

ИЗМЕРЕНИЕ ЦВЕТОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИК ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Со И.А.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Аннотация

В работе предложен метод измерения цветовых искажений цифровых видеоизображений в порогах цветоразличения. Метод использует предложенный ранее метод FHL измерения цветовых различий длиной кратчайшего пути в порогах цветоразличения между точками цветов, а также новые трёхмерные аппроксимации пространственно-временных характеристик зрительной системы для учёта пространственно-временных аспектов восприятия.

Ключевые слова: измерение цветовых различий, цветовые искажения, порог цветоразличения, пространственно-временные характеристики зрительной системы, пространственно-временная фильтрация.

Введение

В цифровом телевидении наряду с объективными факторами ошибок принятой информации возникают искажения, связанные со сжатием видеoinформации. Несмотря на широкое применение методов сжатия, а также на необходимость измерения искажений изображений, в настоящее время для этого нет единой принятой методологии.

В цифровых системах кодер сжатия видеoinформации является адаптивным устройством, у которого эффективность сжатия (соотношение «качество – скорость потока») меняется в зависимости от сжимаемой видеопоследовательности и текущего кадра изображения. Вследствие того, что в цифровом ТВ вещании скорость битового потока задаётся постоянной, качество изображения будет меняться в зависимости от «сложности» видеосюжета. Возможность измерения искажений сжатия позволит управлять распределением битовой скорости различным программам, входящим в состав одного транспортного потока, для оптимального выбора битовых скоростей этих программ с достижением минимальной величины суммарных искажений. Методы измерения искажений видеоизображений также могут применяться для сравнения эффективности различных методов сжатия.

Главным требованием, выдвигаемым к объективным методам, является корреляция их результатов с восприятием искажений. Для этого в них используется математическая модель зрительной системы (ЗС).

Большинство существующих методов на основе различных моделей ЗС, например [1 - 4], вообще не учитывают цветовые искажения. В других методах [5 - 6] используются цветовые пространства, в которых цветовые различия определяются с большой погрешностью (>100%).

Можно выделить следующие недостатки существующих методов измерения искажений видеоизображений:

1. Методы либо вообще не определяют цветовые искажения, либо используют приближённые методы измерения цветовых различий.
2. Методы используют или только пространственные, или отдельные пространственные и временные

характеристики зрительной системы, хотя изменения во временной области влияют на восприятие в пространственной области, и наоборот.

3. Методы дают абстрактную оценку искажений в абстрактных единицах.

Целью данной работы является разработка метода измерения цветовых искажений с использованием характеристик зрительной системы.

В разделе 1 описан предложенный ранее в работе [7] метод FHL измерения цветовых различий длиной кратчайшего пути в порогах цветоразличения между точками цветов и приведено сравнение погрешностей этого метода и известных методов.

В разделе 2 описаны основные характеристики зрительной системы, определяющие восприятие искажений, а также показаны недостатки существующих аппроксимаций.

В разделах 3-4 получены аппроксимации трёхмерных пространственно-временных контрастно-частотных характеристик (КЧХ) яркостного и цветоразностных каналов ЗС.

В разделе 5 предложен метод измерения цветовых искажений видеопоследовательности с использованием метода FHL и пространственно-временных КЧХ зрительной системы.

В разделе 6 приведено сравнение коэффициентов корреляции с экспертными оценками результатов предлагаемого метода измерения цветовых искажений и результатов, полученных с помощью известных методов измерения цветовых различий.

1. Метод измерения цветовых различий

1.1. Об измерении цветовых различий

Измерение цветовых различий относится к области высшей метрики цвета и находит применение в телевидении, полиграфии, лакокрасочной, текстильной, бумажной промышленности и т.д.

Цветовые различия принято измерять в порогах цветоразличения. Фундаментальными данными о порогах цветоразличения зрительной системы считаются данные Мак Адама [8], который определил 25 т.н. пороговых эллипсов цветоразличения на графике цветового пространства МКО 1931. Цвета внутри порогового эллипса неразличимы зрительной системой человека. Цветовое различие объек-

тивно равно длине кратчайшего пути в порогах цветоразличения между точками цветов.

Пространство МКО 1931 является неравномерным, поскольку порог цветоразличения, принятый за единицу измерения, различен в разных точках пространства, и анизотропным, поскольку для определённой точки порог цветоразличения зависит от направления. Поэтому кратчайший путь в порогах цветоразличения между точками цветов не лежит на прямой. Цветовое пространство, в котором единица измерения цветовых различий имеет постоянную величину, называют равноконтрастным. В равноконтрастном пространстве пороги цветоразличения предстанут окружностями одинакового радиуса.

Первая попытка создать равноконтрастное пространство была предпринята Джаддом ещё в 1935 году. Впоследствии были предложены пространства Джадда, Мак Адама, Шредингера, Г. Вышецки и др. [9], а также различные модификации известных пространств, например, пространства *CIELUV*, *CIELAB*, Наятани, Ханта, *RLAB*, *ATD*, *LLAB*, *CIECAM97*, *CIECAM02*, *CIEDE2000* [10, 11]. Согласно Мак Адаму, «чтобы получить идеальные окружности, необходимо использовать не плоскость, а искривлённую поверхность. Эта поверхность напоминает смятую фетровую шляпу с выпуклостью посередине, гофрированную по краям, неровную и кривую на остальных участках» [12]. Известно, что строго равноконтрастное пространство является неевклидовым, поэтому большинство известных пространств, предложенных как евклидовы, априори не позволяют объективно измерять цветовые различия. В работах [13, 14] предложены неевклидовы пространства, однако всё ещё характеризующиеся значительной относительной погрешностью (~20%).

Существующие методы измерения цветовых различий обычно обладают следующими недостатками:

- используемые в этих методах цветовые пространства являются приближённо равноконтрастными;
- не учитывают пороги цветоразличения в других точках, для которых нет экспериментальных данных, что может привести к неадекватным результатам в этих точках пространства.

1.2. Метод измерения цветовых различий

В работе [7] был предложен новый метод FNL объективного измерения цветового различия как длины кратчайшего пути в порогах цветоразличения между точками цветов. Важным отличием указанного метода является то, что в нём не предлагается равноконтрастное пространство, а предлагается метод нахождения кратчайшего пути в порогах цветоразличения между точками цветов, который в неравноконтрастном пространстве не лежит на прямой.

Для получения порогов цветоразличения в любой точке цветового пространства была предложена модель цветоразличения зрительной системы [15] на основе интерполяции или аппроксимации экспери-

ментальных данных Мак Адама. Возможность применения методов интерполяции или аппроксимации обусловлена закономерным и плавным изменением ориентации и размеров экспериментальных эллипсов цветоразличения.

Поскольку невозможно полностью «распрямить» цветовое пространство на плоскости, в методе FNL предлагается осуществить «распрямление» пространства вдоль линии между точками цветов, которая соответствует кратчайшему пути, при этом область в окрестности этого кратчайшего пути будет равноконтрастной. По мере удаления от этой линии пространство искривляется. Упомянутое «распрямление» пространства вдоль линии производим с помощью локальных преобразований малых областей пространства. В малой области неравноконтрастного пространства МКО 1931 эллипсы цветоразличения имеют практически одинаковую форму и ориентацию. Поэтому с помощью преобразования T малой области, которое заключается в её повороте и масштабировании, можно получить малую равноконтрастную область:

$$T : \begin{pmatrix} f_{отн} \\ h_{отн} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ a(x, y) & 1 \\ 0 & b(x, y) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(-\theta(x, y)) & -\sin(-\theta(x, y)) \\ \sin(-\theta(x, y)) & \cos(-\theta(x, y)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{отн} \\ y_{отн} \end{pmatrix},$$

где $a(x, y)$ и $b(x, y)$ – полуоси эллипсов цветоразличения, $\theta(x, y)$ – угол наклона большой полуоси эллипсов цветоразличения, $x_{отн}$ и $y_{отн}$ – координаты точки в локальной относительной системе координат малой области исходного пространства, $f_{отн}$ и $h_{отн}$ – координаты точки в локальной относительной системе координат малой области нового пространства.

В силу того, что изначально нам не известен кратчайший путь между двумя точками цветов в неравноконтрастном пространстве, будем «распрямлять» область вдоль произвольной линии, например, вдоль отрезка прямой между точками рассматриваемых цветов A и B . В результате получим новую область, более равноконтрастную в окрестности истинного кратчайшего пути между точками цветов. В этой новой области отрезок $A'B'$ прямой между точками цветов располагается ближе к истинному кратчайшему пути. Отобразив отрезок прямой в новой области в соответствующий участок линии в исходном пространстве, будем осуществлять «распрямление» уже вдоль полученной линии. Можно производить дальнейшие итерации «распрямления» для достижения необходимой точности. В большинстве случаев для решения практических задач, в которых обычно требуется измерять небольшие цветовые различия, достаточно единственной итерации. Цветовое различие определяется как евклидово рас-

стояние между точками цветов в новой области пространства, полученной на последней итерации «распрямления»:

$$d_{fh} = \sqrt{(f_B - f_A)^2 + (h_B - h_A)^2}$$

порогов цветоразличения, где f_A, h_A и f_B, h_B - координаты точек A' и B' в новой области пространства fh .

«Распрямление» вдоль линии на основе локальных преобразований T определяется формулами:

$$f = \int \frac{1}{a_x} (\cos(-\theta_x) - \operatorname{tg} \alpha_x \sin(-\theta_x)) dx,$$

$$h = \int \frac{1}{b_x} (\sin(-\theta_x) + \operatorname{tg} \alpha_x \cos(-\theta_x)) dx,$$

или для численных расчётов:

$$f = \sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i(x, y)} (\Delta x \cos(-\theta_i(x, y)) - \Delta y \sin(-\theta_i(x, y))),$$

$$h = \sum_{i=1}^n \frac{1}{b_i(x, y)} (\Delta x \sin(-\theta_i(x, y)) + \Delta y \cos(-\theta_i(x, y))),$$

где α_x - угол наклона линии «распрямления», n - число разбиений линии «распрямления».

На рис. I и II (цветная вкладка, стр. 405) представлены примеры областей fh , полученных на первой и пятой итерациях «распрямления» вдоль линии между достаточно удалёнными точками цветов в неравноконтрастном пространстве и длины путей D вдоль этих линий в порогах цветоразличения, а также соответствующие участки кривой на неравноконтрастном графике МКО 1931.

Видно, что на первой итерации вдоль участка кривой l_1' в новой области, которая соответствует отрезку l прямой в неравноконтрастном пространстве, пороги цветоразличения превратились в окружности одинакового радиуса, а вдоль отрезка d_1' прямой между точками цветов пространство искривлено (пороги выражены эллипсами). На пятой итерации уже вдоль отрезка d_5' прямой между точками цветов получена равноконтрастная область. Соответствующий кратчайший путь d на неравноконтрастном графике МКО 1931 проходит по кривой.

Можно заметить, что длины путей на первой и пятой итерациях, $D = 102,261$ и $D = 103,779$ порогов не сильно различаются, а разница в значениях длины пути на пятой и шестой итерациях составляет 0,001 порога.

Известно, что при яркостях L объекта, меньших яркости фона, для всех цветов характерно увеличение порогов цветоразличения, в то время как для цветов, яркость которых больше яркости фона, по-

рог цветоразличения достигает стабильного минимального значения. Зависимости изменения порога цветоразличения от соотношения яркости объекта и фона приведены в [9]. Если яркость объекта меньше яркости фона, эти зависимости можно учесть и использовать метод FHL для новых значений порогов цветоразличения.

1.3. Сравнение точности предлагаемого метода FHL с известными методами

Для сравнения точности предлагаемого метода FHL, например, с использованием модели зрительной системы [15] на основе интерполяции методом изгиба тонкой пластины (*TPS, thin plate spline*), и известных методов будем использовать данные Мак Адама. В таблице приведены результаты измерений 50 пар цветов (полуосей пороговых эллипсов) для предлагаемого метода FHL с одной итерацией «распрямления» и классического критерия CIELAB 1976, а также последнего принятого МКО стандарта CIEDE 2000 [11].

Таблица 1. Результаты измерений 50 полуосей эллипсов Мак Адама

	CIELAB	CIEDE2000	FHL
Минимальное значение полуоси эллипса	0,3379	0,2445	0,9868
Максимальное значение полуоси эллипса	2,3202	2,0166	1,0028
Среднее	0,9730	0,6997	0,9996
СКО	0,5180	0,3835	0,0022

Из таблицы видно, что относительная погрешность методов CIELAB и CIEDE2000 превышает 100%, в то время как относительная погрешность предлагаемого метода FHL ~1%. Следует отметить, что погрешность предлагаемого метода зависит от погрешности используемых для построения модели цветоразличения методов интерполяции и аппроксимации, числа итераций «распрямления», а также от точности применяемых численных вычислений.

На рис. 1 представлены частотные гистограммы распределения результатов измерения полуосей пороговых эллипсов Мак Адама для методов FHL, CIELAB и CIEDE2000.

В работе [13] рассмотрен метод на основе анализа скалярной кривизны цветового пространства и приведены результаты 25 измерений, для которых среднее составляет 0,8112, СКО - 0,0064, а относительная погрешность результатов измерения ~17%.

Таким образом, предлагаемый метод FHL обладает наименьшей среди других методов погрешностью (~1%) и наименьшим разбросом (СКО = 0,0022) относительно экспериментальных данных о порогах цветоразличения зрительной системы.

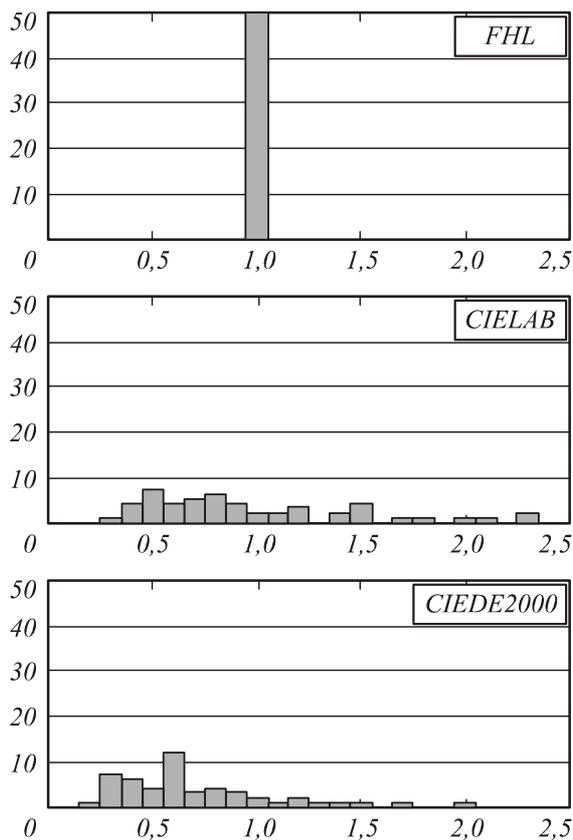


Рис. 1. Частотные гистограммы распределения результатов измерения полуосей пороговых эллипсов Мак Адама для методов FHL, CIELAB и CIEDE2000

1.4. Область применения метода FHL измерения цветовых различий

Вследствие того, что метод FHL основан на экспериментальных данных о порогах цветоразличения, измеренных при наблюдении статических цветовых стимулов достаточного углового размера (2 градуса и выше), предпочтительное применение этого метода состоит в измерении цветовых различий статических образцов, например, в полиграфии, лакокрасочной, текстильной и бумажной промышленности.

Для измерения искажений видеоизображений желательно дополнительно к методу FHL учитывать такие главные факторы восприятия, как меньшая чувствительность к мелким деталям и быстрым изменениям зрительных стимулов во времени. Для этого нужно использовать пространственно-временные характеристики зрительной системы.

2. Характеристики ЗС

2.1. О возможности и границах применения теории линейной фильтрации к зрительной системе

Известно, что зрительную систему можно представить множеством независимых узкополосных резонансных фильтров [16]. Путём настройки откликов этих фильтров зрительная система формирует оптимальные в конкретных условиях наблюдения характеристики результирующего фильтра. Опти-

мальность определяется условиями наблюдения, такими как яркость фона адаптации, а также самим зрительным стимулом. Зрительная система приближенно линейна при невысоких контрастах и постоянном значении яркости адаптации [16-18]. Нелинейные свойства зрительной системы (эффект Маха) проявляются при больших контрастах [16]. Вследствие того, что адаптационные процессы в зрительной системе в значительной степени инерционны [9] и в телевидении яркость фона адаптации (дневной свет, искусственное освещение, темнота) можно считать практически постоянной, а также учитывая то, что реальные сцены обычно не содержат высококонтрастных элементов, можно допустить возможность применения к зрительной системе теории линейной фильтрации. Также для определённого расстояния наблюдения, например, $6H$ в стандартном телевидении, где H – высота изображения, можно принять, что и оптические параметры зрительной системы не сильно меняются во времени. Таким образом, в случае, когда условия наблюдения по существу постоянны, например, при телевизионном просмотре, для расчёта искажений можно рассматривать конкретные характеристики результирующего фильтра, формируемые зрительной системой в этих условиях.

Для дальнейшего рассмотрения характеристик зрительной системы в рамках теории линейной фильтрации будем использовать основные положения современной стадийной теории цветового зрения [10], согласно которой на стадии пострецепторной (нейронной) обработки информации в зрительной системе справедливы положения теории Геринга о наличии в зрительной системе яркостного и двух цветоразностных каналов: красно-зелёного RG и жёлто-синего BY . Некоторые подтверждения этих теорий получены электрофизиологическими методами [14]. Рассмотрим характеристики зрительной системы, их аппроксимации и недостатки известных аппроксимаций.

2.2. Двумерная разрешающая способность ЗС

Экспериментальная оценка зависимости разрешающей способности зрительной системы по полю зрения производилась по предельному разрешению синусоидальных и штриховых мир. На рис. 2 приведена зависимость двумерной разрешающей способности зрительной системы по данным работы [19]. Она имеет вид ромба. Разрешающая способность зрительной системы для наклонных штрихов (т.н. диагональных пространственных частот) меньше разрешающей способности для горизонтальных и вертикальных штрихов. Другие исследования также подтверждают характер изменения разрешения по полю зрения [19-21].

2.3. Контрастно-частотные характеристики яркостного канала ЗС

Под пространственной (или временной) контрастно-частотной характеристикой ЗС понимают зависимость воспринимаемого контраста от пространственной (или временной) частоты.

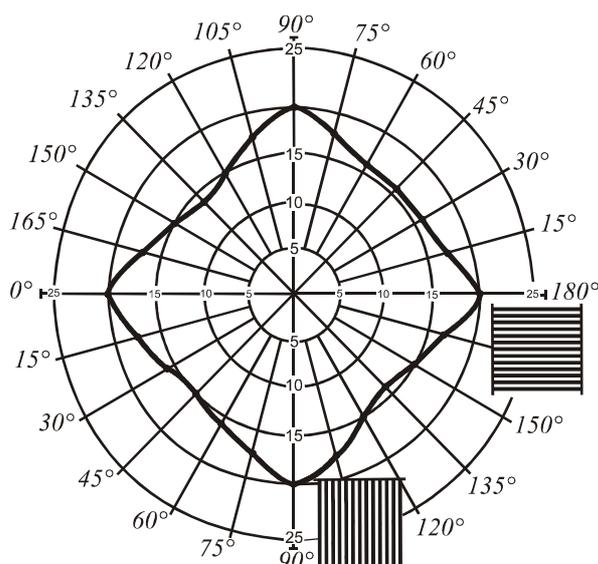


Рис. 2. Зависимость разрешающей способности ЗС по полю зрения [19, стр. 59]

Для измерения пространственных КЧХ используют тестовые объекты с синусоидальным изменением яркости по пространственной координате. Одномерные пространственные КЧХ впервые измерил О. Шаде [22] для разных яркостей поля адаптации (рис. 3).

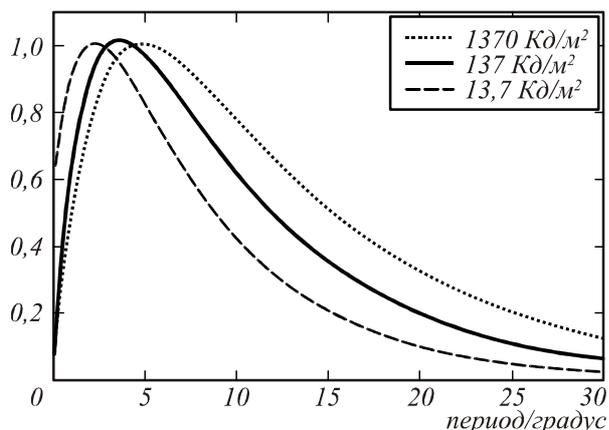


Рис. 3. Нормированные пространственные КЧХ зрительной системы, измеренные О. Шаде [22]

Другие измерения КЧХ [16, 23-24] согласуются с данными Шаде.

КЧХ имеет спад в области низких частот, обусловленный процессами торможения в зрительной системе, и спад в области высоких частот, связанный с характеристиками оптической системы зрительного анализатора и определяющий меньшую чувствительность зрительной системы к мелким деталям [22, 24].

Отметим, что пространственную разрешающую способность зрительной системы можно также определить как пространственную частоту, для которой значение КЧХ соответствует уровню пороговой модуляции, например, 0,1.

Шаде [22] предложил аппроксимацию функций Гаусса с учётом спада КЧХ в области низких частот введением дополнительного отрицательного слагаемого, моделирующего процессы торможения в зрительной системе с помощью отрицательной обратной связи:

$$V_{Sch}(w) = \frac{1}{\max} \left(Ep \cdot e^{-\left(\frac{w}{Np}\right)^2} - Em \cdot e^{-\left(\frac{w}{Nm}\right)^2} \right),$$

где w – пространственная частота, $1/\max$ – нормирующий множитель, Np и Nm – постоянные, определяемые на уровне $1/e$.

Двумерную аппроксимацию (рис. III, цветная вкладка, стр. 405) на основе этой одномерной аппроксимации гауссовыми функциями можно определить как

$$V_{Sch}(w_x, w_y) = \frac{1}{\max} \times \left(Ep \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{Np}\right)^2} - Em \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{Nm}\right)^2} \right),$$

где w_x , w_y – горизонтальные и вертикальные пространственные частоты, соответственно. Недостатком этой аппроксимации является то, что она имеет сечение на пороговой глубине модуляции в виде круга и, следовательно, постоянное разрешение по полю зрения, что не согласуется с экспериментальными данными (рис. 2).

В работе [25] двумерная пространственная КЧХ аппроксимирована произведением экспоненциальных функций:

$$V_{exp}(w_x, w_y) = e^{-\frac{w_x}{N}} \cdot e^{-\frac{w_y}{N}} = e^{-\frac{w_x + w_y}{N}}.$$

Она имеет ромбовидную разрешающую способность (рис. IV, цветная вкладка, стр. 405), однако применима только в области высоких частот, так как в области низких частот не только не имеет характерного низкочастотного спада, но даже имеет завышенное значение при условии соответствия аппроксимации значениям КЧХ в области высоких частот.

Уточнение аппроксимации в области низких частот было предложено в работе [26]. За основу была взята идея Шаде о моделировании тормозящих процессов отрицательной обратной связью. Была предложена следующая аппроксимация экспоненциальными функциями:

$$V_{Pol}(w_x, w_y) = \frac{1}{\max} \left(Ep \cdot e^{-\frac{w_x}{Np}} - En \cdot e^{-\frac{w_x}{Nm}} \right) \times \left(Ep \cdot e^{-\frac{w_y}{Np}} - En \cdot e^{-\frac{w_y}{Nm}} \right).$$

Однако в этой аппроксимации перемножение функций, имеющих спад в области низких частот, даёт резкое уменьшение разрешающей способности в горизонтальном и вертикальном направлениях, что совершенно противоречит экспериментальным данным (рис. V, цветная вкладка, стр. 406).

Робсон [27] измерил пространственные КЧХ для различных временных частот (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что значение временной частоты пространственной решётки влияет на вид пространственной КЧХ. Чем выше временная частота, тем меньше по амплитуде пространственные КЧХ, т.е. меньше контрастная чувствительность, и тем менее выражен спад в низких частотах, обусловленный процессами торможения в зрительной системе. Таким образом, зрительная система характеризуется неразделимыми по пространственным и временным координатам контрастно-частотными характеристиками. Однако существующие аппроксимации предложены только в пространственной частотной области и не отражают временных аспектов восприятия.

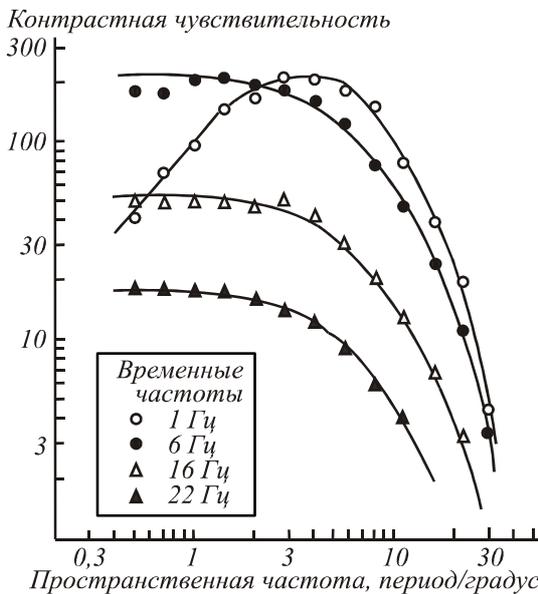


Рис. 4. Пространственные КЧХ для различных временных частот, измеренные Робсоном [27]

3. Предлагаемая аппроксимация трёхмерной пространственно-временной КЧХ яркостного канала ЗС

Для учёта особенностей восприятия зрительной системой мелких деталей и быстрых изменений стимулов во времени следует учитывать трёхмерные пространственно-временные КЧХ зрительной системы.

Наиболее подходящими для телевизионных условий наблюдения являются одномерные КЧХ, измеренные в работах [22, 27], так как в этих экспериментах наблюдение было бинокулярным без использования т.н. искусственного зрачка (без искусственного сужения или расширения зрачка).

Ввиду рассмотренных недостатков существующих аппроксимаций предлагается новая аппроксимация,

полученная из нового предположения о том, что на диагональных частотах меньше контрастная чувствительность, а вследствие этого меньше и разрешающая способность. Это означает изменение амплитуды двумерной КЧХ, а не полосы частот, как в известных аппроксимациях.

Изменение амплитуды будем производить делением функции исходной КЧХ на коэффициент K . В качестве функции исходной КЧХ будем использовать двумерную аппроксимацию гауссовыми функциями на основе одномерной аппроксимации Шаде [22]. Общий вид предлагаемой КЧХ следующий:

$$V_{my}(w_x, w_y, f) = \frac{1}{K} \times \left(Ep(f) \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{Np(f)}\right)^2} - Em(f) \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{Nm(f)}\right)^2} \right)$$

Определим коэффициент K следующим образом. На рис. 5 показано сечение исходной функции КЧХ в виде круга и ромб $ABCD$. Определим K для произвольной точки P как отношение радиуса R круга к длине отрезка OS прямой $y_{line} = (w_{xP} / w_{yP}) \cdot w_x$ из центра O круга до точки S пересечения со стороной $y_{rhomb} = -w_x + R$ ромба $ABCD$. Из $(w_{xP} / w_{yP}) \cdot w_x = -w_x + R$ найдём координаты точки S :

$$w_{xS} = \frac{R \cdot w_{xP}}{w_{xP} + w_{yP}}, \quad w_{yS} = \frac{R \cdot w_{yP}}{w_{xP} + w_{yP}}$$

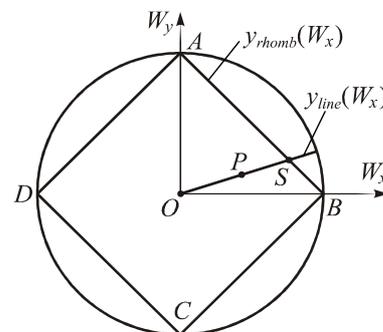


Рис. 5. К определению коэффициента K

В силу симметрии функции КЧХ, коэффициент K можно определить как:

$$K = \frac{R}{\sqrt{w_{xS}^2 + w_{yS}^2}} = \frac{R}{\sqrt{\left(\frac{R \cdot |w_{xP}|}{|w_{xP}| + |w_{yP}|}\right)^2 + \left(\frac{R \cdot |w_{yP}|}{|w_{xP}| + |w_{yP}|}\right)^2}},$$

или $K = \frac{|w_{xP}| + |w_{yP}|}{\sqrt{|w_{xP}|^2 + |w_{yP}|^2}}.$ (1)

Выражение (1) имеет ограничения в точке $w_{xP} = 0$ или $w_{yP} = 0$ (знаменатель обращается в 0). В случае, когда $w_{xP} = 0$ (вертикальные частоты) и $w_{yP} = 0$ (горизонтальные частоты), K должно рав-

няться 1, так как для горизонтальных и вертикальных частот разрешающая способность максимальна и остаётся неизменной. Однако во избежание скачков в области низких частот определим K для горизонтальных и вертикальных частот как

$K = \frac{0,41 \cdot e^{-w}}{10 \cdot w + 1} + 1$, чтобы привести КЧХ в центре к общему значению, соответствующему максимальному значению K , равному 1,41.

Таким образом, определим K следующими выражениями:

$$K(w_x, w_y) = \frac{|w_x| + |w_y|}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}, \text{ если } w_x \cdot w_y \neq 0,$$

$$K(w_x, w_y) = \frac{0,41e^{-|w_x|}}{10|w_x| + 1} + 1, \text{ если } w_y = 0,$$

$$K(w_x, w_y) = \frac{0,41e^{-|w_y|}}{10|w_y| + 1} + 1, \text{ если } w_x = 0.$$

По данным работы [27] найдём значения параметров Np , Nm и Ep для различных временных частот f , найдя аппроксимации двумерных пространственных КЧХ для этих временных частот. Найденные значения параметров Np , Nm и Ep аппроксимируем, например, с помощью степенных многочленов:

$$Np(f) = -0,0008f^3 + 0,0331f^2 - 0,4224f + 9,6972,$$

$$Nm(f) = 0,0001f^3 - 0,0018f^2 - 0,0576f + 1,3051,$$

$$Ep(f) = -0,002005f^4 + 0,13992f^3 - 2,8483f^2 + 6,1523f + 248,53,$$

$$Em(f) = 0,00075955f^4 - 0,073169f^3 + 2,5751f^2 - 39,393f + 224,53.$$

Тогда предлагаемая аппроксимация будет определяться выражением:

$$V_{my}(w_x, w_y, f) = \frac{1}{260K(w_x, w_y)} (Ep(f)e^{\left(\frac{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{Np(f)}\right)^2} - Em(f)e^{\left(\frac{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{Nm(f)}\right)^2} + Ep(f)q(\sqrt{w_x^2 + w_y^2})).$$

Поправка

$$Ep(f)q(w) = \frac{1}{10000} (-0,00693w^4 + 0,95359w^3 - 43,15927w^2 + 645,48616w - 145,82557)$$

введена для получения аппроксимации для яркости адаптации ~ 140 Кд/м².

Двумерная пространственная КЧХ, которая является сечением предлагаемой трёхмерной аппрок-

симации $V_{my}(w_x, w_y, f)$ на нулевой временной частоте $f = 0$ Гц, имеет спад в области низких частот и ромбовидную разрешающую способность по полю зрения (рис. VI-VII, цветная вкладка, стр. 406), что согласуется с экспериментальными данными (рис. 2).

На рис. 6 показаны экспериментальные данные О. Шаде для яркости поля адаптации ~ 140 Кд/м² и данные Робсона для яркости поля адаптации 20 Кд/м², а также предлагаемые аппроксимации: $V_{my}(w, 0, 0)$ и $V_{my}(w, w, 0)$ для горизонтальных и диагональных частот при временной частоте $f = 0$ Гц и $V_{my}(w, 0, 16)$ при временной частоте $f = 16$ Гц. Аппроксимация $V_{my}(w, 0, 16)$ для временной частоты $f = 16$ Гц проходит выше экспериментальных данных Робсона, так как была введена поправка $Ep(w)q(w)$ для получения КЧХ, соответствующей яркости ~ 140 Кд/м². Из рис. 6 видно, что амплитуда (контрастная чувствительность) диагональных КЧХ $V_{my}(w, w, 0)$ меньше и, соответственно, меньше разрешающая способность.

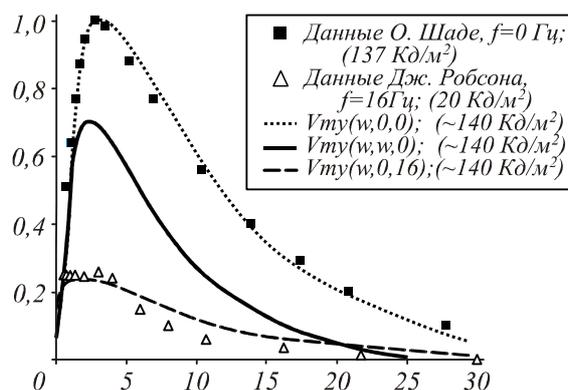


Рис. 6. Экспериментальные данные [22, 27] и аппроксимации одномерных КЧХ яркостного канала ЗС для горизонтальных и диагональных частот при временных частотах $f = 0$ Гц, $f = 16$ Гц

4. Предлагаемые аппроксимации трёхмерных КЧХ цветоразностных каналов ЗС

Цветовое восприятие зрительной системы зависит от углового размера цветовых стимулов и скорости их изменения во времени. Поэтому для измерения цветовых искажений видеопоследовательности следует также учитывать трёхмерные пространственно-временные КЧХ цветоразностных каналов зрительной системы.

В качестве исходных экспериментальных данных возьмём одномерные пространственные и временные КЧХ цветоразностных каналов по данным работы [28]. Пока нет единого мнения о наличии спада КЧХ цветоразностных каналов зрительной системы в области низких частот, а также о форме двумерной разрешающей способности для цветоразностных каналов. Однако имеются данные, что разрешающая способность постоянна по полю зре-

ния, т.е. имеет форму круга [29]. Поэтому будем использовать для аппроксимации трёхмерной КЧХ цветоразностных каналов функции Гаусса.

Аппроксимацию трёхмерной КЧХ ВУ-канала зрительной системы определим формулами:

$$Np(f) = 0,0004f^2 + 0,1915f + 5,1973,$$

$$Ep(f) = 0,0003f^3 - 0,0047f^2 - 0,0113f + 0,4386,$$

$$V_u(w_x, w_y, f) = \frac{1}{0,4386} \cdot Ep(f) \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{Np(f)}\right)^2}.$$

На рис. VIII (цветная вкладка, стр. 406) показано двумерное сечение трёхмерной КЧХ ВУ-канала зрительной системы на нулевой временной частоте ($f = 0$ Гц).

Аппроксимацию трёхмерной КЧХ RG-канала зрительной системы определим формулами:

$$Np(f) = 0,0002f^3 + 0,011f^2 + 0,0304f + 8,1964,$$

$$Ep(f) = 0,0005f^3 - 0,0127f^2 + 0,008f + 1,0446,$$

$$V_v(w_x, w_y, f) = \frac{1}{1,0446} \cdot Ep(f) \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{Np(f)}\right)^2}.$$

На рис. IX (цветная вкладка, стр. 406) показано двумерное сечение трёхмерной КЧХ RG-канала зрительной системы на нулевой временной частоте ($f = 0$ Гц).

5. Метод измерения цветовых искажений видеоизображений

5.1. Пространственно-временная фильтрация видеоизображения

Пространственно-временная фильтрация сигналов видеоизображения позволяет учесть такие главные факторы восприятия, как меньшая чувствительность зрительной системы к мелким деталям и быстрым изменениям стимулов во времени. По существу, после пространственно-временной фильтрации мы получим видеоизображения, аналогичные изображениям на выходе зрительной системы.

Пространственно-временную фильтрацию яркостного и цветоразностных сигналов видеоизображения будем осуществлять с помощью дискретной свёртки этих сигналов с трёхмерными импульсными характеристиками яркостного и цветоразностных каналов зрительной системы, которые были получены с помощью обратного преобразования Фурье функции КЧХ.

5.2. Метод измерения цветовых искажений видеоизображений

Предлагаемый метод измерения цветовых искажений видеоизображений с использованием характеристик цветоразличения и пространственно-временных характеристик зрительной системы включает:

- пространственно-временную фильтрацию яркостного и двух цветоразностных сигналов видео-

изображения для исходной и искажённой видеопоследовательностей;

- расчёт среднего по кадру значения цветовых различий пикселей отфильтрованных кадров методом FHL:

$$C_k = \frac{1}{M_p} \sum_{i=1}^{M_p} FHL(\tilde{I}_{ref}(i, k), \tilde{I}_{test}(i, k)),$$

где M_p – число пикселей в кадре, k – номер кадра, $\tilde{I}_{ref}(i, k)$, $\tilde{I}_{test}(i, k)$ – i -е пиксели k -го кадра отфильтрованных исходной и искажённой видеопоследовательностей соответственно.

Для определения характеристики цветовых искажений всей видеопоследовательности можно использовать среднее значение цветовых искажений кадров:

$$\bar{C} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M C_k,$$

где M – число кадров видеопоследовательности.

На рис. 7 представлены средние по кадру цветовые искажения в порогах цветоразличения, полученные предлагаемым методом FHL для предварительно отфильтрованных и нефильтрованных исходной и искажённой видеопоследовательностей Shields№16 из базы данных LIVE Video Quality Database [30-31], а также методами CIELAB и CIEDE2000.

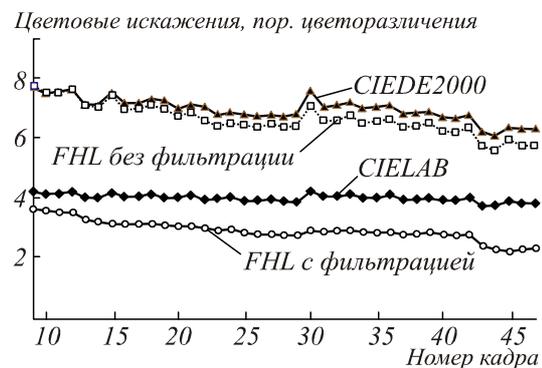


Рис. 7. Средние по кадру цветовые искажения в порогах цветоразличения

Можно заметить, что средние значения цветовых искажений, полученные методами FHL и CIEDE2000, близки. Величина цветовых искажений для фильтрованной видеопоследовательности меньше, чем для нефильтрованной, так как пространственно-временная фильтрация соответственно уменьшает вклад менее заметных для зрительной системы искажений.

6. Сравнение результатов измерения с экспертными оценками

Для оценки эффективности предлагаемого метода использовалась база данных LIVE Quality Database [30-31], содержащая исходные и искажённые видеопоследовательности, а также разностные экспертные оценки качества видеоизображений. Были рассчита-

ны средние цветовые искажения сжатых кодером MPEG-2 видеосюжетов *Mobile Calendar*, *Pedestrian Area*, *Riverbed*, *Rush hour* и *Station* (всего 20 искажённых видеопоследовательностей) с помощью методов CIELAB, CIEDE2000 и предлагаемого метода FHL измерения цветовых искажений с применением пространственно-временной фильтрации (для расстояния наблюдения 4H согласно эксперименту). Коэффициенты корреляции Пирсона с разностными экспертными оценками приведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Пирсона результатов измерения цветовых искажений с разностными экспертными оценками качества видеоизображений

	CIELAB	CIEDE2000	FHL с фильтрацией
Коэффициент корреляции Пирсона	0,20	0,37	0,94

Из табл. 2 видно, что предлагаемый метод обладает лучшей корреляцией с экспертными оценками по сравнению с методами CIELAB и CIEDE2000 на 74% и 57%, соответственно.

Выводы

1) Описан предложенный ранее метод FHL измерения цветовых различий длиной кратчайшего пути в порогах цветоразличения между точками цветов, который обладает наименьшей погрешностью (~1%) среди других известных методов.

2) Предложена аппроксимация трёхмерной пространственно-временной КЧХ яркостного канала зрительной системы на основе нового предположения о том, что меньшая разрешающая способность на диагональных частотах является следствием меньшей контрастной чувствительности на этих частотах.

3) Предложенная аппроксимация адекватно отражает характеристики зрительной системы, поскольку позволяет одновременно учитывать спад КЧХ в области низких частот, обусловленный процессами торможения, и ромбовидную разрешающую способность по полю зрения, чего лишены существующие аппроксимации.

4) Предложены аппроксимации трёхмерных пространственно-временных КЧХ цветоразностных каналов зрительной системы.

5) Предложен метод измерения цветовых искажений видеопоследовательности с использованием характеристик цветоразличения и пространственно-временных характеристик зрительной системы, что позволяет учесть особенности восприятия информации в пространственно-временной области и измерить цветовые различия в порогах цветоразличения. Для предлагаемого метода коэффициент корреляции Пирсона с экспертными оценками больше, чем для методов CIELAB и CIEDE2000, на 74% и 57%, соответственно.

6) Предложенный метод может использоваться для измерения и контроля искажений сжатия видеоинформации в цифровых телевизионных системах,

при управлении распределением битовой скорости различным программам, входящим в состав одного транспортного потока, для оптимального выбора битовых скоростей этих программ с достижением минимальной величины суммарных искажений. Предложенный метод также может использоваться для сравнения эффективности различных, в том числе новых, методов сжатия.

Литература

1. Digital video quality metric based on human vision / Andrew B. Watson, James Hu, John F McGowan III // Journal of Electronic Imaging. – 2001. – Vol. 10, N 1. – P. 20-29.
2. **US 6,907,143. Tektronix, Inc.**, Adaptive spatio-temporal filter for human vision system models / Kevin M. Ferguson. – 2005.
3. **US 6,975,776. Tektronix, Inc.**, Predicting human vision perception and perceptual difference / Kevin M. Ferguson. – 2005.
4. **EP2200333. Tektronix, Inc.**, Predicting human vision perception and perceptual difference / Kevin M. Ferguson. – 2008.
5. **Sarnoff Corp.**, Sarnoff JND Vision Model. Contribution to IEEE standards subcommittee / G-2.1.6 Compression and Processing Subcommittee, 1997.
6. **Seshadrinathan, K.** Motion tuned spatio-temporal quality assessment of natural videos / Kalpana Seshadrinathan, Alan C. Bovik // IEEE Transaction on Image Processing. – 2010. – Vol. 19, N 2. – P. 335-350.
7. **Со, И.А.** Новый метод измерения цветовых различий / И.А. Со, Г.Ф. Малыгина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. Юбилейный выпуск факультета технической кибернетики. – 2011. (в печати)
8. **MacAdam, D.L.** Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight / David L. MacAdam // J. Opt. Soc. Am. – 1942. – Vol. 32, N 5. – P. 247-274.
9. **Мешков, В.В.** Основы светотехники. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия / В.В. Мешков, А.Б. Матвеев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 431 с.
10. **Фершильд, М.Д.** Модели цветового восприятия / М.Д. Фершильд; пер. с англ. – 2004. – 437 с. (M.D. Fairchild. Color Appearance Models / Munsell Color Science Laboratory, 2004).
11. The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data and Mathematical Observations / Gaurav Sharma, Wencheng Wu, Edul N. Dalal // Color Research and Application. – 2004, Feb 09.
12. **Джадд, Д.** Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки; пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 592 с. (Judd, D.B. Color in business, science and industry / D.B. Judd, G. Wyszecki. – John Wiley & Sons, 1975).
13. **Ложкин, Л.Д.** Анализ и разработка систем объективной колориметрии в цветном телевидении: автореф. канд. дис. / Л.Д. Ложкин. – Самара, 2009.
14. Scalar curvature of color space as a source of information of new uniformity aspects concerning color representation systems / J.R. Jimenez, E. Hita, J. Romero, L. Jimenez Del Barco // J. Optics (Paris). – 1993. – V. 24, N 6. – P. 243-249.
15. **Малыгина, Г.Ф.** Разработка новых моделей цветовосприятия зрительной системой человека / Г.Ф. Малыгина, И.А. Со // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2007. – № 5. – С. 145-151.
16. **Ллойд, Д.** Системы тепловидения / Д. Ллойд; пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 414 с. (J.M. Lloyd. Thermal Im-

- aging Systems / Plenum Press, New York and London, 1975).
17. **Ярмошевич, Е.И.** Анализ функциональной спектральной пространственно-временной модели зрительной системы при наблюдении мелькающих изображений / Е.И. Ярмошевич, Е.Е. Михайлова // Вестник ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2009. – № 1. – С. 13-19.
 18. **Van der Horst, G.J.C.** Fourier Analysis and Color Discrimination / Gerald J.C. van der Horst // J. Opt. Soc. Am. – 1969. – Vol. 59, N 12. – P. 1670-1676.
 19. **Шелепин, Ю.Е.** Визоконтрастометрия и нейрофизиологические механизмы пространственного зрения: дис. д-ра мед. наук / Ю.Е. Шелепин. – Л., 1987. – 371 с.
 20. **Шелепин, Ю.Е.** Визоконтрастометрия: Измерение пространственных передаточных функций зрительной системы / Ю.Е. Шелепин, Л.Н. Колесникова, Ю.И. Левкович. – Л.: Наука, 1985. – 103 с.
 21. **Цуккерман, И.И.** Анизотропия пространственно частотной характеристики зрения / И.И. Цуккерман, Н.Н. Шостацкий // Физиология человека. – 1978. – Т. 4, № 1. – С. 17-20.
 22. **Schade, O.H.** Optical and Photoelectric Analog of the Eye / Otto H. Schade // J. Opt. Soc. Am. – 1956. – Vol. 46, N 9. – P. 721-739.
 23. **Barten, P.G.J.** Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality / P.G.J. Barten. – Knesel: HV Press, 1999. – 212 p.
 24. **Wandell, B.A.** Foundations of vision / B.A. Wandell. – Sinauer, Sunderland, MA, 1995. – 476 p.
 25. **Полосин, Л.Л.** О стандартизации параметров вещательной телевизионной системы высокой чёткости / Л.Л. Полосин // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2006. – Вып. 2.
 26. **Полосин, Л.Л.** О требованиях к чёткости воспроизведения изображений / Л.Л. Полосин, И.А. Со // «Телерадиовещание»: ОАО Всероссийский научно-исследовательский институт телевидения и радиовещания. – 2008. – № 1. – С. 35-39.
 27. **Robson, J.G.** Spatial and Temporal Contrast Sensitivity Functions of the Visual System / J.G. Robson // J. Opt. Soc. Am. – 1966. – Vol. 56. – P. 1141-1142.
 28. **Van der Horst, G.J.C.** Spatiotemporal Chromaticity Discrimination / Gerald J.C. van der Horst, Marten A. Boman // J. Opt. Soc. Am. – 1969. – Vol. 59, N 11. – P. 1482-1488.
 29. **Kelly, D.H.** No oblique effect in chromatic pathways / D.H. Kelly // J. Opt. Soc. Am. – 1975. – Vol. 65, N 12. – P. 1512-1514.
 30. **Seshadrinathan, K.** Study of Subjective and Objective Quality Assessment of Video / Kalpana Seshadrinathan, Rajiv Soundararajan, Alan C. Bovik and Lawrence K. Cormack // IEEE Transactions on Image Processing. – 2010. – Vol. 19, N 6. – P. 1427-1441.
 31. **Seshadrinathan, K.** A Subjective Study to Evaluate Video Quality Assessment Algorithms / Kalpana Seshadrinathan, Rajiv Soundararajan, Alan C. Bovik and Lawrence K. Cormack // SPIE Proceedings Human Vision and Electronic Imaging. – 2010.
 32. **US 6,975,776. Tektronix, Inc.,** Predicting human vision perception and perceptual difference / Kevin M. Ferguson. – 2005.
 33. **EP2200333. Tektronix, Inc.,** Predicting human vision perception and perceptual difference / Kevin M. Ferguson. – 2008.
 34. **Sarnoff Corp.,** Sarnoff JND Vision Model. Contribution to IEEE standards subcommittee / G-2.1.6 Compression and Processing Subcommittee. – 1997.
 35. **Seshadrinathan, K.** Motion tuned spatio-temporal quality assessment of natural videos / Kalpana Seshadrinathan, Alan C. Bovik // IEEE Transaction on Image Processing. – 2010. – Vol. 19, N 2. – P. 335-350.
 36. **So, I.A.** A new method for measuring color differences / I.A. So, G.F. Malykhina // Scientific and Technical Journal of Saint-Petersburg State Polytechnic University. Section of Informatics, Telecommunications and Control. The Jubilee issue of the Engineering Cybernetics Department. – 2011. – (in Russian). (in print)
 37. **MacAdam, D.L.** Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight / David L. MacAdam // J. Opt. Soc. Am. – 1942. – Vol. 32, N 5. – P. 247-274.
 38. **Meshkov, V.V.** Principles of lighting technology. Part 2. Physiological optics and colorimetry / V.V. Meshkov, A.B. Matveev – Moscow: “Energoatomizdat” Publisher, 1989. – 431 p. – (in Russian).
 39. **Fairchild, M.D.** Color Appearance Models / M.D. Fairchild. – Munsell Color Science Laboratory, 2004.
 40. The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data and Mathematical Observations / Gaurav Sharma, Wencheng Wu, Edul N. Dalal // Color Research and Application. – 2004, Feb 09.
 41. **Judd, D.B.** Color in business, science and industry / D.B. Judd. – John Wiley & Sons, 1975.
 42. **Lozhkin, L.D.** Analysis and design of objective colorimetry systems of color television: abstract of a candidate of science dissertation / L.D. Lozhkin – Samara, 2009. – (in Russian).
 43. Scalar curvature of color space as a source of information of new uniformity aspects concerning color representation systems / J.R. Jimenez, E. Hita, J. Romero, L. Jimenez Del Barco // J. Optics (Paris). – 1993. – V. 24, N 6. – P. 243-249.
 44. **Malykhina, G.F.** Creating new color perceptual models of human visual system and their collation / G.F. Malykhina, I.A. So // Scientific and Technical Journal of Saint-Petersburg State Polytechnic University. Section of Informatics, Telecommunications and Control. – 2007. – Issue 5. – P. 145-151. – (in Russian).
 45. **Lloyd, J.M.** Thermal Imaging Systems / J.M. Lloyd. – New York, London: Plenum Press, 1975.
 46. **Yarmoshevich, E.I.** Analysis of the functional spectral spatiotemporal model of the human visual system in observation of blinking images / E.I. Yarmoshevich, E.E. Mihailova // Herald of Voronezh State University. Section of system analysis and information technology. – 2009. – Issue 1. – P. 13-19. – (in Russian).
 47. **Van der Horst, G.J.C.** Fourier Analysis and Color Discrimination / Gerald J.C. van der Horst // J. Opt. Soc. Am. – 1969. – Vol. 59, N 12. – P. 1670-1676.
 48. **Shelepin, Y.E.** Visual Contrast Metrology and neurophysiological machinery of spatial vision: Doctor of Medicine Dissertation / Y.E. Shelepin – Leningrad, 1987. – 371 p. – (in Russian).
 49. **Shelepin, Y.E.** Visual Contrast Metrology: Measuring spatial transfer functions of the human visual system / Y.E. Shelepin, L.N. Kolesnikova, Y.I. Levkovich – Leningrad: “Nauka” Publisher, 1985. – 103 p. – (in Russian).

References

1. Digital video quality metric based on human vision / Andrew B. Watson, James Hu, John F McGowan III // Journal of Electronic Imaging. – 2001. – Vol. 10, N 1. – P. 20-29.
2. **US 6,907,143. Tektronix, Inc.,** Adaptive spatio-temporal filter for human vision system models / Kevin M. Ferguson. – 2005.

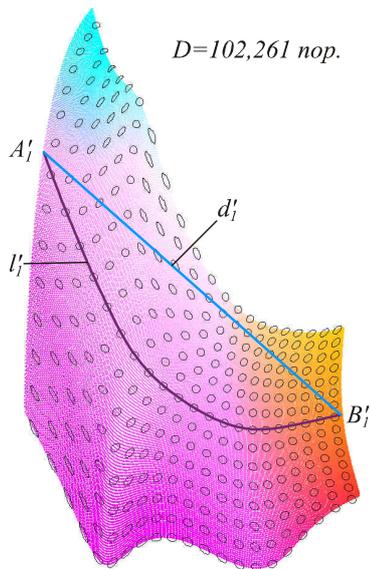


Рис. I. Пример первой итерации «распрямления» вдоль линии

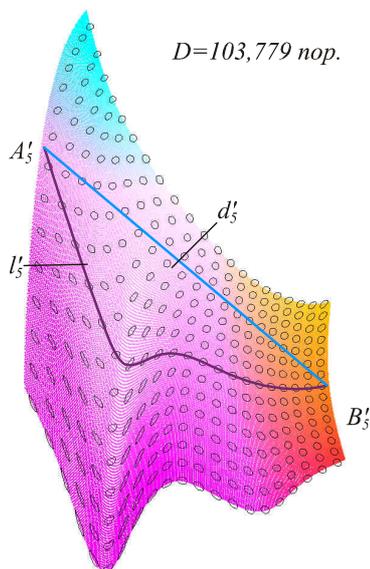
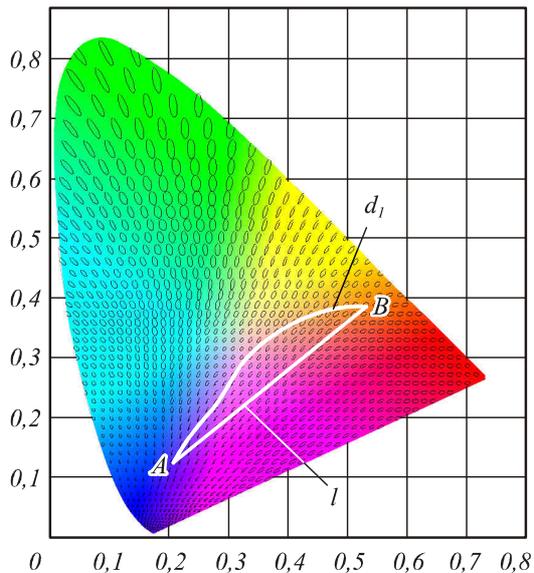


Рис. II. Пример пятой итерации «распрямления» вдоль линии

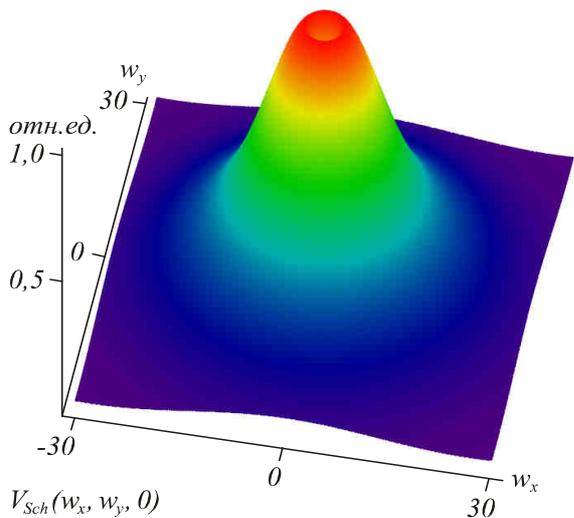
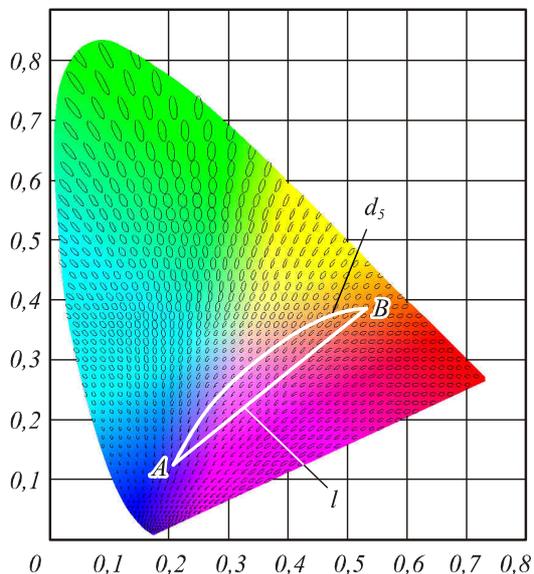


Рис. III. Двумерная аппроксимация КЧХ зрительной системы на основе одномерной аппроксимации О. Шаде[22]

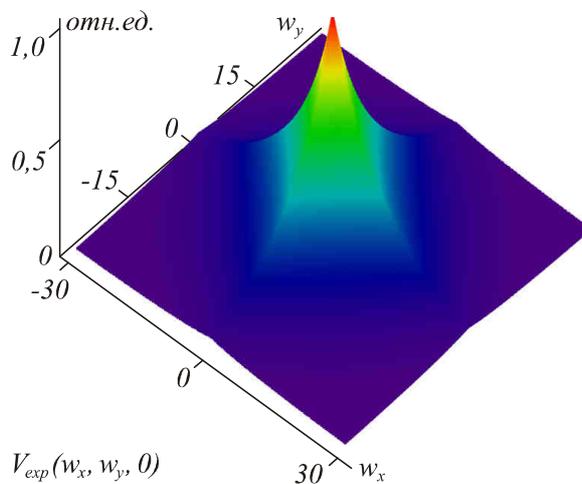


Рис. IV. Двумерная аппроксимация КЧХ зрительной системы экспоненциальными функциями [25]

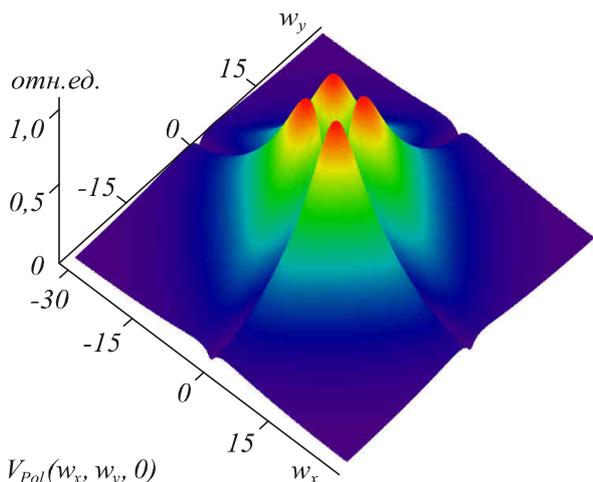


Рис. V. Двумерная аппроксимация КЧХ зрительной системы произведением разностей экспоненциальных функций [26]

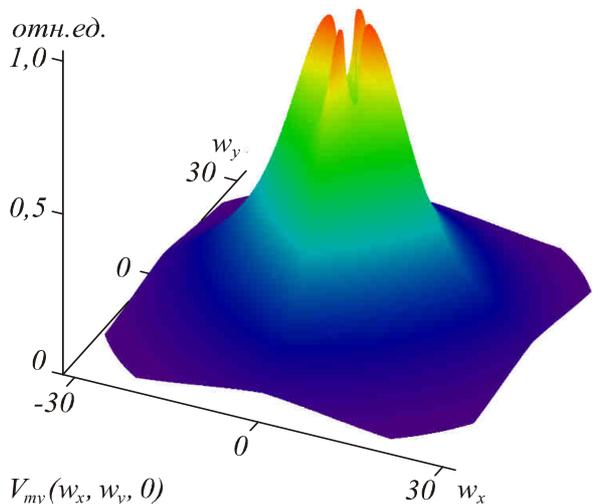


Рис. VI. Двумерное сечение предлагаемой трёхмерной КЧХ $V_{my}(w_x, w_y, f)$ яркостного канала ЗС ($f=0$ Гц)

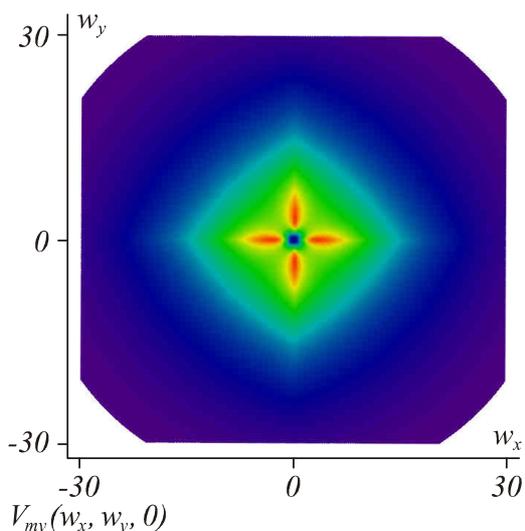


Рис. VII. Двумерное сечение предлагаемой трёхмерной КЧХ $V_{my}(w_x, w_y, f)$ яркостного канала ЗС ($f=0$ Гц)

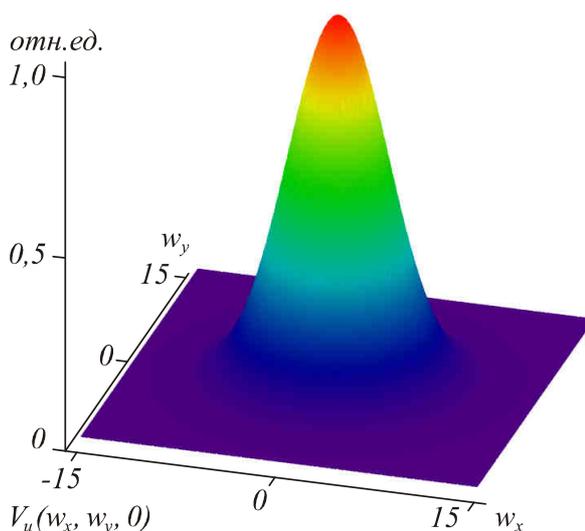


Рис. VIII. Двумерное сечение трёхмерной КЧХ ВУ-канала зрительной системы ($f=0$ Гц)

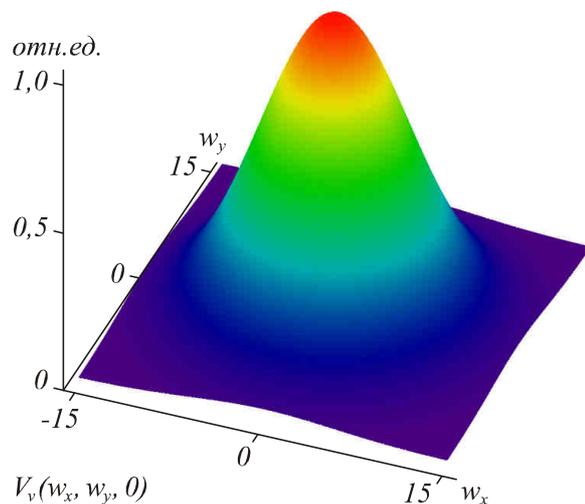


Рис. IX. Двумерное сечение трёхмерной КЧХ RG-канала зрительной системы ($f=0$ Гц)

21. **Cukkerman, I.I.** Anisotropy of spatial frequency characteristics of vision / I.I. Cukkerman, N.N. Shostacky // Human physiology. – 1978. – V. 4, N 1. – P. 17-20. – (in Russian).
22. **Schade, O.H.** Optical and Photoelectric Analog of the Eye / Otto H. Schade // J. Opt. Soc. Am. – 1956. – Vol. 46, N 9. – P. 721-739.
23. **Barten, P.G.J.** Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality / P.G.J. Barten – Knesel: HV Press, 1999. – 212 p.
24. **Wandell, B.A.** Foundations of vision / B.A. Wandell. – Sinauer, Sunderland, MA, 1995. – 476 p.
25. **Polosin, L.L.** About standardization of broadcast television system parameters / L.L. Polosin // Journal of Issues of radio electronics. Section of Television Engineering. – 2006. – V. 2. – (in Russian).
26. **Polosin, L.L.** About rendered images sharpness requirements / L.L. Polosin, I.A. So // Journal of Broadcasting: Russian Research Institute of television and radio – Moscow, 2008. – Issue 1, P. 35-39. – (in Russian).

27. **Robson, J.G.** Spatial and Temporal Contrast Sensitivity Functions of the Visual System / J.G. Robson // J. Opt. Soc. Am. – 1966. – Vol. 56. – P. 1141-1142.
28. **Van der Horst, G.J.C.** Spatiotemporal Chromaticity Discrimination / Gerald J.C. van der Horst, Marten A. Bouman // J. Opt. Soc. Am. – 1969. – Vol. 59, N 11. – P. 1482-1488.
29. **Kelly, D.H.** No oblique effect in chromatic pathways / D.H. Kelly // J. Opt. Soc. Am. – 1975. – Vol. 65, N 12. – P. 1512-1514.
30. **Seshadrinathan, K.** Study of Subjective and Objective Quality Assessment of Video / Kalpana Seshadrinathan, Rajiv Soundararajan, Alan C. Bovik and Lawrence K. Cormack // IEEE Transactions on Image Processing. – 2010. – Vol. 19, N 6. – P. 1427-1441.
31. **Seshadrinathan, K.** A Subjective Study to Evaluate Video Quality Assessment Algorithms / Kalpana Seshadrinathan, Rajiv Soundararajan, Alan C. Bovik and Lawrence K. Cormack // SPIE Proceedings Human Vision and Electronic Imaging. – 2010.

MEASURING COLOR DISTORTIONS OF VIDEO WITH HUMAN VISUAL SYSTEM CHARACTERISTICS

I. A. So

Saint-Petersburg State Polytechnic University

Abstract

Proposed is a method for measuring color distortions of digital video in units of color thresholds. The method uses another proposed method (FHL) for measuring color differences by length of the shortest path in units of color thresholds between two points of the color space. Also new approximations of the three-dimensional spatiotemporal characteristics of the human visual system are proposed and included in the method to account spatiotemporal aspects of visual perception.

Key words: measurement of color differences, color distortion, color threshold, spatiotemporal characteristics of the human visual system, spatiotemporal filtering.

Сведения об авторе



Со Ирина Александровна, в 2009 году с отличием окончила Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова «Военмех», поступила в аспирантуру факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по специальности «Информационно-измерительные и управляющие системы». Область научных интересов: колориметрия, психофизика зрения, измерение визуальных искажений, обработка изображений.

E-mail: Irene_so@mail.ru.

Irina Aleksandrovna So graduated with honours (2009) from Baltic State Technical University. She is a postgraduate at Saint-Petersburg State Polytechnic University, the Engineering Cybernetics Department. Her speciality is information-measuring and control systems. Her research interests include colorimetry, psychophysics of human vision, measurement of visual distortions, image processing.

Поступила в редакцию 27 июня 2011 г.

Почтовый адрес: г. Санкт-Петербург, пр. Луначарского 98, корп. 1, кв. 112.