

УДК 655.027

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ВЫСОКОКОНТРАСТНЫХ ОРИГИНАЛОВ В СИСТЕМАХ С ОГРАНИЧЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

© И. Л. Артюшина, Р. Ж. Ахтариев, А. И. Винокур, д.т.н.,
профессор, БГТУ, Минск, Республика Беларусь

Розглянуто процес відтворення високо контрастних об'єктів у системах з обмеженим динамічним діапазоном. Також розглянуто можливий алгоритм побудови високо контрастного цифрового оригіналу, який містить повну інформацію про світлоту оригінального об'єкту, — його віртуальна цифрова копія. Метою роби було порівняння алгоритму динамічних діапазонів високо контрастного оригіналу і системи відтворення, заснованої на просторовій вибірковій тоновій корекції.

Process of reproduction of high-contrast objects in systems with limited dynamic range is considered. Possible algorithm of building high-contrast digital original which contains full information about luminance of original object — its virtual digital copy is considered. The algorithm of the comparison dynamic ranges of the high-contrast original and the reproduction system, based on spatial selective tone correction is purposed.

Постановка проблемы

Для исследования возможностей репродуцирования высококонтрастных объектов рассмотрим схему процесса воспроизведения, представленную на рис. 1.

Первая операция состоит в регистрации оригинала в цифровом или аналоговом виде. По сложившейся практике оригинал может воспроизводиться для разных целей и в различное время с использованием различных систем воспроизведения. Задача согласования динамических диапазонов оригинала и системы воспроизведения не имеет единственного правильного решения [1] и зависит от сюжета, вида издания и це-

лей репродуцирования. Очевидно, что для получения высококачественной продукции в период всего времени использования оригинала требуется, чтобы оригинал точно повторял все градации объекта съемки. Вместе с тем динамический диапазон современных цифровых камер составляет в среднем 1,6 единиц оптической плотности или 5EV (экспозиционных уровней) [2]. Диапазон реальных объектов может быть на порядок выше (табл. 1), поэтому возникают градационные искажения, особенно в крайних значениях гистограммы (тнях и светах) [3].

В аналоговых процессах полезная ширина достигает 3-4

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

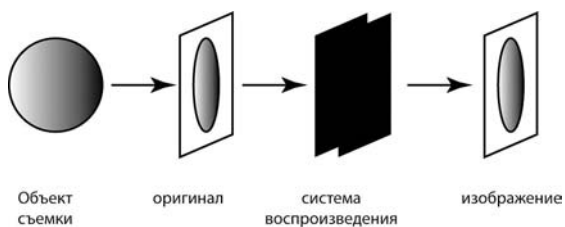
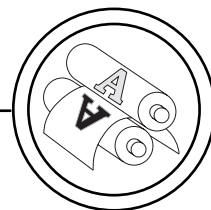


Рис. 1. Схема системы воспроизведения

единиц оптической плотности, что обычно достаточно для регистрации различных по семантике изображений.

При визуализации цифровых изображений динамический диапазон монитора составляет в среднем 2,6 единиц оптической плотности, при этом сильно зависит от внешнего освещения, а полиграфического оттиска 1,6

единиц, что может быть на порядок меньше чем динамический диапазон изображения в файле.

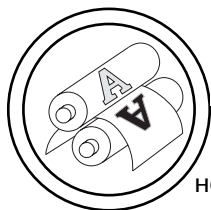
Возникают очевидные проблемы:

1. При регистрации оригинала требуется использовать технологию, которая обеспечивала бы получение цифрового высококонтрастного оригинала, точ-

Таблица 1

Динамический диапазон реальных объектов и системы регистрации и воспроизведения

Сюжет	контраст	ΔD
Пейзаж летний с темным передним планом при солнечном свете	1:100-1:300	2,0-2,47
Пейзаж зимний с темным передним планом при солнечном свете	1:300-1:400	2,47-2,6
Пейзаж с очень темным передним планом на фоне белых облаков	1:300-1:1000	2,47-3,0
Узкие затемненные улицы с отдельными зданиями, освещенными солнцем	1:100-1:500	2,0-2,69
Темные пролеты, арки мостов и ворот с ярко освещенной солнцем далью за ними	1:1000-1:10000	3,0-4,0
Внутренний вид темной комнаты, снимаемой против ярко освещенных окон без фотовспышки	До 1:100000	До 5,0
Внутренний вид светлой комнаты снимаемой против окон без подсветки	1:100-1:500	2,0-2,69
Цифровой фотоаппарат	1:40-1:60	1,6-1,8
Монитор (уменьшение общего контраста напрямую связано с уровнем внешнего освещения, поэтому данный параметр является усредненным значением будет, скорее всего, на порядок ниже)	1:400	2,6



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

но повторяющего распределение светлот объекта съемки. Такой оригинал может быть назван виртуальным, так как он никогда не воспроизводится непосредственно, а только после градационных преобразований, согласующих динамический диапазон объекта съемки и процесса воспроизведения.

2. Градационные преобразования, направленные на согласование с динамических диапазонов объекта съемки (этот диапазон имеет цифровой оригинал) и системы воспроизведения. Проблема заключается в создании технических средств, обеспечивающих достижение целей издания. Первый путь — без автоматизации, используя инструменты системы обработки — трудоемкий, не всегда устраивающий потребителей. Второй путь — создание набора автоматических процедур, которые бы соответствовали наиболее распространенным сюжетам, видам изданий и областям применения.

Анализ предыдущих исследований

Необходимость согласования динамических диапазонов изображения и системы визуализации оставляет открытым вопрос точности воспроизведения, как с колориметрической так и с художественной стороны.

Первая задача — это получение цифрового высококонтрастного оригинала. Как решение возможно использование технологии регистрации изображений с расширенным динамическим диапазоном (High Dynamic Range — HDR).

Все методы получения таких изображений, не использующие специального оборудования с высококонтрастными матрицами, имеющими в настоящее время очень высокую стоимость, основываются на регистрации нескольких изображений одного объекта с различными значениями экспозиции, подобно механизмам адаптации человеческого зрения.

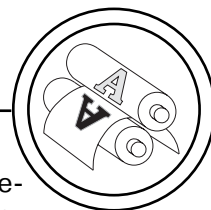
После получения серии изображений для формирования единого файла — высококонтрастного цифрового изображения требуется их последующая обработка. Отдельные изображения необходимо соединить, основываясь на их экспозиционных значениях.

Соединение изображений обычно происходит путем вычисления значений освещенностей элементов объекта съемки. Для этого тем или иным способом строится функция, обратная характеристической кривой съемочного процесса.

В 1995 году Mann и Picard аппроксимировали характеристическую кривую степенной функции (γ -преобразование). Метод позволял получать высококонтрастные цифровые оригиналы, однако точность его была невысока из-за необходимости выбора коэффициентов аппроксимирующей функции [4].

Иное описание характеристической кривой было предложено в 1997 году Debevec и Malik, а именно логарифмическая аппроксимация. Ограничение метода заключалось в том, что необходимо точно определить экспозицию, с которой производилась съемка. Эта модель работает довольно хорошо

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



для изображений содержащих мало шумов. Именно поэтому в качестве аддитивного компонента в их уравнение добавляется функция размытия [5].

Для повышения точности представления характеристической кривой Mitsunaga и Nayag в 1999 году предложили полиномиальное приближение, что также требовало знание использованных уровней экспозиции.

Следует отметить, что использование аналитических методов, несмотря на учет градационного преобразования, нелинейность устраняет не полностью как из-за самого способа аппроксимации, так и по причине некоторой произвольности в определении коэффициентов [4].

Альтернативный подход был предложен Taylor Johnson, Sarar McGee, Robert Ortman, Tianhe Yang. Он заключался в сложении цифровых координат с некоторыми весами. Метод совсем не учитывает нелинейность градационного преобразования, но формально позволяет получать высококонтрастный цифровой оригинал [6].

Высококонтрастные оригиналы не должны иметь искажений в регистрации градационного содержания. Приведенные алгоритмы вносят нелинейные искажения, трудно учитываемые на стадии регистрации. Сохранение линейности крайне важно при использовании полученных изображений в качестве архивной информации, так как появление систем воспроизведения высококонтрастных изображений является очевидным и дополнительная нелиней-

ность вносимая системами регистрации становится нежелательной.

Для минимизации нелинейных искажений при регистрации высококонтрастных оригиналов в настоящей работе предлагается метод, основанный на экспериментальном учете формы характеристической кривой съемочного процесса, который хорошо себя зарекомендовал в системах управления воспроизведения изображений [7].

Если определить полученную экспозицию как функцию $Q = \lg H$, то оптическая плотность $D = f(Q)$,

$$D_{\text{pic}} = \lg t_0 + \lg E_0 - D_{\text{or}}, \quad (1)$$

где D_{pic} — оптическая плотность изображения, а D_{or} — оптическая плотность оригинала. Обозначим часть уравнения как $C_0 = \lg t_0 - \lg E_0$, тогда

$$D_{\text{pic}}^{(i)} = f(Q + C_1 - C_0) \quad (2)$$

i -порядковый номер изображения в серии,

$$Q + C_1 - C_0 = f^{-1}(D_{\text{pic}}), \quad (3)$$

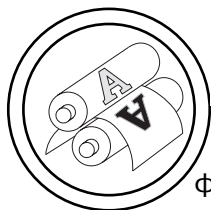
$$D_{\text{or}}^{(i)} = C_1 - f^{-1}(D_{\text{pic}}^{(i)}), \quad (4)$$

значение частной производной берется в точке соответствующей i -му изображению оригинала

$$\bar{D}_{\text{or}} = \alpha \sum \frac{\partial f}{\partial Q} D_{\text{or}}^{(i)}, \quad (5)$$

где α — нормирующий множитель равный сумме весовых коэффициентов.

Обычно данные поступают с камер в виде 24 битных JPEG



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

файлов (по 8 бит на каждый цветовой канал). При использовании формата RAW для регистрации изображений значение уровней квантования равняется разрядности АЦП фотокамеры и для современных камер достигает в среднем 12-14 бит. Но это крайне мало для описания всех градаций, которые могут быть зафиксированы человеческим зрением. Для преодоления ограничений JPEG и TIFF были разработаны форматы файлов с расширенной разрядностью. В табл. 2 представлены наиболее распространенные форматы кодирования данных с расширенным динамическим диапазоном [8].

При воспроизведении высококонтрастных оригиналов возникает неоднозначность градиционного преобразования, обеспечивающего сжатие динамического диапазона до уровня, соответствующего возможностям системы воспроизведения. Выбор того или иного алгорит-

ма сжатия зависит от целей репродукции изображения и сюжета. Часто изображения, полученные в автоматическом режиме, могут быть неудовлетворительными с точки зрения потребителя. Общего единого универсального алгоритма не существует, однако множество автоматических алгоритмов непрерывно пополняется [4, 9, 10].

Цель работы

В настоящей работе предлагается метод пространственно-селективной градиционной коррекции, сходный с механизмом зрительной адаптации глаза по самой яркой точке с последующей передачей градаций в соответствии с естественным визуальным контрастом.

Результаты проведенных исследований

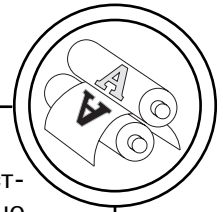
Примером, иллюстрирующим идею данной технологии, является гравюра. Самые яркие места гравюры — это белая бума-

Таблица 2

Формат sRGB и форматы кодирования данных с расширенным динамическим диапазоном

Название	Цветовой охват	Разрядность	Динамический диапазон
sRGB	Нет	24	1,6 (1:0,025)
Pixar Log TIFF	Нет	33	3,8 (25:0.004)
Radiance RGBE	Нет	32	76 (1038:10-38)
Radiance XYZE	Да	32	76 (1038:10-38)
OpenEXR	Да	48	10,7 (65000:0,0000012)
Microsoft/HP scRGB	Да	48	3,5 (7,5:0,0023)
Microsoft/HP scRGB-nl	Да	36	3,2 (6,2:0,0039)
Microsoft/HP scYCC-nl	Да	36	3,2 (6,2:0,0039)

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



га, а самые темные — это черная краска, то есть максимальный контраст изображения находится в рамках естественного визуального контраста 1:40. Несмотря на это, нет никаких ограничений для воспроизведения гравером любых объектов, в том числе и самых контрастных [11].

То же самое предлагается реализовать в цифровой фотографии, используя современные компьютерные системы. Идея заключается в сегментировании всего поля изображения на зоны, в которых градационная передача определяется соответствующим локальным максимумом или минимумом. Для обеспечения целостности визуального восприятия итогового изображения необходимо, чтобы границы смежных участков пересекались с некоторым размытием.

Последовательность действий при реализации алгоритма.

1. Определение локальных максимумов и минимумов светлоты оригинала.

2. Сегментация на участки с собственными градационными характеристиками. При этом

учитывается, что размер участка не должен быть значительно меньше средней величины саккадического движения глаза, равной 5-15 угловым градусам.

3. Определение градационной характеристики каждого выделенного участка. Состоит из двух шагов. Локальный максимум (минимум) по определенным правилам доводится до глобального максимума (минимума), достижимого в системе воспроизведения. Тем самым достигается как согласование динамических диапазонов оригинала и системы воспроизведения, так и обеспечивается максимальное для данной системы градационное разнообразие изображения. Второй шаг заключается в построении градационного преобразования, обеспечивающего дубликционно точную передачу соотношений тонов светлоты оригинала в рассматриваемом сегменте изображения.

4. Проведение незначительного регулируемого размытия изображения по границам сегментов с собственными градационными характеристиками.

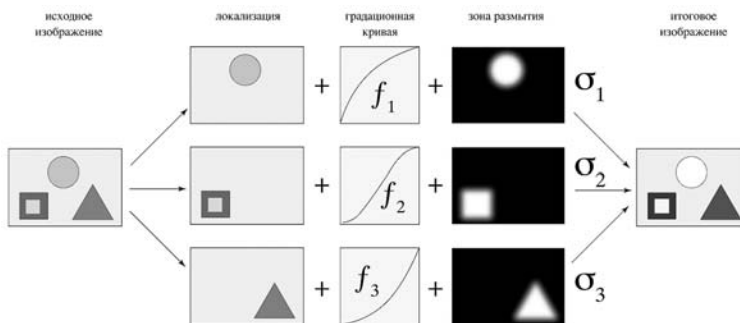
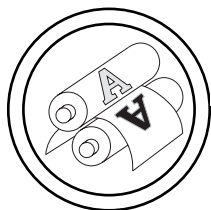


Рис. 2. Метод пространственно-селективной коррекции при воспроизведении высококонтрастных оригиналов



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

Выводы

Технология регистрации высококонтрастных оригиналов средствами современной цифровой фотографии предполагает проведение градационного преобразования, обеспечивающего согласование динамических диапазонов объекта съемки либо с цифровой камерой, либо с некоторой системой визуализации. Если конкретный вид проведенного преобразования неизвестен, то цифровой файл, выступающий в качестве оригинала для воспроизведения изначально содержит нелинейные градационные искажения. Предлагается алгоритм формирования цифрового высококонтрастного оригинала, основанный на экспериментальном учете нелинейности процесса регистрации. Этот алгоритм исключает нелинейность процесса и позволяет зафиксировать прообраз, сохраняя все уровни яркос-

тей присутствующих на объекте съемки. Полученное цифровое изображение становится виртуальным оригиналом, пригодным для многократного и многоцелевого использования и архивного хранения.

Градационное преобразование полученного оригинала для его последующего воспроизведения зависит от конкретной художественной задачи. В этой связи требуется набор методов, позволяющих производить согласование динамических диапазонов. Предлагается проводить селективную по пространству градационную коррекцию, которая осуществляет сжатие динамического диапазона с учетом свойств зрения. Имеет смысл воспользоваться опытом эффективного решения задач согласования динамических диапазонов в смежных областях, в частности при изготовлении гравюр.

1. Артюшин Л. Ф. Основы воспроизведения цвета / Л. Ф. Артюшин. — М. : Искусство, 1970.
2. Смирнова А. П. Сравнение изображений полученных профессиональными и полупрофессиональными цифровыми камерами: дипломная работа / А. П. Смирнова. — М. : МГУП, 2005. — 78 с.
3. Яштолд-Говорко В. А. Печать фотоснимков / В. А. Яштолд-Говорко. — М. : Искусство, 1968.
4. Alex Jacobs. High Dynamic Range Imaging and its Application in building Research / A. Jacobs // *Advances in Building Energy Research*. — 2007. — vol. 01. — S. 177—202.
5. Paul Debevec. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs / P. Debevec, J. Malik *Proceedings SIGGRAPH*. — 1997— Pp. 369—378.
6. Taylor Johnson. Exploring High Dynamic Range Imaging / T. Johnson, S. McGee, R. Ortman, T. Yang // *HDR image creation*. — part 3. — 2006. — Режим доступа до журн. : <http://www.cnx.org>.
7. Белоусов А. А. Технология копирования архивных фильмовых материалов / А. А. Белоусов, А. И. Винокур, М. С. Васин. — М. : НИКФИ, 2003.
8. Ward Greg. High Dynamic Range Image Encodings / Ward Greg. — 2004. Режим доступа : <http://www.anyhere.com>.
9. Garrett M. Johnson. Rendering HDR Images / Garrett M. Johnson, Mark D. Fairchild // *Munsell Color Science Laboratory*. — Chester F. Carlson Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology. — 2003.
10. Лукин А. Введение в цифровую обработку сигналов / А. Лукин. — М. : МГУ, 2002.
11. Железняков В. Цвет и контраст / В. Железняков. — М. : ВГИК, 2003.

Надійшла до редакції 04.09.09