сигналов может включать в себя процедуры, аналогичные аналого-цифровому преобразованию.

Ключевые слова: цифровое изображение, аналого-цифровое преобразование, цвет, доминирующая длина волны, насыщенность, RGB-пространство, квантование сигнала, колориметрия.

Цитирование: Пальчикова, И.Г. Интервальная оценка параметров цвета из цифровых изображений / И.Г. Пальчикова, Е.С. Смирнов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 95-102. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-95-102.

Введение

Современные методы измерения цвета основываются на математической обработке [1] цветного цифрового изображения и позволяют объективно выполнить измерение цвета и выразить результаты в виде координат заданного цветового пространства. Традиционная характеристика цвета, а именно доминирующая длина волны (ДДВ), наиболее полно учитывает свойства как глаза, так и источника света. Поэтому её оценка наиболее полно отражает визуальную перцепцию [2] человека. С помощью количественного выражения ДДВ и насыщенности цвета (НЦ) возможно проводить сравнительные оценки цветовых характеристик образцов с высокой достоверностью, в т.ч. для специальных применений [3].

В работе [4] экспериментально выявлена нелинейность цветопередачи цифровых камер, калибровка которых была выполнена производителем общепринятым образом. Обоснована необходимость проведения дополнительной калибровки цифровых измерительных колориметрических систем. Разработана процедура корректировки алгоритма вычисления доминирующей длины волны, которая улучшает достоверность, воспроизводимость и повышает точность определения спектральных цветов до величины $\pm 2,5$ нм.

Однако на цветопередачу оказывает влияние квантование входного сигнала от образца в ходе его аналого-цифрового преобразования (АЦП) перед записью в цифровой файл. Независимо от выбора источника освещения в цветопередачу вносится характерная систематическая ошибка квантования. Настоящая работа содержит анализ ошибки квантования, вносимой АЦП сигнала от типичной цветной (RGB) приёмной фото-

матрицы с разрешением 8 бит на канал, которая формирует 24-битовые RGB-изображения.

Современные устройства технического зрения, основанные на использовании цифровых фотокамер и оснащённые программным обеспечением, являются техническими моделями глаза, и их функционирование во многом повторяет глаз. Выявление особенностей работы технических систем позволяет находить перспективные подходы к изучению работы визуальной системы человека. В то же время для решения задач тестирования и тренировки зрения [5] широко применяются офтальмологические приборы, в которых используется цифровой синтез зрительных стимулов с последующим воспроизведением на экране цветного дисплея. И здесь ограничения технических систем в части передачи цвета не позволяют [5] получать достаточно воспроизводимые результаты при исследовании параметров глаза, таких как его цветоразличительная способность. В этой связи задача изучения функциональных возможностей электронных средств визуализации и технического зрения приобретает несомненную актуальность.

1. Метод описания цвета

В наших работах [4, 6] развиты методы компьютерного зрения для количественного описания цвета и разработано цифровое колориметрическое устройство [7, 8], в котором свет от образца переносится оптическими компонентами на фотоматрицу, где разделяется на триплет яркостных сигналов RGB. Каждый из них подвергается АЦП и в результате имеет $2^8 = 256$ градаций интенсивности.

В настоящей работе мы моделируем квантование яркостных сигналов и определяем интервалы для па-

параметров цвета (ДДВ и НЦ) образца из его цифровых изображений. Рассчитываются, во-первых, координаты (x, y) цветности каждой из комбинаций RGB -интенсивностей на плоской диаграмме цветностей; во-вторых, угол наклона прямой, проходящей через две точки с координатами (x, y) : точку источника освещения и точку цвета. Мы использовали спектральный locus [9] для колориметрического наблюдателя с углом зрения десять градусов, полученный из значений функции «*long, medium and short wavelengths*» (цветовая модель *LMS*, «длинные, средние и короткие длины волн») путём пересчёта их в координаты цветового пространства *CIE XYZ* по формуле [10]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,910197 & -1,112124 & 0,201908 \\ 0,37095 & 0,629054 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В расчётах задавался равноэнергетический источник белого света *CIE-E* с координатами цветности $(0,333333; 0,333333)$.

Общее количество комбинаций RGB -интенсивностей в трех каналах составляет $256^3 = 16777216$ и подразделяется на спектральные и пурпурные цвета. Комбинация RGB считается спектральной, когда прямая линия, проведённая через цветовые координаты точки источника освещения и точки цвета, имеет пересечение с используемым цветовым locusом. Прямой последовательный перебор и сортировка комбинаций позволили отнести 11182939 комбинаций RGB к спектральным. Остальные относятся к пурпурным комбинациям. Полученная выборка согласуется с общеизвестной [1] в цветовой модели *HSV*, которая также содержит 2/3 спектральных цветов/оттенков.

Для спектральных комбинаций определяются следующие параметры: ДДВ света (нм), НЦ (%) и яркость цвета, соответствующая серому цвету с гамма-коррекцией (светимость [11]) и без таковой.

Количественные характеристики цвета (ДДВ и НЦ) рассчитываются из значений RGB цифрового изображения. Поэтому ошибка квантования сигнала фотоматрицы в процессе АЦП в каждом из каналов будет сказываться на точности результата.

2. Анализ ошибки квантования

В результате АЦП яркостные сигналы RGB становятся квантованными, т.е. расположенными в конечном числе интервалов. В случае восьмибитного приёмника излучения количество интервалов квантования составляет 256. АЦП вносит ошибку квантования [12], максимальное значение которой не превосходит половину значения единицы в младшем разряде, т.е. $\pm 0,5$ интервала. Для оценки влияния ошибки квантования на точность вычисления ДДВ и НЦ потребуется, во-первых, определить на плоскости (x, y) граничные координаты цветностей точек источника выбранного белого осветителя *CIE-E* (рис. 1а), и во-вторых, – координаты цветности образца, например, в произвольных точках Б и В (как показано на рис. 1б, в). Параметры точек указаны в подписи под

рис. 1. Яркости в каналах RGB даны в виде тройки чисел. В преобладающем канале RGB величина яркости максимальна, это одно из трёх значений RGB в точке, которое далее в тексте подчёркивается.

Расположим записываемые в файл сигналы интенсивности в порядке их убывания, начиная с максимального, равного 255, до 0. В каждом из каналов RGB в процессе квантования сигнал от образца в интервале $(254,5+)$ округлится до величины 255 и величина 255 запишется в файл. Следующей ступенью в градациях яркости по нисходящей является сигнал, равный 254. Он заключит в себя яркость образца, квантуемую АЦП в интервале $(253,5...254,4)$, значения которого округлятся до 254 и запишутся в файл. Таким образом достигается крайний интервал $(0...0,4)$. Величина аналогового светового сигнала равновероятно [12] может принимать любое значение в пределах каждого интервала.

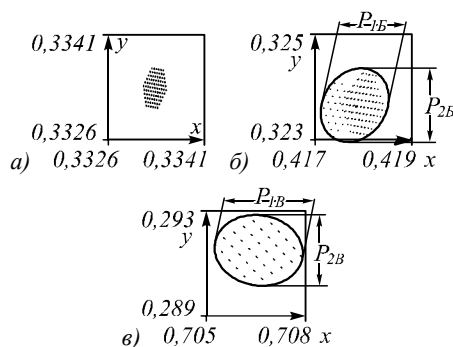


Рис. 1. Геометрия областей распределения точек на плоской диаграмме (x, y) цветностей: а) область осветителя *CIE-E*; б) область точки Б с параметрами: $RGB = (255; 119; 114)$, основная ДДВ = 640,35 нм, НЦ = 22,54%; в) область точки В с параметрами: $RGB = (253; 9; 0)$, основная ДДВ = 640,35 нм, НЦ = 99,85 %

При вычислении ДДВ образца с учётом ошибки квантования интервалы RGB пересчитываются в области (для наглядности заключённые в овалы) точек на плоской диаграмме цветностей (рис. 1б, в). Области появляются всякий раз, когда необходимо охарактеризовать образец квантуемыми величинами, в данном случае RGB .

Используя квантуемые величины, важно понимать, что образовавшиеся области точек будут характеризовать цветовые параметры образца, в то время как для выяснения цветовых параметров изображения образца достаточно одной точки из каждой области. Такая точка, а соответственно, и параметры цвета будут считаться основными. Координаты основных точек рассчитываются непосредственно по RGB -значениям.

Рис. 2 иллюстрирует нахождение ДДВ геометрическим способом. Координаты (x, y) цветности выбранных точек Б и В, имеющих одинаковую ДДВ, соответствуют цветам с разной насыщенностью S (НЦ). Точка Б на рис. 2 имеет размеры области, обозначенные как $P_{1Б} \times P_{2Б}$, показанные на рис. 1б, и точка В на рис. 2 имеет размеры области, обозначенные как $P_{1В} \times P_{2В}$, показанные на рис. 1в. Размеры областей будут влиять как на ширину интервала W , за пределы которого ДДВ образца не выходит, так и на ширину

интервала WS , в пределах которого находится насыщенность S (НЦ) образца для каждой точки. На рис. 2 прямые сплошные линии, касательные к областям $CIE-E$ и B , продолжают до крайнего положения физически реализуемых цветов (до локуса). Точки их пересечения с локусом задают интервал ДДВ (W_B) для точки цвета B . Аналогично точечные линии задают интервал ДДВ (W_B) для точки цвета B . Насыщенность НЦ между рассматриваемыми точками изменяется в пределах 0 – 100%, 0 – непосредственно в области $CIE-E$, 100% – непосредственно на линии локуса. Это изменение иллюстрирует линия, окрашенная градиентом от белого до чёрного, со стрелкой, направление которой указывает на максимальную величину НЦ.

Расчёт показал, что величина интервала W_B меньше, чем величина интервала W_B (см. рис. 2). И для любых точек величина интервала W будет тем больше, чем величина НЦ в изображении меньше, т.е. менее насыщенные цвета определяются с меньшей точностью. Верно и обратное утверждение: величина интервала W будет тем меньше, чем величина НЦ в изображении больше.

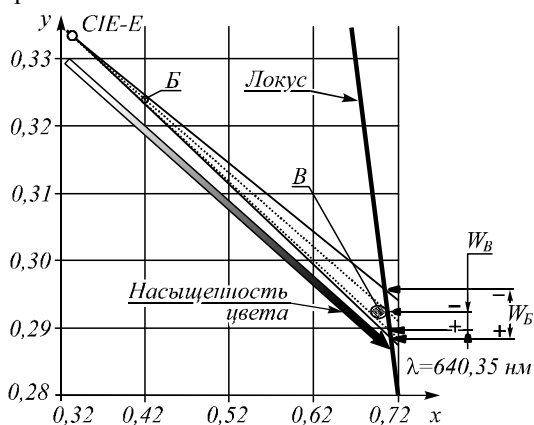


Рис. 2. Иллюстрация геометрического способа определения ДДВ образца на диаграмме цветностей с координатами (x,y) для фрагмента локуса. Символами -/+ обозначаются границы интервала W точек B и B

Из параметров цвета, рассчитанных для спектральных комбинаций RGB , методом вычислительного эксперимента найдены зависимости интервалов ДДВ и НЦ (W и WS) от насыщенности цвета (S).

Для основных точек на диаграмме цветностей определяются их области (показанные на рис. 1), с помощью которых вычисляются положительные и отрицательные значения отклонений (на локусе) при определении ДДВ образца. Величины этих отклонений обозначим за W_{B+} и W_{B-} для выбранной точки (B). Полный интервал находится как сумма расстояний между верхним W_+ и нижним W_- значениями границ интервала. Для точки B эта величина W_B , и

$$W_B = W_{B+} + W_{B-} \quad (2)$$

На рис. 3 в графическом виде даны зависимости отклонений и интервалов $W(S)$ (для ДДВ) и интервалов $WS(S)$ (для НЦ) от насыщенности цвета (S) для двух значений (209 и 253) яркости преобладающего канала при одинаковом значении ДДВ (640,35 нм).

Линии графиков построены для отклонений, а расстояния между ними соответствуют полным интервалам. Можно заметить, что интервал W тем меньше, чем яркость в преобладающем канале изображения образца больше. Кроме того, линии отклонений, характеризующие оценку точности вычисления ДДВ, не симметричны относительно нуля или относительно основной точки. Рассчитанная величина положительной составляющей интервала W_+ меньше, чем отрицательной W_- в спектральном диапазоне 394 ÷ 640 нм. Рис. 4 иллюстрирует это положение. Графики спектральной зависимости отклонений W_+ (сплошная линия) и W_- (точечная линия) построены для 11 точек, равномерно расположенных по спектру. Можно предположить, что квантование АЦП искажает в разной степени значения ДДВ, вычисляемые с помощью RGB . Графики отклонений НЦ ($WS(S)$) на рис. 3 располагаются более симметрично относительно оси абсцисс (S), чем линии $W_{+/-}$.

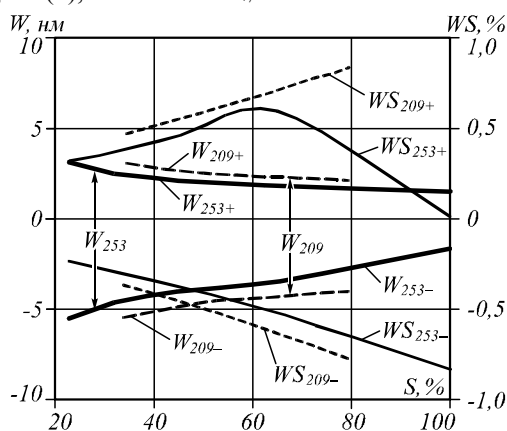


Рис. 3. Пример зависимости величины интервала значений ДДВ образца – ось W и НЦ образца – ось WS от величины насыщенности цвета S изображения

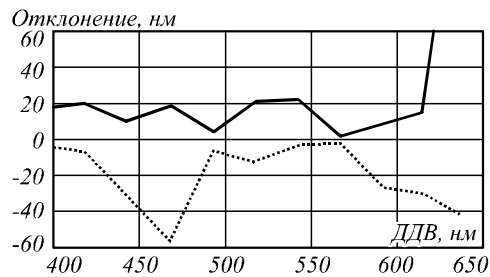


Рис. 4. Спектральная зависимость отклонений определения цветов образца

3. Оценка близости цветов

При интервальной оценке цвета близость двух цветов ($ДДВ_1 > ДДВ_2$) можно оценивать с помощью коэффициента [13] Жаккара (K_J), который определяется как отношение количества общих длин волн из интервалов шириной W_1 и W_2 (или $MAX(ДДВ_1) - MIN(ДДВ_2)$) к сумме непересекающихся элементов интервалов.

Формула для вычисления K_J имеет вид:

$$K_J = (c / (a + b - c)) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где a – ширина W_1 , b – ширина W_2 , c – интервал пересечения W_1 и W_2 .

Продemonстрируем работу коэффициента K_L на следующем примере. Результаты сведены в табл. 1. Выберем на образце шесть цветовых областей с различными длинами волн, которые обозначим литерами $A-F$ по порядку (столбец 1 в табл. 1). Для заданных значений R , G и B (столбец 2 – 4) вычислялись значения основной ДДВ (столбец 5), а также граничные значения ДДВ в положительную и отрицательную сторону от основной (столбцы 6 – 7) и величины отклонений – столбцы 8 и 9. В столбце 10 приводятся коэффициенты Жаккара, рассчитанные для пар областей, указанных в скобках. Коэффициенты позволяют

количественно выразить степень близости цветов. Результат экспертной оценки близости цветов дан в столбце 11.

Например, выберем области A и C , которые не пересекаются. Экспертная оценка покажет отсутствие близости цветов (столбец 11). Коэффициент Жаккара даёт значение 0 % (столбец 10). Выберем близкие (частично пересекающиеся) области D и F . Экспертная оценка отметит близость цветов (столбец 11). Коэффициент Жаккара даёт количественное значение этой величины 95,6 % (столбец 10).

Табл. 1. Интервальная оценка близости доминирующих длин волн цветовых областей

Обозначение	$W+$	$W-$	R	G	B	Основная ДДВ, нм	ДДВ+	ДДВ-	$K_L, \%$	Визуальная оценка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	13,1	0,3	149	148	210	390,35	403,45	390,05	0(AB)	Нет(AB)
B	10,7	7,1	149	155	151	517,85	528,55	510,75	0(BC)	Нет(BC)
C	0,1	0,1	149	161	13	563,25	563,35	563,15	0(AC)	Нет(AC)
D	5,1	10,2	149	150	194	423,15	428,25	412,95	97,4(DE)	Да(DE)
E	5,2	10,3	149	150	193	423,35	428,55	413,05	98,1(EF)	Да(EF)
F	5,3	10,5	149	150	192	423,55	428,85	413,05	95,6(DF)	Да(DF)

4. Анализ вариации параметров цвета при изменении яркости образца

Ошибка квантования сигнала фотоматрицы в процессе АЦП в каждом из каналов будет сказываться на точности определения ДДВ и НЦ. Оценим влияние яркости на вычисление ДДВ и НЦ образца при наличии квантования сигнала. Для этого зададимся выборкой из одиннадцати точек спектра с ДДВ, распределёнными по locusу равномерно. Для корректного сравнения вычисляемых параметров насыщенность выбранных цветов должна быть одинаковой. В расчётах и на графиках для предельного значения НЦ выбрана величина, равная 30,96 % (рис. 5). Расчёты показали, что невозможно превысить приведённое значение насыщенности, сохранив возможность каждой ДДВ его принимать.

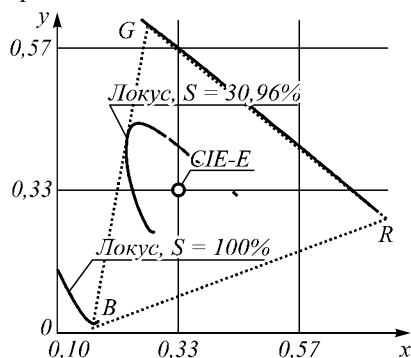


Рис. 5. Треугольник RGB и locus для насыщенности $S = 30,96 \%$ на диаграмме цветности

При таком значении насыщенности весь спектр цветов может быть найден из значений RGB. Анализ вариации параметров цвета проводился для значений НЦ в диапазоне $30,95 \div 30,96 \%$. В этом диапазоне содержится 970 ДДВ в 2236 комбинациях RGB, из которых принимались в расчёт только 11 цветов, расположенные равномерно в диапазоне $394,25 \div 640,75$ нм.

Характеристики выбранных одиннадцати значений ДДВ приведены в табл. 2. Во втором столбце приведены значения 11 ДДВ. В 3–5 столбцах находятся значения RGB выбранных цветов. Далее, в столбце 6, указана величина светимости RGB. Количество ДДВ, на значения которых АЦП существенного влияния не оказало, и ДДВ после АЦП совпали с основными ДДВ образца, что представлено в столбце 7 табл. 2.

Табл. 2. Выбранные значения ДДВ

№ п/п	ДДВ, нм	R	G	B	Светимость	Кол-во ДДВ,
1	2	3	4	5	6	7
1	394,25	73	72	147	80	1
2	418,25	82	83	171	92	3
3	442,05	114	126	253	137	9
4	468,05	89	141	240	142	36
5	492,75	12	246	192	217	92
6	517,55	28	233	97	202	33
7	542,05	111	215	100	192	49
8	566,65	244	232	134	229	79
9	590,95	247	139	102	167	26
10	614,45	229	96	83	137	9
11	640,35	215	79	74	123	2

Оценка изменений значений ДДВ и НЦ при последовательном изменении яркости в преобладающем канале на единицу производилась методом вычислительного эксперимента. В эксперименте каждый цвет задаётся 256 гарантированно разными значениями RGB путём изменения значения яркости в преобладающем канале на единицу до заполнения диапазона 8 бит, т.е. от 0 до 255, с сохранением межканального соотношения $R:G:B$. Полученные значения округляются до целых чисел, что возвращает их в шкалу квантованных значений. Для набора квантованных значений RGB вычисляется ряд значений ДДВ. В силу квантования полученные значения ДДВ для одного исходного цвета разной яркости будут в общем случае отличаться друг от друга, однако на некоторые

значения ДДВ квантование не окажет существенного влияния, и их значения останутся ровно такими, как у исходного цвета. Количество совпадений дано в седьмом столбце табл. 2 и в виде графика спектральной зависимости на рис. 6. Общее их количество лежит в пределах от 1 до 256 шт.

Чтобы выполнить сопоставление параметров цветового локуса с количеством цветов, на которые квантование не влияет, представим locus на удобной для нас координатной плоскости. Лocus – это кривая линия, составленная из отрезков, соединяющая равноотстоящие по длинам волн точки на диаграмме цветности. Соединим каждую точку локуса с точкой источника (CIE-E), которая расположена внутри цветового гамута. Построенные таким образом «углы цветности» с вершиной в CIE-E отличаются друг от друга. Спектральная зависимость разницы соседних углов приведена на рис. 6 сплошной линией 1. На рис. 6 точечная линия 2 показывает спектральную зависимость рассчитанного количества совпадений ДДВ.

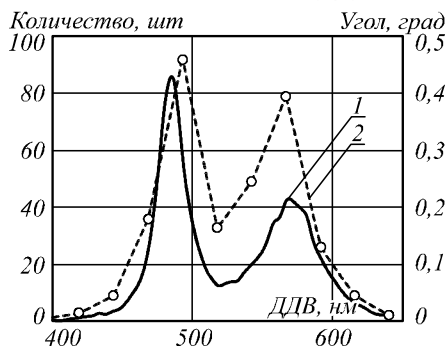


Рис. 6. Сопоставление параметров цветового локуса с количеством цветов, ДДВ которых не искажаются квантованием

Наибольшее количество совпадений ДДВ составило 92 цвета (из 256). Квантование RGB-величин приводит к искажению значений ДДВ в 64,1% случаев и более. Пики кривых 1 и 2 достигаются при близких значениях ДДВ. Мы показали, что наибольшая точность определения параметров цвета (ДДВ) имеет место быть на участках локуса, где приращение «углов цветности» наибольшее.

В результате расчётов мы обнаружили, что величины интервалов ДДВ зависят от величины яркости в преобладающем канале RGB точки и от основной ДДВ. То есть для цифрового колориметрического устройства с АЦП способность различать цвета образца обнаруживает спектральную зависимость.

Вместе с этим хорошо известно [14], что способность глаза различать цвета существенно меняется в зависимости от спектрального состава света. На рис. 7 штрихпунктирной линией показана кривая спектральной различительной способности глаза (по Райту (Wright) и Питтеру (Petter) из [14, 15]). По горизонтальной оси нанесены длины волн, а по вертикальной – наибольшие допустимые разности длин волн, при которых глаз или устройство с АЦП ещё не замечает разности в окраске. На рис. 7 сплошная, точечная и пунктирная линии показывают спектральные зависимости интервалов W , вычисленных для различных диапазонов яркостей 65–96, 161–192 и

225–256. Верхняя граница диапазона указана на соответствующей кривой. Легко видеть, что ход кривых очень близкий. На рис. 8 показан 3D-график поверхности, построенной для спектральной зависимости значений интервалов W при разных уровнях яркости. Наименьшие значения интервалов соответствуют наилучшему цветоразличению.

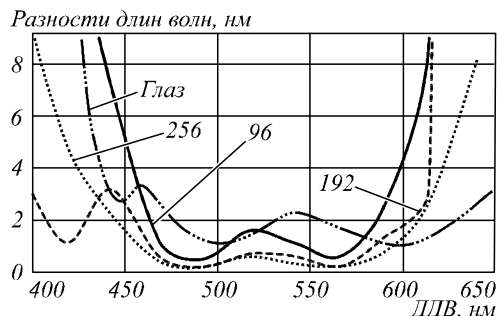


Рис. 7. Кривые различительной способности. Спектральная зависимость способности различения цвета: глазом и при помощи цифрового колориметрического устройства для градаций яркостей 96; 192 и 256 единиц

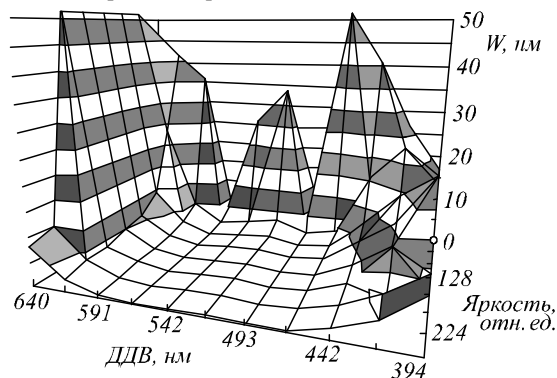


Рис. 8. Спектральная зависимость способности различения цвета при помощи цифрового колориметрического устройства для градаций яркостей в диапазоне от 0 до 255 с шагом 32 единицы

Можно предположить, что природа вариаций W и различительной способности глаза одинакова, и процесс кодирования зрительных нейронных сигналов может включать в себя процедуры, аналогичные АЦП.

Заключение

Предложен метод оценки цветоразличительной способности цифровых устройств технического зрения (за исключением ТВ-видеосигнала, характеристики которого задаются ГОСТом [16]). Разработан алгоритм нахождения интервалов значений ДДВ и НЦ образца из его цифрового изображения.

Метод вычислительного эксперимента показал, величины интервалов W и WS и количество комбинаций RGB-цветов (с заданным интервалом W) зависят от величины яркости преобладающего канала RGB. Выявлено, что цвета с меньшей яркостью имеют больший интервал W и определяются с меньшей точностью.

Показано, что близость двух разных цветов образца при интервальной оценке цвета может быть количественно определена с помощью коэффициента Жаккара.

Методом вычислительного эксперимента впервые найдена спектральная зависимость интервалов параметров цвета (ДДВ и НЦ), рассчитанных из цифровых изображений. В результате сравнения цветоразличительных способностей цифрового колориметрического устройства [7] и глаза человека (по литературным данным [14, 15]) обнаружено, что величины интервалов длин волн, в которых цвет не различим, являются близкими и ход кривых (рис. 7) сопоставим. Можно предположить, что природа спектральных вариаций W и спектральной различительной способности глаза человека одинакова. То есть процесс кодирования зрительных нейронных сигналов может включать в себя процедуры, аналогичные АЦП. Эта гипотеза расширяет рассмотрение, предпринятое в [5]. Гипотеза позволит в дальнейшем построить модель цветового зрения, которая не только учтёт собственные шумы фоторецепторов, но и опишет и предскажет расположение и форму эллипсов Мак Адама [17].

Литература

1. **Гонсалес, Р.С.** Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – Под ред. В.В. Чепыжова. – Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с. – ISBN: 5-94836-092-X, 0-13-008519-7.
2. **Прокопенко, В.Т.** Психология зрительного восприятия / В.Т. Прокопенко, В.А. Трофимов, Л.П. Шарок. – СПб: СПбГУИТМО, 2006. – 73 с.
3. **Латышов, И.В.** Возможности использования аппаратных ресурсов видеоспектрального компаратора «Docucenter Nirvis Projectina» при производстве судебно-баллистических исследований следов выстрела / И.В. Латышов, А.В. Кондаков, В.А. Васильев, М.Е. Пахомов // Судебная экспертиза: Российский и международный опыт: материалы 2-ой международной научно-практической конференции, Волгоград, 21-22 мая 2014 г. – Волгоград: ВА МВД России, 2014. – С. 181.
4. **Пальчикова, И.Г.** Цветовой анализ цифровых изображений при производстве экспертных исследований следов выстрела / И.Г. Пальчикова, И.В. Латышов, В.А. Васильев, А.В. Кондаков, Е.С. Смирнов // Доклады Академии наук Высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 2(27). – С. 88-101.
5. **Семаков, С.В.** Разработка метода и инструментальных средств для исследования характеристик цветового зрения: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.09 / Семаков Сергей Владимирович. – СПб., 2000. – 16 с.
6. **Пальчикова, И.Г.** Портативный цветовой анализатор качественных изменений мяса птицы / И.Г. Пальчикова, А.Ф. Алейников, Е.С. Смирнов, Ю.В. Чугуй, А.Н. Швыдков, К.Н. Нициевская, В.Ю. Сартаков, Т.В. Ярушин // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29, № 9. – С. 80-83.
7. **Пальчикова, И.Г.** Видеоанализатор количественных цветовых характеристик образцов / И.Г. Пальчикова, А.Ф. Алейников, Ю.В. Чугуй, В.В. Воробьев, Т.В. Ярушин, В.Ю. Сартаков, Ю.Д. Макашов, Е.С. Смирнов, А.Н. Швыдков // Приборы. – 2014. – № 12. – С. 38-44.
8. **Пальчикова, И.Г.** Особенности цветовой калибровки измерительных систем / И.Г. Пальчикова, Е.С. Смирнов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X междунар. научн. конгр., 8-18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014»: сб. материалов в 2 т.: Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 128-134.
9. Color and Vision Research Laboratory [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cvrl.org/> (дата обращения: 31.05.2016).
10. **Reinhard, E.** Color Imaging: Fundamentals and Applications / Erik Reinhard, Erum Arif Khan, Ahmet Oguz Akyuz, Garrett Johnson. – Wellesley, Massachusetts: A K Peters, Ltd./CRC Press, 2008. – 1074 p. – ISBN: 978-1568813448.
11. **Сэломон, Д.** Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с. – ISBN: 5-94836-027-X, 0-387-95260-8.
12. **Клаассен, К.Б.** Основы измерений. Датчики и электронные приборы: Учебное пособие / К.Б. Клаассен. – 3-е изд. – Долгопрудный: Издательский Дом Интеллект, 2008. – 352 с. – ISBN: 978-5-91559-001-3.
13. **Jaccard, P.** Distribution de la flore alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques regions voisines / P. Jaccard // Bulletin de la Societe Vaudoise des Sciences Naturelles. – 1901. – Vol. 37(140) – P. 241-272. – DOI: 10.5169/seals-266440.
14. **Вавилов, С.И.** Глаз и Солнце. О свете, Солнце и зрении / С.И. Вавилов. – М.: Наука, 1976. – 128 с.
15. **Кравков, С.В.** Цветовое зрение / С.В. Кравков. – М.: АН СССР, 1951. – 175 с.
16. ГОСТ 7845-92. Система вещательного телевидения. Основные параметры. Методы измерений. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
17. **MacAdam, D.L.** Color measurement: theme and variations / D.L. MacAdam. – Berlin, New York: Springer-Verlag, 1981. – 229 pp. – ISBN: 9780387107738.

Сведения об авторах

Пальчикова Ирина Георгиевна, 1954 года рождения, в 1976 году окончила Новосибирский государственный университет (НГУ) по специальностям «Физика» и «Прикладная математика». Доктор технических наук, доцент, профессор НГУ, заведующая лабораторией в ФГБУН Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН и профессор кафедры общей физики НГУ. Область научных интересов: лазерные информационные технологии, компьютерная оптика, обработка изображений, микроскопия, цифровая фотография. E-mail: palchikova@gmail.com.

Смирнов Евгений Сергеевич, 1985 года рождения, окончил в 2010 году Сибирскую государственную геодезическую академию по специальности 200203 «Оптико-электронные приборы и системы», аспирантуру НГУ по специальности 01.04.05 «Оптика», работает м.н.с. ФГБУН Конструкторско-технологического института научного приборостроения Сибирского отделения РАН. Область научных интересов: обработка графических изображений, специальные методы обработки цифровых изображений. E-mail: evgenii.s.smirnov@yandex.ru.

ГРПТИ 90.27.37

Поступила в редакцию 2 июня 2016 г. Окончательный вариант – 12 января 2017 г.

INTERVAL ESTIMATION OF COLOR PARAMETERS FROM DIGITAL IMAGES

I.G. Palchikova^{1,2}, E.S. Smirnov¹¹ Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering,
Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia,² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia**Abstract**

Influence of the analog-to-digital conversion of an input signal from a sample onto the color rendition of a colorimetric device is studied. It is shown that irrespective of the light source choice, a specific systematic quantization error is introduced to the color rendition. We analyze the quantization error for a color photomatrix with a resolution of 8 bits per channel. An algorithm for finding the interval of values of the dominant wavelength and the color saturation of the sample is developed. It is shown that the similarity of two colors in a sample can be estimated by means of the Jaccard similarity coefficient. The spectral dependence of the intervals of color parameters, calculated from digital images, is found by means of a computing experiment. It is found that lower-brightness colors have a larger interval and are calculated with a lower accuracy. A hypothesis explaining the emergence of MacAdam ellipses on the chromaticity diagram is offered, namely the coding process of the visual neural signals can include procedures similar to the analog-to-digital conversion.

Keywords: color, color measurement, color rendering, color vision, colorimetry, digital image, analog-to-digital conversion, dominant wavelength, saturation, *RGB*-space, signal quantization.

Citation: Palchikova IG, Smirnov ES. Interval estimation of color parameters from digital images. *Computer Optics* 2017; 41(1): 95-102. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-95-102.

References

- [1] Gonzales RC, Woods RE, Eddins SL. *Digital Image Processing using MATLAB*. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall; 2004. ISBN: 978-8177588989.
- [2] Prokopenko VT, Trofimov VA, Sharok LP. *Psychology of Visual Perception* [In Russian]. – Saint-Petersburg: “SPbGUITMO” Publisher; 2006.
- [3] Latyshov IV, Kondakov AV, Vasil'ev VA, Pakhomov ME. Possibilities of use of hardware resources of the video spectral comparator “Docucenter Nirvis Projectina” by production of judicial and ballistic researches of traces of a shot [In Russian]. *Judicial examination: Russian and international experience: materials of the 2nd international scientific and practical conference*, Volgograd, May 21-22, 2014: 181.
- [4] Palchikova IG, Latyshov IV, Vasilyev VA, Kondakov AV, Smirnov ES. Color analysis of digital images in expert judgement of shot's trace [In Russian] // *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences* 2015; 2(27): 88-101.
- [5] Semakov SV. Development of a method and tools for research of characteristics of color sight: Abstract of theses on degree of Candidate of Technical Sciences [In Russian]. Saint-Petersburg; 2000.
- [6] Palchikova IG, Aleynikov AF, Smirnov ES, Chugui YuV, Shvydkov AN, Niktsikevskaya KN, Sartakov VYu, Yarushin TV. Portable color analyzer of high-quality changes of fowl [In Russian]. *Achievements of science and technology of agrarian and industrial complex* 2015; 29(9): 80-83.
- [7] Palchikova IG, Aleynikov AF, Chugui YuV, Vorobyov VV, Yarushin TV, Sarktakov VYu, Makashov YuD, Smirnov ES, Shvydkov AN. Videoanalyzer of quantitative color characteristics of samples [In Russian]. *Instruments* 2014; 12: 38-44.
- [8] Palchikova IG, Smirnov ES. Features of color calibration of measuring systems [In Russian]. *InterExpo GEO-Siberia-2014: X international scientific congress*, on April 8-18, 2014, Novosibirsk; *International scientific Siboptika-2014 conference: collection of materials* 2014; 5(1): 128-134.
- [9] Color and Vision Research Laboratory. Source: <http://www.cvrl.org/>.
- [10] Reinhard E, Khan EA, Akyuz AO, Johnson G. *Color Imaging: Fundamentals and Applications*. Wellesley, Massachusetts: A K Peters, Ltd/CRC Press; 2008.
- [11] Salomon D. *Data Compression. The Complete Reference*. 4th ed. London: Springer; 2006. ISBN: 1-84628-602-5.
- [12] Klaasen KB. *Electronic Measurement and Instrumentation*. Cambridge University Press; 1996. ISBN: 0-521-47157-5.
- [13] Jaccard P. Distribution de la flore alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques regions voisines. *Bull Soc Vaudoise sci Natur* 1901; 37(140): 241-272. DOI: 10.5169/seals-266440.
- [14] Vavilov SI. *The Human eye and the sun. "Hot" and "cold" light*. Oxford: Pergamon Press Ltd.; 1965. ISBN: 978-0-08-010381-5.
- [15] Kravkov SV. *Color sight* [In Russian]. Moscow: “Academy of Sciences of the USSR” Publisher; 1951.
- [16] GOST 7845-92. *TV broadcasting system. Main settings. Measurement methods* [In Russian]. – Moscow: “IPK Izdatel'stvo standartov” Publisher; 2001.
- [17] MacAdam DL. *Color measurement: theme and variations*. Berlin, New York: Springer-Verlag; 1981. ISBN: 9780387107738.

Authors' information

Irina Georgievna Palchikova (b. 1954) graduated from Novosibirsk State University in 1976, majoring in Physics and Applied Mathematics. She received her Doctor in Physics & Maths degree from Novosibirsk State University (NSU) in 2000. Professor. Head of Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering laboratory SB

RAS, professor of NSU Physical department. Her main research interests include laser information technologies, computer optics, image processing, and microscopy. E-mail: palchikova@gmail.com.

Evgenii Sergeevich Smirnov (b. 1985) graduated from Siberian State Academy of Geodesy in 2010, majoring in Optoelectronic Devices and Systems, postgraduate student of NSU in Optics. Currently he works as the junior researcher at the Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS. Research interests include computer graphics processing, special processing of digital images. E-mail: evgenii.s.smirnov@yandex.ru.

Received June 2, 2016. The final version – January 12, 2017.
