

УДК 004.932

УЛУЧШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ НА ЭТАПЕ ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ОРИГИНАЛА

Ирина Львовна Артюшина, Алексей Иосифович Винокур, Ольга Леонидовна
Митрякова

Московский политехнический университет, Москва, Россия

alex.vinokour@gmail.com

irina.artyushina52@mail.ru

mitryakova_olgal@mail.ru

***Аннотация.** В статье рассмотрены общие подходы к проблеме точности цветовоспроизведения в репродукционных процессах с использованием информационных технологий. Исследованы возможности технологии ICC-профилирования с применением моделей восприятия. Предложено на этапе регистрации использовать HDRI-технология получения цифрового оригинала. Показано преимущество использования дубликционно-точного цифрового оригинала для повышения точности цветовоспроизведения в различных системах визуализации.*

***Ключевые слова:** обработка изображений, ICC, HDRI, цифровой оригинал, согласование цветовых охватов.*

IMPROVING THE ACCURACY OF COLOR REPRODUCTION AT THE STAGE OF DIGITAL REGISTRATION OF THE ORIGINAL

I.L. Artyushina, A.I. Vinokur, O.L. Mitryakova

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

alex.vinokour@gmail.com

irina.artyushina52@mail.ru

mitryakova_olgal@mail.ru

***Abstract.** The article discusses common approaches to the problem of color accuracy in reproduction processes using information technology. The possibilities of ICC profiling technology using perception models have been investigated. It is proposed to use the HDRI technology for obtaining a digital original at the registration stage. The advantage of using a duplication-accurate digital original to increase the accuracy of color reproduction in various visualization systems is shown.*

***Key words:** image processing, ICC, HDRI, digital original, gamut mapping.*

Введение. Проблема точного воспроизведения изображений без потери и искажения информации – актуальная проблема совершенствования репродукционных процессов с самого начала их возникновения. Истоки проблемы заключаются в том, что подавляющее

большинство репродукционных процессов построено на основании использования явления метамерии. Репродукция (копия) оригинала синтезируется комбинацией некоторого количества (обычно 3 или 4) красок (красителей) или излучений, в то время как оригинал в общем случае имеет значительно большее спектральное разнообразие. А так как метамерия существенно зависит от условий наблюдения, то репродукции могут значительно искажать цвета оригинала. Второй источник проблемы обусловлен способностью человеческого зрения к адаптации к яркости освещения, что позволяет человеку воспринимать сцены с динамическим диапазоном (соотношением белого и черного) значительно большим, чем любые современные технические системы могут зарегистрировать и воспроизвести. Таким образом, ограниченность технических возможностей в общем случае также делает нереализуемой точное воспроизведение оригинала в репродукции.

Третьей по счету, но совсем не последней по важности, причиной является то, что восприятие изображений является не только физическим и физиологическим процессом, но и когнитивным. Масштаб изображения, ракурс наблюдения, условия адаптации, настроение наблюдателя, содержание самого изображения и тех изображений, которые наблюдатель рассматривал до этого момента, устойчивые представления об объектах и многое другое, все это играет большую роль в восприятии точности репродуцирования.

Тем не менее, несмотря на объективные обстоятельства, техника и технология репродукционных процессов продолжает активно развиваться из-за огромной востребованности процессов репродуцирования и, как ни странно, приемлемого для потребителя качества изображений на каждом этапе развития техники. Здесь нужно отметить, что если физические и физиологические факторы объективно не позволяют создать точную копию, то когнитивные возможности человека (в первую очередь стремление к опознаванию) наоборот позволяют привыкнуть практически к любому параметрическому репродукционному процессу и рассматривать его результат как психологически точную репродукцию. Именно это свойство нашей психики позволяет вполне удовлетворяться тем, что нам дает техника и технология.

Теоретические исследования, направленные на улучшения технических средств и технологии процессов репродуцирования, относятся в основном к физике и физиологии восприятия, так как более высокий, а именно психический аспект зависит от очень многих факторов, большинство из которых на сегодняшний день изучены только на качественном уровне. Поэтому количественно их описать, а тем более учесть их влияние в настоящее время не представляется возможным.

Достигнуто понимание физики и основных физиологических механизмов процесса восприятия [1 - 4]. Это позволило сформулировать основные требования к процессам репродуцирования, определить общие критерии оптимальности качества репродуцирования [5 - 7], сформулировать основные проблемы и пути их решения [8, 9], разработать и предложить эффективные схемы управления качеством процессов воспроизведения [7, 8]. Определенный этап развития техники и технологии репродукционных процессов завершился созданием технологии ИСС-профилирования с использованием моделей восприятия, позволяющих учитывать не только технические ограничения репродукционных систем, но и большинство встречающихся условий рассматривания. Вместе с тем, появляющиеся работы по новым подходам и технологиям согласования цветовых охватов [9 - 13], убедительно свидетельствуют, что в общем случае проблема точного воспроизведения изображений не решена и практика требует новых решений для появляющихся новых технических возможностей репродуцирования.

Еще одно важное обстоятельство создает новые ситуации, требующие новых теоретических подходов и новых технологических решений. Дело заключается в обычной для нашего времени практикой, когда физический оригинал (сцена, живописная картина и тд) регистрируется в виде цифрового файла. Затем этот файл становится исходной информацией для целого ряда репродукционных процессов, главное отличие которых друг от друга заключается в различных системах визуализации (полиграфический оттиск, экран монитора, телевизор, проецирование на отражательный экран и тп). При этом требуется свой подход к каждому из репродукционных процессов.

В данной работе предлагается усовершенствование процессом управления точностью цветовоспроизведения путем введения элементов технологии репродуцирования высококонтрастных оригиналов (HDRI technology). Главное отличие заключается в формировании дубликационно точного цифрового оригинала на стадии регистрации исходного физического оригинала.

Описание репродукционного процесса. Под репродуцированием будем понимать такой технологический процесс, который на входе имеет оригинал, а на выходе имеет изображение этого оригинала, которое человек может физически наблюдать. Содержание изображения или частью содержания являются физические объекты, которые человек также может в принципе наблюдать. В отличии от репродуцирования процесс демонстрации полностью генерированных на компьютере изображений называется визуализацией.



Рис. 1. Схема репродукционного процесса с использованием цифровых технологий

Представленная на рисунке 1 обобщенная схема современного типового репродукционного процесса с использованием цифровых технологий содержит три стадии. Первая стадия – регистрация оригинала в виде цифрового файла, который получил название цифровой оригинал. В качестве оригинала может быть сцена, состоящая из совокупности физических объектов, может быть живописное произведение, может быть фотоснимок, полиграфический оттиск, физическая сцена с элементами дополненной и виртуальной реальности, сгенерированное на компьютере изображение и тп. В качестве системы регистрации может выступать цифровая камера, а может и более сложная система, например, как используемые в томографии. Важно лишь, чтобы регистрируемый сигнал мог бы интерпретироваться как изображение. Регистрация может быть одностадийной (аналог фотоснимку или сканированию) или многостадийной (например, создание панорам, работа с высококонтрастными оригиналами, томография). В общем случае цифровой оригинал получается средствами вычислительной фотографии и требования к нему заключаются в достижении возможной полноты и точности изобразительной информации об объекте регистрации и условиях его наблюдения [9, 14]. Цифровой оригинал используется для архивного хранения и как источник для визуализации в различных технических системах.

Вторая стадия носит название промежуточной и имеет целью создание цифровой копии, которую необходимо воспроизвести в выбранной системе визуализации. Как уже отмечалось, один и тот же цифровой оригинал может быть визуализирован различными, порой очень разными по технологии и технике, системами визуализации. На этой стадии

проводится вся обработка, учитывающая технологический процесс визуализации, его репродукционный охват, условия наблюдения итогового изображения. Требования к цифровой копии заключаются в ее вхождении в репродукционный охват системы визуализации, учета технологических преобразований и возможных искажений стадии визуализации.

Третья стадия – визуализация – имеет на входе цифровую копию, специально созданную для данного процесса визуализации. На выходе – изображение, которое человек может физически наблюдать. К типичным системам визуализации относится полиграфическое воспроизведение, воспроизведение на мониторе того или иного типа, проецирование на отражающий или просветный экран.

Оценка качества изображения. При оценке качества изображений и в том числе качества репродуцирования в отечественной литературе [15, 16, 6] принято рассматривать три аспекта.

- Резкость изображения
- Воспроизведение градиционных соотношений деталей изображения.
- Воспроизведение цветового тона деталей изображения

Аспекты ранжированы по важности влияния на оценку качества. В Иностранной литературе [7] предпочтение отдается цветопередаче, а резкость рассматривается в последнюю очередь. Нам представляется совершенно очевидным главенствующее положение резкости, так как нерезкое изображение существенно затрудняет опознавание предметов, что делает просто невозможным говорить об оценке качества изображений неизвестных объектов. В то же время даже значительные цветовые искажения, например, четно-белое или монохромное изображение, не приводят к фатальной потере качества. Совокупность показателей передачи градаций и цветового тона образует то, что называется цветовоспроизведением. Именно качество цветовоспроизведения является предметом исследования в настоящей работе.

В 30-е годы 20-го века Н.Д.Нюберг [5] предложил три степени точности цветовоспроизведения

Физическая точность: все соответственные точки оригинала и его изображения характеризуются одинаковым спектральным составом излучения, воспринимаемого наблюдателем. По указанным выше причинам эта степень точности достигается в весьма редких случаях.

Физиологическая точность: соответственные точки оригинала и его изображения воспринимаются наблюдателем, как имеющие одинаковый цвет. К этой степени точности должны стремиться все репродукционные процессы.

Психологическая точность: Психологическая точность считается достигнутой, если изменение цвета хотя бы одной точки сюжетно важной детали приведет к ухудшению оценки качества репродукции. Это определение не конструктивное. Нет единственного психологически точного изображения оригинала. Есть классы, которые определяются возможностями репродукционного процесса, например, черно-белая фотография, разбеленное изображение на матовом стекле, зачерненное изображение – полиграфический оттиск с использованием различных количеств четвертой черной краски. Данное Н.Д.Нюбергом определение позволяет отыскивать оптимум в выбранном классе репродукций.

Для нужд практики в 70-е годы 20-го века Хант [7] дал свою классификацию точности воспроизведения, которую целесообразно рассматривать в сравнении с нюберговской.

Таблица 1

Точность цветовоспроизведения

По Ньюбергу	По Ханту
Физическая	
Физиологическая	<p>По восприятию: используются модели восприятия с учетом изменений условий наблюдения. Цвета репродукции по цветовым ощущениям соответствуют цветам оригинала.</p> <p>Колориметрическая: Частный случай цветовоспроизведения по восприятию. применяется только при одинаковых условиях рассматривания оригинала и репродукции.</p>
Психологическая	<p>Приоритетная: получение предпочитаемых результатов заказчиком - возможно лучшей репродукции того или иного элемента изображения.</p> <p>Визуально-комфортная: обеспечивает ощущение визуального комфорта, не претендуя на точность передачи цветов. Применяется, когда наблюдатель не знаком с оригиналом.</p> <p>Произвольная: никаких дополнительных цветовых преобразований не производится. Точность цветопередачи деталей определяется возможностями процесса.</p>

Как видно из таблицы, конкретные реализации степеней точности в основном носят субъективный характер. Тем не менее, введенные понятия позволяют формализовать задачи репродуцирования в смысле достижения заданной точности цветовоспроизведения. Без потери общности подхода будем проводить формализацию для случая репродуцирования двумерных изображений с цветовым синтезом тремя основными цветами. Обобщение на более высокие размерности не носит принципиального характера.

Введем обозначения

$O(\lambda, x, y)$ - спектральная характеристика оригинала для точки с пространственными координатами (x, y) , λ – длина волны электромагнитного излучения в видимом диапазоне спектра.

$I(\lambda, x, y)$ - спектральная характеристика изображения для точки с пространственными координатами (ξ, η) .

Будем рассматривать реакцию зрительной системы R в зависимости от ее адаптации. Совокупность адаптационных параметров обозначим вектором A . К учитываемым параметрам, определяющим адаптацию, относят [7, 8]

- Спектральное распределение энергии источника освещения
- Уровень фотометрической яркости
- Относительная фотометрическая яркость и цветность окружения

- Относительная фотометрическая яркость и цветность фона
- Блики на изображении
- Размер изображения и расстояние просмотра.

В общем случае условия наблюдения оригинала A_O и изображения A_I отличаются.

Реакция зрительной системы формируется во времени (так называемые индукционные процессы) и также в зависимости от самого наблюдаемого оригинала или его изображения [1, 2]. Таким образом, реакцию зрительной системы на оригинал $O(\lambda, x, y)$ можно записать как

$$R_O(x, y) = R\{[A_O, O(\lambda, x, y)], O(\lambda, x, y)\}$$

Аналогично реакция на изображение $I(\lambda, x, y)$ записывается как

$$R_I(x, y) = R\{[A_I, I(\lambda, x, y)], I(\lambda, x, y)\}$$

В квадратные скобки помещены параметры функции. Зависимости эти весьма сложны, до конца не изучены. К настоящему времени предложено большое число моделей восприятия, и исследования в этом направлении продолжаются [8].

Процесс репродуцирования должен быть построен так, чтобы обеспечивалась равенство реакций

$$R_I(x, y) = R_O(x, y),$$

где равенство понимается как достижение той или иной точности воспроизведения.

Использование технологии ИСС профилирования. Для реализации точного в описанном выше смысле цветовоспроизведения применяется система управления цветом (CMS – color management system), основанная на технологии ИСС-профилирования. Нужно отметить, что в доцифровую эпоху реализация такой технологии была невозможна. Однако теоретические ее основы были заложены еще в 60-е годы 20-го века в нашей стране Л.Ф.Артюшиным [6] на волне применения кибернетических методов в различных областях техники в виде предложенного им так называемого метода сравнения.

Идея метода сравнения заключается в том, что любой репродукционный процесс разбивается на элементарные звенья, топология соединения которых отвечает выбранной схеме процесса репродуцирования в целом. Звенья не обязательно последовательно соединяются друг с другом, могут быть параллельные цепочки, например, для цветоделенных или спектрзональных изображений, может быть соединение типа звезды, в случае использования нескольких мониторов и цветопроб различного рода. Более того, элементарные звенья не обязаны быть в самом деле элементарными. В качестве таких звеньев могут выступать довольно сложные технологические цепочки. Отличие звена от репродукционного процесса в целом заключается в физической природе входов и выходов. Для процесса в целом – это изображения. Для элементарного звена это могут быть как физические изображения, так и цифровые файлы. Важно только, чтобы преобразование производилось не только в результате вычислений, но, чтобы присутствовал какой либо физический или химический процесс, например, сканирование – преобразование светового сигнала в цифровую форму, визуализация на экране монитора – преобразование цифрового файла в электромагнитное излучение, процессы химико-фотографической обработки, перенос краски с формы на запечатываемый материал и другие. Для реализации метода сравнения к каждому звену предъявляются два требования. Во-первых, должна иметься возможность поддержания в пределах технологических допусков стабильности работы звена в процессе проведения циклов преобразования входного сигнала в выходной. И, во-вторых, должна иметься настройка звена на проведение заданного преобразования. Настройка осуществляется путем сравнения (именно по этой операции метод получил название метода сравнения) фактически полученного преобразования с требуемым (заданным) для известного

тестового входного сигнала, который симулирует весь рабочий диапазон реальных сигналов. На основании использования массивов входных и выходных сигналов преобразования теста настраиваемым звеном строится процедура, позволяющая так скорректировать входной сигнал, что звено реализует заданное преобразование (с точностью до технологических допусков) для любого реального сигнала. Метод сравнения является весьма гибким подходом к управлению технологическими процессами многих классов, а не только преобразований изображений.

Технология ИСС-профилирования основана как раз на этой идее, хотя основатели ИСС и не дают прямой ссылки на работы Артюшина. Обеспечение стабильности осуществляется в ИСС технологии путем калибровки устройств, а настройка на реализацию заданного преобразования путем так называемой характеристики. Технологические проблемы ИСС профилирования хорошо проработаны. Однако одной из основных трудностей и неоднозначностей остается несоответствие цветовых охватов входных устройств и систем визуализации [7, 8]. Предложены разные подходы, но однозначного решения нет и быть не может в силу когнитивной составляющей.

Использование технологии регистрации высококонтрастных оригиналов (HDRI). Нами предлагается использовать на первой стадии репродукционного процесса (см.рис 1), разработанный авторами подход получения дубликационно точного цифрового оригинала на основе использования технологии регистрации и воспроизведения высококонтрастных оригиналов [17]. Название дубликационный было предложено Н.Д.Нюбергом [5, 6] и вошло в русскоязычную литературу для обозначения тождественности, дублирования копией оригинала. Таким образом, дубликационно точный цифровой оригинал - это цифровой файл, который содержит полную информацию о цветах оригинала без искажений, обычно вносимых устройствами регистрации. Преимущество использования дубликационно точного цифрового оригинала заключается в существенном упрощении получения цифровой копии – источника для систем визуализации на дальнейших стадиях репродукционного процесса. Это подтверждается аналогичными идеями введения эталонного входного носителя в англоязычной литературе [18].

Использование дубликационно точного цифрового оригинала позволяет преодолеть проблему несоответствия цветового охвата и оригинала и репродукционного охвата съемочной камеры. Метод заключается в регистрации нескольких кадров одной и той же сцены, снятой с различными экспозициями. При малых экспозициях хорошо проработаны градационные соотношения светлых деталей оригинала, а тени могут остаться без различимых деталей из-за того, что охват оригинала больше охвата съемочной камеры. Для больших экспозиций проработаны детали в тенях, а света могут деталей не содержать. В работе [17] рассмотрены необходимые математические преобразования для построения дубликационно точного цифрового оригинала. Количество необходимых экспозиций определяется соотношением динамических диапазонов оригинала и съемочной камеры. Обычно в технологии HDRI рассматривается только яркостной (светлотный) диапазон. Нами предлагается обобщить этот прием на все каналы регистрации данного репродукционного процесса. Для регистрации тремя приемниками – это три канала, для спектральной регистрации количество каналов равно числу спектральных зон. Практически всегда выполняется предположение, что каналный диапазон оригинала менее, чем в два раза превышает диапазон регистрации в соответствующем канале. В этом случае достаточное количество экспозиций определяется простой формулой – количество каналов плюс один. Рассмотрим выбор экспозиций на примере трехканального регистратора.

Пусть имеются три канала. Обозначим их x y z . Обозначим величины интервалов изменения соответствующих цветовых координат $2\Delta x_o$, $2\Delta y_o$ и $2\Delta z_o$, а величины интервалов охватов каналов камеры $2\Delta x_c$, $2\Delta y_c$, $2\Delta z_c$ соответственно. Обозначим (x_o, y_o, z_o) координаты центра тела цветового охвата оригинала в том смысле, что куб с центром в точке (x_o, y_o, z_o) , построенный по отрезкам $(x_o - \Delta x_o, x_o + \Delta x_o)$, $(y_o - \Delta y_o, y_o + \Delta y_o)$ и $(z_o - \Delta z_o, z_o + \Delta z_o)$ содержит все тело цветового охвата оригинала. Экспозиционный сдвиг ΔE для каждого канала выбираем таким образом, чтобы выполнялись неравенства

$$\begin{aligned} \Delta x_c + \Delta E_x &> \Delta x_o \\ \Delta y_c + \Delta E_y &> \Delta y_o \\ \Delta z_c + \Delta E_z &> \Delta z_o, \end{aligned}$$

гарантирующие, что в совокупности кадров все градации оригинала в каждом канале будут проработаны. Экспозиционные условия задаются таблицей

Таблица 2

Экспозиционные условия съемки совокупности кадров для получения дубликационно точного цифрового оригинала

канал	Экспозиция 1	Экспозиция 2	Экспозиция 3	Экспозиция 4
x	x_o	x_o	$x_o + \Delta E_x$	$x_o - \Delta E_x$
y	y_o	$y_o + \Delta E_y$	$y_o - \Delta E_y$	$y_o - \Delta E_y$
z	$z_o + \Delta E_z$	$z_o - \Delta E_z$	$z_o - \Delta E_z$	$z_o + \Delta E_z$

Этот вариант выбора экспозиций не единственный, но легко убедиться, что он отвечает требованию содержания всех точек тела цветового охвата оригинала внутри тела, образованного совокупностью снимков. Используя предложенную в [17] методику можно построить цифровой дубликационно точный оригинал

Заключение. Проведенные исследования показали, что современные репродукционные процессы, основанные на применении цифровых технологий, существенно расширили область предназначенных для визуализации изображений за счет применения методов вычислительной фотографии. Характерной чертой является использование одного и того же цифрового оригинала для его репродуцирования с помощью различных систем визуализации. Вместе с тем, анализ показал, что несоответствие цветовых охватов оригинала и используемых для его воспроизведения систем визуализации по-прежнему делает актуальными теоретические и экспериментальные исследования по совершенствованию методов и средств повышения точности воспроизведения. Проведенное структурирование репродукционного процесса с выделением стадии регистрации и применение методов получения цифрового дубликационно точного оригинала с помощью технологии регистрирования высококонтрастных оригиналов дает возможность улучшить качество репродукций практически для любых систем визуализации за счет облегчения задачи согласования цветовых охватов оригинала и изображения.

Список литературы

1. Кравков С.В. Цветовое зрение. – М.: Издательство АН СССР, 1951. - 189 с.
2. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Часть 2. Физиологическая оптика и колориметрия. 2-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1961. — 432 с.
3. Пэдхем Ч., Сондерс Дж. Восприятие света и цвета. – М.: Мир, 1978. — 256 с.
4. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. – М.: Мир, 1990. - 241 с.
5. Ньюберг Н.Д. Теоретические основы цветной репродукции. – М.: Советская наука, 1948. - 176 с.
6. Артюшин, Л.Ф. Основы воспроизведения цвета в кино, телевидении и полиграфии. – М.: Искусство, 1970. - 548 с.
7. Hunt, R.W.G. The Reproduction Of Color (6th Ed.). - England: Fountain Press, 2004. - 724 p.
8. Fairchild, M.D. Color appearance models (2nd Ed.) - Boston: Addison Wesley Longman, 2004, - 703 p.
9. Vinokur A.I. Information Technologies in Culture and Education: Image Processing Issues // Modern Applied Science. – 2015. - Vol. 9(5). - P. 314-322.
10. Bo Yang, Hung-Yu Chou, Tsung-Hsun Yang Color reproduction method by support vector regression for color computer vision // Optik. – 2013. - N 124. – P. 5649– 5656.
11. Wang Yuchen, Wang Xiaohong, Li Jie Color appearance phenomena under high ambient illumination // Optik. – 2017. - N 145. – P. 22–29.
12. Javier Vazquez-Corral, Marcelo Bertalmío Spatial gamut mapping among non-inclusive gamuts // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2018. - N 54. – P. 204–212.
13. Hao Cai, Leida Li, Zili Yi, Minglun Gong Blind quality assessment of gamut-mapped images via local and global statistical analysis // J. Vis. Commun. Image R. – 2019. - N 61. – P. 250–259.
14. Vinokur AI, Artyushina IL. Information systems: image registering and reproducing issues // Problems Printing and Publishing. – 2011. - N 4. – P. 75-82.
15. Комар В.Г. Отчёт по научно-исследовательской работе «О критерии резкости изображения в кинематографе и об оценке качества изображения в различных системах кино» // НИКФИ, 1961 г.
16. Артюшина И.Л., Винокур А.И. О точности передачи градационной и структурной информации в репродукционных процессах // Сборник научных трудов Научно-исследовательского кинофотоинститута «Методы совершенствования технологии кинематографии с использованием вычислительной техники». - М.: НИКФИ, 1996. - С. 43- 47.
17. Артюшина, И.Л., Ахтариев, Р.Ж., Винокур, А.И. Методы регистрации и воспроизведения высококонтрастных оригиналов в системах с ограниченным динамическим диапазоном // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. - 2009. -№ 4. - С. 9-15.
18. Spaulding, K.E., Woolfe, G.J., and Giorgianni, E.J., Image States and Standard Color Encodings (RIMM/ROMM RGB) // IS&T and SID's Eighth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies, Applications. - Springfield, Va., U.S.A, 2000. – P. 288-294.

Дата поступления: 9 июля 2019 г.