МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ——

Математические модели пространственного цветовосприятия¹

В. П. Божкова*, О. А. Басова*,**, Д. П. Николаев*

*Институт проблем передачи информации имени А. А. Харкевича, Российская академия наук, Москва, Россия

** Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

Поступила в редколлегию 05.06.2019

Аннотация—В задачах синтеза и обработки изображений существенно для чего будет использоваться конечное изображение: для автоматической обработки или для визуализации. В последнем случае требования к качеству получаемого изображения должны формироваться с учетом особенностей зрительной системы человека. Последнюю можно рассматривать как сложный фильтр, отбрасывающий часть поступающей информации. Построение формальных моделей зрительного восприятия позволяет оптимизировать алгоритмы обработки изображений и количественно оценивать качество их работы без проведения массовых психофизических испытаний. В данном обзоре будут проанализированы известные в настоящее время математические модели ахроматической и хроматической функции контрастной чувствительности человека и их соответствие имеющимся экспериментальным данным.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: контраст, функция контрастной чувствительности, зрительная система человека, обработка изображений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование формальных критериев качества в настоящий момент является столь же необходимым атрибутом хорошей научной работы в области обработки изображений, как, скажем, использование статистических критериев в экспериментальной биологии. Если в рассматриваемой задаче для некоторых входных данных известен идеальный ответ, то критерии качества обычно строятся на основе метрики различий пары изображений — идеального и реального ответа алгоритма. В метриках, применяемых в задачах обработки изображений, в которых конечное изображение предназначено для визуализации, логично не учитывать различия, игнорируемые зрительной системой человека (ЗСЧ). На практике же во многих работах используются легко интерпретируемые, но не связанные с ЗСЧ и никак не обоснованные метрики (как, например, СКО [1,2]). Наряду с ними используются и метрики, обоснованные на уровне «общих представлений» о ЗСЧ [3,4]. При этом проблема построения адекватных метрик различий стоит достаточно остро, особенно в области сжатия видеопотоков [5,6].

В идеале метрики должны основываться на построенных совместно с физиологами моделях восприятия человеком изображений, заданных как пространственное распределение цветов (в цветовых координатах стандартного наблюдателя), при заданных параметрах наблюдения. Такими параметрами могут быть угловой размер изображения, форма и структура пикселя, распределение цветов на периферии поля зрения и т. п. Отдельной трудной и практически неисследованной проблемой является учет индивидуальных особенностей ЗСЧ. При этом индивидуальная вариативность ЗСЧ в области аномалий цветовосприятия [7] и остроты зрения [8] изучена достаточно подробно. Следует заметить, что построение полной, подробной

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-29-03297 и № 17-29-03370.

и точной модели восприятия изображений ЗСЧ на сегодняшний день вряд ли возможно. Но уже получают распространение простейшие модели, учитывающие пространственно-цветовые свойства ЗСЧ, не сводимые к изолированным вопросам колориметрии и остроты зрения [9–13].

Приведем некоторые примеры. Задача визуализации мультиспектральных изображений рассматривается обычно как задача снижения размерности входных данных. Разработанные для этого методы направлены на сохранение ценной информации в той или иной формальной метрике. Однако задача визуализации осмыслена именно как вспомогательное средство интерпретации мультиспектрального изображения человеком. ЗСЧ более чувствительна к локальным контрастам яркости, нежели к глобальным ее градиентам, поэтому именно к методам визуализации многоканальных изображений с сохранением локального контраста яркости привлекается особое внимание [14].

Другой пример полезного сочетания сведений из области обработки изображений и психофизики восприятия цвета человеком — это современные алгоритмы сжатия изображений. Алгоритмы сжатия изображений, учитывающие особенности ЗСЧ, нацелены на то, чтобы за счет изменения невидимой человеку информации представить изображение в максимально компактной форме. Показано, что эффективность сжатия изображений может быть увеличена на 30-50% за счет включения в схему обработки изображения моделей контрастной чувствительности зрительной системы человека [10].

Еще одним примером использования особенностей контрастной чувствительности человека в технических разработках может служить цветовая субдискретизация (англ. chroma subsampling) — технология кодирования изображений со снижением цветового разрешения, при которой частота выборки цветоразностных сигналов может быть меньше частоты выборки яркостного сигнала [15].Она основана на различиях контрастной чувствительности для яркости и цветности, а именно, на том, что ЗСЧ обладает большим пространственным разрешением в канале яркости.

Для количественного описания пространственно-цветовых характеристик ЗСЧ принято использовать функции контрастной чувствительности (ФКЧ) для яркостного и цветоразностных каналов. Эти функции характеризуют способность ЗСЧ отличать габоровский паттерн определенной частоты, амплитуды и типа цветового контраста (черно-белый, красно-зеленый или сине-желтый) от равномерной нейтрально серой области.

В данном обзоре будут проанализированы известные в настоящее время аналитические модели ахроматической (яркостной) и хроматических (цветностных) ФКЧ и их соответствие экспериментальным данным. Кроме того будут обсуждены способы применения понятия ФКЧ к целым изображениям, а не одиночным паттернам (это нетривиально, поскольку ЗСЧ существенно нелинейна), что важно для любых их применений в задачах обработки изображений.

2. ФУНКЦИЯ КОНТРАСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Очевидно, что ЗСЧ обладает ограниченным пространственным разрешением. Формально можно говорить о разрешимости периодических паттернов некоторой характерной пространственной частоты — при недостаточном разрешении паттерн становится визуально однородным. Важно заметить, что разрешимость любого стимула не инвариантна к его контрасту, то есть при понижении контрастности исходно разрешимого стимула визуальная однородность наступает еще при ненулевом контрасте. Поэтому численной мерой разрешения ЗСЧ служит контрастная чувствительность, то есть величина, обратная пороговому значению контрастности стимула, при которой он уже воспринимается как неоднороный. Для того, чтобы численно описать разрешение ЗСЧ для паттернов всевозможных пространственных частот (или, что эквивалентно, размеров объектов), используют функцию контрастной чувствительно-

cmu (англ. *the contrast sensitivity function* – CSF). Эта функция описывает зависимость минимального контраста, при котором стимул еще разрешается (то есть контрастной чувствительности) от пространственной частоты стимула, которую обычно измеряют в циклах на градус (англ. cycle per degree, cpd) [16]. В качестве тест-объектов для измерения ФКЧ человека, как правило, используются габоровские паттерны – изображения с синусоидальным профилем яркости (или цветоразностной компоненты), модулированным гауссианой (рис. 1). В процессе измерений используют набор решеток разной контрастности и частоты, но одинаковой средней яркости. Иногда они объединяются на едином тестовом изображении.



Рис. 1. Примеры габоровских паттернов из работы [19].

Известно, что форма ФКЧ зависит от направления цветового вектора контраста стимула [17]. Проще говоря, важно, чередуются ли с данной пространственной частотой два оттенка серого или, например, зеленый и красный цвета. Большинство исследований рассматривают ФКЧ в трех направлениях, считающихся независимыми (условно, по оси яркости, а также в красно-зеленом и сине-желтом направлениях). Предполагается, что, зная чувствительность в этих цветовых направлениях, можно предсказать контрастную чувствительность для любой пары цветов. Впрочем, вопрос о точном направлении этих «главных осей» контрастной чувствительности является дискуссионным [18].

Принято выделять отдельно ахроматическую ФКЧ (АФКЧ, англ. LCSF) как функцию чувствительности к *яркостному контрасту* и хроматическую ФКЧ (ХФКЧ, англ. CCSF) как функции чувствительности к *контрасту цветности*.

Для измерения ФКЧ вводится понятие *контраста*. Для габоровского паттерна заданной частоты контраст может быть разным в зависимости от амплитуды решетки.

Для измерения АФКЧ вводится понятие *яркостного контраста*. Существует несколько способов определения яркостного контраста, среди которых: по Веберу C_w , по Михельсону C_m и RMS контраст C_{rms} . Первый вычисляется по формуле

$$C_w = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_b}$$

где L_{max} и L_{min} — это, соответственно, максимальное и минимальное значение яркости на предъявляемом стимуле, а L_b — яркость фона. В частности, такое определение для изображений с периодической структурой использует К. Ким [19]. Контраст по Михельсону определяется немного иначе:

$$C_m = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}.$$

Определения контраста по Веберу и по Михельсону являются самыми популярными среди базовых определений [18]. *RMS* контраст определяется по формуле:

$$C_{rms} = \frac{L_{\sigma}}{L_{\mu}},$$

где L_{μ} , L_{σ} — среднее и стандартное отклонение распределения яркости на предъявляемом стимуле соответственно. Согласно Д. Пелли [20], для реальных изображений чаще используется RMS контраст.

ХФКЧ опирается на базовое понятие контраста цветности [21]. Для его определения, как правило, используется цветовое пространство LMS [17,22], в котором каждая ось моделирует ответы колбочек человека L-, М-, или S- типа. Колбочки так названы по положению их пика максимальной чувствительности в области длинных, средних или коротких длинах волн соответственно. Стоит заметить, что стандартное CIE XYZ пространство связанно с LMS линейной трансформацией [19].

Считая пространство LMS евклидовым, предлагается вычислять контраст цветности как длину вектора, концы которого задаются координатами в цветовом пространстве LMS [17,22, 23]:

$$C_{lms} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S_0}\right)^2},$$

где ΔL , ΔM , ΔS — модуляции вдоль осей цветового пространства LMS, и L_0 , M_0 , S_0 — трихроматические значения фона в цветовом пространстве LMS. Впрочем, в [18] контраст цветности вводится аналогичным образом, но в пространстве CIELAB, что обосновывается цветовой изотропностью этого пространства. В дальнейшем мы будем обозначать этот вариант контраста цветности как C_{lab} . Нетрудно заметить, что C_{lms} и его аналоги в других цветовых пространствах являются цветностными обобщениями Веберовского яркостного контраста C_w .

Вне зависимости от используемого определения контраста, понятие контрастной чувствительности вводится как величина, ему обратная: $1/C_*$. ФКЧ задает зависимость от пространственной частоты именно контрастной чувствительности.

3. ФКЧ: ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ, СВОЙСТВА И МОДЕЛИ

Опишем теперь методологию проведения типичного эксперимента по измерению яркостных и цветностных пороговых контрастов человека. Сначала создается набор стимулов, каждый из которых характеризуется пространственной частотой и цветовым направлением. К сформированному набору добавляется множество референтных изображений, не содержащих периодического паттерна. После чего 4 изображения из набора (для методики 4AFC), только одно из которых содержит паттерн для измерения, одновременно демонстрируются испытуемому, который должен выбрать единственно верное изображение. Детальнее эта процедура описана в работе [19]. Процедура проводится несколько раз с разным значениями контраста (метод QUEST [24]), в результате чего устанавливается пороговое значение контраста, которое в конечном счете определяет чувствительность, соответствующую данной частоте и цветовому направлению.

К настоящему моменту о ФКЧ человека известен ряд фактов. Согласно Д. Пелли, зрительная система имеет ненулевую контрастную чувствительность в диапазоне от 1 до 16 ц/гр [20]. Важной чертой ФКЧ (как ахроматической, так и хроматической) является уменьшение контрастной чувствительности на более высоких пространственных частотах [25–27]. Характерные примеры для АФКЧ и ХФКЧ приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, АФКЧ имеет

наибольшую чувствительность в средне-частотном диапазоне в области 4 ц/гр. На более высоких частотах чувствительность быстро падает, пока не достигается предел остроты зрения. На более низких частотах АФКЧ также уменьшается.



Рис. 2. Типичные кривые ФКЧ для яркости (АФКЧ) и цветности (ХФКЧ) (по [18]).

Наглядная иллюстрация чувствительности ЗСЧ к паттернам разной частоты приведена на рис. 3. Оба изображенных на рисунке паттерна точно равны по яркости черных и белых полосок. Однако паттерн справа кажется менее контрастным из-за меньшей контрастной чувствительности глаза на высоких частотах.



Рис. 3. Примеры низкочастотных и высокочастотных паттернов.

Впервые различия в форме $A\Phi K\Psi$ и $X\Phi K\Psi$ были обнаружены в работе [25]. Эти различия не позволяют ограничится исследованием $A\Phi K\Psi$ и экстраполяцией полученных результатов на трехмерное цветовое пространство. При этом обращает на себя внимание малое число экспериментальных работ по измерению $X\Phi K\Psi$ (нами найдено всего 11 работ), в то время как относительно вида $A\Phi K\Psi$ собрано и систематизировано большое количество данных. Например, ранние работы были прекрасно изложены и проанализированы Бартеном в книге «Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality» (1999) [28] (автор рассмотрел около 30 работ по данной тематике).

Итак, известно 11 работ по измерению ХФКЧ, опубликованных вплоть до 2017 г. [17–19,22, 25,29–34]. При создании модели ХФКЧ использование данных из разных работ, их усреднение или комбинирование, не представляется методически верным, т. к. они могли быть получены в разных условиях наблюдения (при предъявлении разных стимулов, в разных условиях освещения, при разной яркости монитора). Эта трудность привела к организации в США межлабораторных проектов ModelFest и ColorFest [17,35]. И хотя общей базы данных создать в

результате все же не удалось, в опубликованных в рамках ModelFest и ColorFest работах были сформулированы важные рекомендации для калибровки дисплеев и правил проведения экспериментов, которым теперь следуют другие экспериментаторы [19]. Эти рекомендации предполагают раздельное стимулирование механизмов восприятия цветности и яркости, что ранее не всегда считалось необходимым и тем самым приводило к искаженным результатам. В качестве стимулов для экспериментов в рамках проекта ModelFest использовались 43 черно-белых изображения (разные виды габоровских паттернов и природные сцены [35]). В качестве цветных стимулов в рамках проекта ColorFest было предложено использовать часть стимулов из ModelFest, пороги цветового контраста для которых определялись бы по цветовым направлениям C1 - C7 [17], среди которых 3 цветовых направления считаются главными, а 4 – промежуточными. Тремя главными цветовыми направлениями являются черно-белое (C1), красно-зеленое (C2) и желтовато-зеленое-фиолетовое (C3). Промежуточные цветовые направления являются векторной суммой главных направлений.

Анализ работ с измерениями ХФКЧ показал, что условия, использованные для измерения ХФКЧ в самых ранних из них, не всегда соответствовали рекомендациям, предложенным в проектах ModelFest и ColorFest. Как отмечено в работе [32], результаты, описанные в публикациях [25,29–31], не могут быть использованы для построения зрительной модели, в которой восприятие идёт разделено по яркостным и хроматическим каналам. В свою очередь более поздние исследования [17,19] подвергли критике саму работу [32]. Таким образом, результаты вышеперечисленных работ, а также основанные на их данных модели, такие как [36,37], рассматриваться нами не будут по причине существенной критики со стороны научного сообщества.

Оставшиеся работы были оценены по трем показателям: год публикации, число испытуемых и методика измерения. Данные [22], хотя и были получены на 51 испытуемом, не могут, по нашему мнению, быть использованы для построения модели среднего наблюдателя, так как получены экспресс-методом (qCSF), разработанным для целей клинической диагностики зрительных аномалий, точность которого невысока. Работы [17] и [32] проведены на трех испытуемых каждая, что делает их достоверность низкой. Работа [33] нацелена на обработку видео, в ней определялись значения ФКЧ при разных скоростях движения стимулов. Эти данные также мало походят для нашей задачи, прежде всего из-за того, что в разных сериях экспериментов использовались тесты различной яркости. Поэтому мы остановились на трех работах: [18], [19] и [34]. В [18] было обследовано в разных экспериментах от 6 до 9 испытуемых в диапазоне частот от 1 до 10 ц/гр. АФКЧ у всех испытуемых оказались близкими по форме частотной зависимости, хотя и различались по максимальным значениям чувствительности (см. рис. 4). Максимум чувствительности в 170 – 220 ед приходился на частоту 2 – 4 ц/гр. При увеличении частоты до 10 ц/гр чувствительность падала до 24 – 92 ед. При уменьшении пространственной частоты в диапазоне от 4 ц/гр до 1 ц/гр значения контрастной чувствительности уменьшалась несколько меньше (до 70 - 150 ед). Данные по ХФКЧ как для красно-зеленых, так и для сине-желтых паттернов отличались от АФКЧ меньшим значением максимума контрастной чувствительности (в среднем — 35 ед.) (см. рис. 4) и отсутствием провала в низких частотах. Данные Яо [34] на 11 испытуемых при сравнении с результатами Наденау показали, что ХФКЧ, измеренные обоими авторами, имеют одинаковую форму, хотя и несколько различаются по максимальным значениям.

В работе [19], проделанной на 6 испытуемых, изучалось влияние яркости монитора на контрастную чувствительность в диапазоне частот 0,125 – 16 ц/гр для ахроматического и в диапазоне 0,25 – 8 ц/гр для хроматических стимулов при одних и тех же условиях наблюдения. Обнаружен значительный спад контрастной чувствительности при уменьшении яркости, при этом форма ФКЧ практически не менялась (см. рис. 5).



Рис. 4. Экспериментальные данные из [18] и их аппроксимации, предложенные в той же работе, для АФКЧ и для ХФКЧ.



Рис. 5. Слева направо: зависимость контрастной чувствительности от яркости для АФКЧ и для ХФКЧ согласно [19].

К сожалению, приведенные в [19] экспериментальные результаты не годятся для построения математической модели. Во-первых, число испытуемых слишком мало, на усредненных графиках явно видны выбросы. Во-вторых, при измерении ХФКЧ большей части испытуемых не предъявлялись стимулы с частотой выше 4 ц/гр. Тем не менее, это одна из немногих (если не единственная) работа, в которой экспериментально исследуется зависимость ХФКЧ от яркости стимула и показывается неинвариантность контрастов C_w и C_{lms} к уровню яркости фона. Эта зависимость не может быть проигнорирована, поэтому оптимальным выглядит вариант использования результатов работы [18] для построения достоверных аппроксимаций формы ФКЧ, а результатов из [19] — для моделирования влияния яркости в рамках этой же математической модели.

На настоящий момент в литературе уже предложено несколько математических моделей ФКЧ, причем подавляющее большинство этих моделей описывает только АФКЧ. Большинство моделей АФКЧ при фиксированной яркости, удовлетворяющая наблюдателям с нормальным зрением, требует 4 – 5 параметров, включая амплитуду [35]. Специально был исследован вопрос, можно ли описать АФКЧ функциями, имеющими менее, чем 4 параметра. Пелли с соавт. [38] предположили, что АФКЧ можно описать моделью с двумя степенями свободы. Чтобы проверить эту идею, Рохэйли и Озлей [26] протестировали около ста пожилых людей и показали, что для того, чтобы модель удовлетворяла всем данным, необходимо более 2 степеней свободы. Несмотря на это, такая модель была использована при построении быстрого метода оценки ФКЧ, разрабатываемого для клинических целей [22].

В рамках проекта ModelFest было предложено большое число простых моделей АФКЧ для среднего наблюдателя и был произведен сравнительный анализ существующих и предложенных самими авторами моделей [35]. Авторы отметили, что различия между несколькими хорошими моделями невелика. Простейшая аппроксимация АФХЧ — трехпараметрическая экспоненциальная — была впервые описана Вилсоном [39]. Форма кривой описывается следующим уравнением:

$$S(f;a,b) = af \exp(bf),\tag{1}$$

где f — пространственная частота, а a и b — параметры модели. Это уравнение эквивалентно модели Мовшона и Киопса [40]. Пятипараметрические модели показали слегка более высокую точность, чем четырехпараметрические, а 11-параметрическая кусочно-линейная аппроксимация оказалась еще точнее, хотя и незначительно. Впрочем, оба эффекта могут быть объяснены переобучением. Среди четырехпараметрических моделей наибольшую точность показала модель Яна [41]:

$$S_{yqm}(f; f_0, f_1, a) = \frac{\exp(-f/f_0)}{1 + \frac{a}{1 + (f/f_1)^2}},$$
(2)

где S_{yqm} — нормированная чувствительность, f — пространственная частота, а f_0 , f_1 и a — параметры модели. Среди многопараметрических моделей хорошей точностью, по мнению некоторых авторов, [42] обладает и модель, предложенная Дэйли [43].

Как уже было сказано выше, на АФКЧ существенно влияет яркость паттерна. Модели, рассматриваемые в [35], не учитывают этого эффекта. Этого недостатка лишены 2 модели АФКЧ, одна предложена Бартеном [28] и другая Дэйли [43]. Впрочем, эксперименты Ким с соавт. [19] показали, что эти модели имеют низкую точность и вряд ли могут быть использованы напрямую.

Моделей для аппроксимации ХФКЧ известно существенно меньше. В работе [18] были предложены простые модели АФКЧ и ХФКЧ по собственным экспериментальным данным. В ней

АФКЧ аппроксимируется полиномиальной супергауссовой моделью с двумя членами, задающей фильтр с полосовыми характеристиками, а ХФКЧ — одиночной супергауссовой функцией, реализующей фильтр нижних частот:

$$\begin{cases} S_L(f;a_1,a_2,b_1,b_2,c_1,c_2) = a_1 \ f^2 \ \exp(b_1 \ f^{c_1}) + a_2 \ \exp(b_2 \ f^{c_2}) \\ S_C(f;a_3,b_3,c_3) = a_3 \ \exp(b_3 \ f^{c_3}) \end{cases}$$
(3)

где S_L моделирует АФКЧ, $S_C - X\Phi$ КЧ, f - пространственная частота, а a_i , b_i и c_i – параметры модели. Предложенная модель для АФКЧ имеет 6 параметров, а для ХФКЧ – всего 3. К сожалению, модель не учитывает изменений ФКЧ в зависимости от яркости стимула, все измерения проведены для яркости 40 кд/м².

Итак, в литературе предлагается достаточно много математических аппроксимаций АФКЧ, и несколько меньше ХФКЧ, которые могут быть полезны для различных приложений в области обработке изображений. Отдельной проблемой, однако, остается применение моделей ФКЧ к изображению, а не одиночному габоровскому паттерну. В следующем разделе мы дадим несколько примеров успешной интеграции моделей ФКЧ в методах обработки изображений.

4. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ФКЧ К ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Одна из первых задач из области обработки изображений, которая решалась с использованием моделей ФКЧ, — это оценка точности цветопередачи в системах визуализации цифровых изображений, которая до этого требовала экспертных оценок при эмпирических наблюдениях.

Как уже было сказано, ЗСЧ менее чувствительна к цветовым различиям в мелких деталях по сравнению с крупными, что не учитывается ни в одной стандартной цветовой модели, в том числе, в CIELAB. Вследствие этого численные предсказания цветовых различий расходятся с эмпирическими наблюдениями. В пространственном расширении CIELAB, названном S-CIELAB (spatial CIELAB), ФКЧ была включена в метрику сравнения изображений на стадии препроцессинга [44]. Целью препроцессинга было удаление тех компонент изображения, которые не видны человеку.

В целом, S-CIELAB включает несколько этапов обработки. На первом этапе изображение раскладывается на яркостную и две хроматические компоненты. Затем к каждой из компонент применяются гауссовы фильтры, для того, чтобы подавить те пространственные частоты, которые не воспринимаются ЗСЧ при данном расстоянии наблюдения. С помощью этих фильтров выполняется аппроксимация ФКЧ в пространственной области. Авторы исходной работы по S-CIELAB, к сожалению, не приводят обоснования использованной ими аппроксимации ФКЧ. Тем не менее, предсказания S-CIELAB для цветовых различий изображений оказались более консистентны перцептуальным данным, чем предсказания без нее.

Поскольку предложенная схема S-CIELAB оказалась достаточно эффективной в вычислительном отношении [9], появились попытки сделать ее более точной [45, 46]. В работе [45] авторы объединили модель S-CIELAB с тремя различными моделями ФКЧ, предложенными в работах [40], [28] и [43]. Они упоминались нами в разделе 4. Степень близости отфильтрованных изображений оценивалась с помощью попиксельного применения формулы цветовой разности CIEDE2000. Все три модели ФКЧ показали схожие результаты. Это неудивительно, поскольку все они относятся к типу АФКЧ, а еще в рамках проекта ModelFest отмечалось, что различия между несколькими хорошими моделями АФКЧ невелика. Кроме того, эти результаты были получены при одинаковых условиях наблюдения, а две модели АФКЧ из рассмотренных чувствительны к изменениям условий наблюдения, поэтому возможно, что различия появятся при измененных условиях.

Фильтрацию с помощью модели ФКЧ можно выполнять не в пространственной, а напрямую в частотной области изображения, этот вопрос подробно рассматривается в работе [46].

Фильтрация в частотной области выполняется с использованием простого умножения, а не серии сверток.

Еще одна задача, которая была успешно решена уже при использовании ХФКЧ, — это сжатие цветных изображений [10,18,47]. В работе Наденау [18] для применения ФКЧ используется вейвлет-преобразование, там самым разложение изображения происходит одновременно и по частотам, и по сдвигам. Влияние моделей, эксплуатирующих свойства ЗСЧ, на качество сжатого изображения иллюстрирует рис. 6 из работы Наденау. Оригинальное изображение (a, б) было сжато самым современным для того времени стандартом JPEG2000 либо в его простой версии (в), либо с учетом свойств ЗСЧ (г). Преимущество сжатия с учетом ЗСЧ очевидно. Видно, что в простой версии JPEG2000 наблюдается потеря текстуры лица (в), в то время как она хорошо сохранилась на изображении, сжатом с учетом свойств ЗСЧ (г).



Рис. 6. Пример сжатия изображения с помощью ЈРЕС2000 и алгоритма Наденау [10].

Яо и Лей [47] приводят в своей работе блок-схему сжатия изображения с включением в нее модели ХФКЧ, где значения ФКЧ выступают как коэффициенты в частотном спектре изображения. Правда, какая именно модель ХФКЧ была ими использована, из текста статьи неясно.

Результаты обоих работ показывают, что способ сжатия, учитывающий визуальные характеристики человека, оказывается эффективным и достигает более высокого коэффициента сжатия при фиксированном воспринимаемом качестве изображения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном обзоре рассматривается функция контрастной чувствительности зрительной системы человека и ее применимость к задачам обработки изображений. В разделе 3 проанализировано большинство имеющихся работ, в которых приведены оригинальные результаты измерения ФКЧ. Основная часть из них получена для черно-белых паттернов, измерений хроматической ФКЧ значительно меньше, что объясняется трудоемкостью таких экспериментов.

В литературе предлагается достаточно много математических аппроксимаций ФКЧ, примеры которых даны в обзоре в виде уравнений (1) – (3).

Особое внимание обращается на то, что модель пространственной чувствительности зрительной системы как функции контраста и пространственной частоты по существу параметризирует разрешение деталей цветного изображения. На примере S-CIELAB в разделе 4 рассматривается, каким образом математические модели, полученные на основе ФКЧ, должны быть модифицированы, чтобы использоваться в приложениях обработки изображений в качестве ФКЧ-фильтра. Отмечается, что фильтрацию с помощью модели ФКЧ можно выполнять и в пространственной, и в частотной области изображения. Обращает на себя внимание то, что в приложениях чаще используется АФКЧ, чем ХФКЧ, видимо, во-первых, потому, что измерений ХФКЧ мало, во-вторых, моделирование ХФКЧ сильно зависит от выбора цветового пространства. Вместе с тем, их применение в задачах обработки цветных изображений может оказаться чрезвычайно полезным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Chen Q., Xu J., Koltun V. Fast image processing with fully-convolutional networks. Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017, vol. 9, pp. 2497-2506.
- Ledig C., Theis L., Huszar F., Caballero J., Cunningham A., Acosta A., Acosta A., Aitken A., Tejani A., Totz J., Wang Z., Shi W. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network. Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017, pp. 4681-4690.
- 3. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 600-612.
- Lissner I., Preiss J., Urban P., Lichtenauer M. S., Zolliker P. Image-difference prediction: From grayscale to color. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, vol. 22, no. 2, pp. 435-446.
- 5. Ватолин Д. С., Паршин А. Е. Методы для объективной оценки качества видеокодеков по сжатым ими видеопоследовательностям. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*, 2006, № 9, стр. 4-12.
- 6. Боков А. А., Ватолин Д. С. Методика объективной оценки качества восстановления фона в видео. Цифровая обработка сигналов, 2016, № 3, стр. 26-33.
- 7. Максимов В. В. Трансформация цвета при изменении освещения. М.: Наука, 1984.
- Рожкова Г. И., Матвеев С. Г. Зрение детей: проблемы оценки и функциональной коррекции. М.: Наука, 2007.
- Zhang X., Wandell B. A. Color image fidelity metrics evaluated using image distortion maps. Signal Processing, 1998, vol. 70, no. 3, pp. 201-214.
- Nadenau M. J., Winkler S., Alleysson D., Kunt M. Human vision models for perceptually optimized image processing–a review. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, vol. 15, pp. 58-70.
- Chou C. H., Liu K. C. A perceptually tuned watermarking scheme for color images. *IEEE Transactions* on *Image Processing*, 2010, vol. 19, no. 11, pp. 2966-2982.
- Wu H. R., Reibman A. R., Lin W., Pereira F., Hemami S. S. Perceptual visual signal compression and transmission. *Proc. IEEE*, 2013, vol. 101, no. 9, pp. 2025-2043.
- Beghdadi A., Larabi M. C., Bouzerdoum A., Iftekharuddin K. M. A survey of perceptual image processing methods. Signal Processing: Image Communication, 2013, vol. 28, no. 8, pp. 811-931.
- Sidorchuk D. S., Volkov V. V., Gladilin S. A. Perception-oriented fusion of multi-sensor imagery: visible, IR, and SAR. Proc. 10th International Conference on Machine Vision, Bellingham, WA: International Society for Optics and Photonics, 2018, vol. 10696, pp. 106961I-1 – 106961I-5.
- 15. Kerr D. A. Chrominance subsampling in digital images. The Pumpkin, 2012, vol. 2012, no. 3, pp. 1-15.

- 16. Шелепин Ю. Е., Колесникова Л. Н., Левкович Ю. И. Визиоконтрастометрия. Л.: Наука, 1985.
- 17. Wuerger S. M., Watson A. B., Ahumada A. J. Towards a spatio-chromatic standard observer for detection. *Human Vision and Electronic Imaging VII*, 2002, vol. 28, no. 4662, pp. 159-173.
- 18. Nadenau M. Integration of human color vision models into high quality image compression. PhD thesis, Lausanne, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, 2000.
- Kim K. J., Mantiuk R., Lee K. H. Measurements of achromatic and chromatic contrast sensitivity functions for an extended range of adaptation luminance. *Human Vision and Electronic Imaging XVIII.* – *International Society for Optics and Photonics*, 2013, vol. 8651, pp. 86511A-1 – 86511A-14.
- 20. Pelli D. G., Bex P. Measuring contrast sensitivity. Vision research, 2013, vol. 90, pp. 10-14.
- Lin K., Liao N., Zhao D., Li H. Method for the measurement of chromatic contrast. Optical Engineering, 2015, vol. 54, no. 3, pp. 033107-1 – 033107-6
- Kim Y. J., Reynaud A., Hess R. F., Mullen K. T. A normative data set for the clinical assessment of achromatic and chromatic contrast sensitivity using a qCSF approach. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 2017, vol. 58, no. 9, pp. 3628-3636.
- 23. Brainard D. H. Cone contrast and opponent modulation color spaces. Human color vision, 1996.
- Watson A. B., Pelli D. G. QUEST: A Bayesian adaptive psychometric method. Perception and Psychophysics, 1983, vol. 33, no. 2, pp. 113-120.
- Van der Horst G. J. C., Bouman M. A. Spatiotemporal chromaticity discrimination. Journal of the Optical Society of America, 1969, vol. 59, no. 11, pp. 1482-1488.
- Rohaly A. M., Owsley C. Modeling the contrast-sensitivity functions of older adults. Journal of the Optical Society of America A, 1993, vol. 10, no. 7, pp. 1591-1599.
- Carney T., Tyler C. W., Watson A. B., Makous W., Beutter B., Chen Chien-Chung, Norcia A. M., Klein S. A. Modelfest: Year one results and plans for future years. *Human vision and electronic imaging V. – International Society for Optics and Photonics*, 2000, vol. 3959, pp. 140-152.
- Barten P. G. J. Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality. Bellingham, WA: Spie Optical Engineering Press, 1999
- Green D. G. The contrast sensitivity of the colour mechanisms of the human eye. The Journal of Physiology, 1968, vol. 196, no. 2, pp. 415-429.
- Granger E. M., Heurtley J. C. Visual chromaticity-modulation transfer function. Journal of the Optical Society of America, 1973, vol. 63, no. 9, pp. 1173-1174.
- Kelly D. H. Spatiotemporal variation of chromatic and achromatic contrast thresholds. Journal of the Optical Society of America, 1983, vol. 73, no. 6, pp. 742-750.
- Mullen K. T. The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings. The Journal of Physiology, 1985, vol. 359, no. 1, pp. 381-400.
- Hirai K., Mikami T., Tsumura N., Nakaguchi T. Measurement and modeling of chromatic spatio-velocity contrast sensitivity function and its application to video quality evaluation. 18th Color and Imaging Conference, Springfield, VA: Society for Imaging Science and Technology, 2010, vol. 2010, no. 1, pp. 86-91.
- Yao J. Measurements of human vision contrast sensitivity to opposite colors using a cathode ray tube display. *Chinese Science Bulletin*, 2011, vol. 56, no. 23, pp. 2425–2432.
- Watson A. B., Ahumada A. J. A standard model for foveal detection of spatial contrast. Journal of Vision, 2005, vol. 5, no. 9, pp. 717-740.
- 36. Pattanaik S. N., Ferwerda J. A., Fairchild M. D., Greenberg D. P. A multiscale model of adaptation and spatial vision for realistic image display. *Computer Graphics (Proc. 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques)*, NY: ACM Press, 1998, pp. 287-298.

- Rovamo J. M., Kankaanpaa M. I., Kukkonen H. Modelling spatial contrast sensitivity functions for chromatic and luminance-modulated gratings. *Vision Research*, 1999, vol. 39, no. 14, pp. 2387-2398.
- Pelli D. G., Rubin G. S., Legge G. E. Predicting the contrast sensitivity of low vision observers. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, vol. 3, no. 13, p. P56.
- Wilson, H. R. Quantitative prediction of line spread function measurements: Implications for channel bandwidths. *Vision Research*, 1978, vol. 18, no. 4, pp. 493–496
- 40. Movshon J. A., Kiorpes L. Analysis of the development of spatial contrast sensitivity in monkey and human infants. *Journal of the Optical Society of America A*, 1988, vol. 5, no. 12, pp. 2166-2172.
- Yang J., Qi X., Makous W. Zero frequency masking and a model of contrast sensitivity. Vision Research, 1995, vol. 35, no. 14, pp. 1965-1978.
- Peli E. Contrast sensitivity functions and image discrimination. Journal of the Optical Society of America A, 2001, vol. 18, no. 2, pp. 283-293.
- Daly S. J. Visible differences predictor: an algorithm for the assessment of image fidelity. Human Vision, Visual Processing, and Digital Display III, 1992, vol. 1666, pp. 2-16.
- Zhang X., Wandell B. A. A spatial extension of CIELAB for digital color image reproduction. SID International Symposium Digest of Technical Papers, Campbell, California: Society for Information Display, 1996, vol. 27, pp. 731-734.
- Johnson G. M., Fairchild M. D. On contrast sensitivity in an image difference model. IS and TS Pics Conference, Springfield, VA: Society for Imaging Science and Technology, 2002, pp. 18-23.
- 46. Johnson G. M., Fairchild M. D. A top down description of S-CIELAB and CIEDE2000. Color Research and Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur, 2003, vol. 28, no. 6, pp. 425-435.
- 47. Yao J., Liu G. A novel color image compression algorithm using the human visual contrast sensitivity characteristics. *Photonic Sensors*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 72-81.

Mathematical models of spatial color perception

Bozhkova V. P., Basova O. A. and Nikolaev D. P.

Abstract—In image synthesis and image processing it is important whether the end user of the resulting image is an automatic system or a human. If the latter is the case, the requirements on the resulting image quality should account for particular qualities of human visual perception. Human visual perception system can be viewed as a complex filter which discards part of the input information. Therefore, formal models of human visual perception can be utilized to optimize image processing algorithms and quantitatively estimate their quality without conducting numerous psychophysical experiments. This review contains the analysis of known mathematical models of human luminance and chromatic contrast sensitivity functions and their conformity with available experimental data.

KEYWORDS: contrast, contrast sensitivity function, human visual system, image processing.