

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СО СВЕРХШИРОКИМ  
ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИХ  
В ВИДЕОПРИЛОЖЕНИЯХ**

**Тепухина А.В.**

**HIGH DYNAMIC RANGE IMAGING ALGORITHMS AND THE MATTERS  
OF THEIR IMPLEMENTATION FOR VIDEO APPLICATIONS**

**Terukhina A.V.**

ГП УНИИРТ

***Аннотация.** В статье освещены вопросы, связанные передачей и воспроизведением изображений со сверхшироким динамическим диапазоном и вопросами применимости алгоритмов обработки таких изображений для видеосистем.*

Оценка и оптимизация качества работы цифровых видеосистем, применительно к съёмке, передаче, хранению и воспроизведению видеоинформации – одна из важнейших проблем в области обработки изображений. Причиной тому – сложность функционирования зрительной системы и процессов восприятия, которые определяют видимость искажений и т.о. субъективное качество воспроизводимого изображения. Возникает вопрос, что принять в качестве критерия качества изображения и как оценивать качество работы всей телевизионной системы "от света до света". Однозначно на этот вопрос ответить сложно, т.к. степень заметности и приемлемости заметных искажений для наблюдателя определяется, в первую очередь, контентом самого изображения, когда вступают в роль механизмы цветовой и пространственно-частотной адаптации, эффекты маскирования, механизмы контрастной чувствительности, когнитивные факторы и т.п.

В качестве критерия качества работы телевизионной системы, можно принять перцептивную прозрачность в случае передачи естественных изображений и реалистичность в случае передачи синтетических. Под перцептивно-прозрачной, в данном случае, понимается система, при просмотре изображений на выходе воспроизводящего устройства которой возникают такие же зрительные ощущения, какие возникали бы при просмотре сцены непосредственно в месте съёмки. Однако, при попытках реализации такой системы неизбежно возникает ряд сложностей. Первая и основная заключается в том, что для обеспечения такого рода прозрачности, недостаточно обеспечения равенства значений сигналов, несущих информацию о цвете на передающей и приёмной стороне. Необходимо обеспечить идентичность условий съёмки сцены и условий воспроизведения изображения, что в принципе является невозможным. Различие же этих условий приводит к различию состояний адаптации наблюдателя и, таким образом, к неизбежному искажению передаваемой информации зрительной системой. Ещё одним мощным фактором, определяющим степень искажения перцептивной информации, являются ограничения устройств и алгоритмов обработки изображений. Так, разброс диапазонов яркостей, встречающихся в натуральных сценах, может составлять до 100 миллионов к одному. Зрительная система человека в фиксированном состоянии адаптации способна воспринять диапазон порядка 10000:1, а вот современные дисплеи в состоянии воспроизвести контрасты около 4000:1 (в зависимости от типа дисплея). Ограничения подчас накладываются не столько возможностями самого устройства, сколько принятыми форматами передачи. Так, большинство форматов представления изображения в цифровом телевидении представление цвета с 24-битной точностью и рассчитаны на оптимальное воспроизведение при яркости белого лишь  $100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Использование же в телевизионных системах таких форматов, как RGBE, IEEE RGB, OpenEXR, и т.д. пока не представляется возможным.

Алгоритмы обработки изображений, обеспечивающие более или менее корректное (с позиций восприятия) воспроизведение изображений с широким яркостным и цветовым диапазоном устройствами с узким получили название полутоновых операторов. Классификация этих алгоритмов приведена ниже.

Таблица 1. Полутоновые операторы

Алгоритм	Тип оператора	Краткая характеристика
Оператор сохранения яркости Miller	глобальный	Направлен на сохранение субъективной яркости изображения до и после уменьшения динамического диапазона. Рассчитан на применение в диапазоне яркостей изображения $100-1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Неинвертируем аналитически, поэтому необходимо использование табличных методов.
Оператор сохранения яркости Tumblin-Rushmeier	глобальный	Использует модель восприятия. Направлен на сохранение субъективной яркости. Не сохраняет видность мелких деталей и не учитывает адаптацию.
Оператор сохранения контраста Ward	глобальный	Использует пороговую модель восприятия, направлен на сохранение контраста изображения. В случае превышения диапазона допустимых значений – усечение.
Модель визуальной адаптации Ferwerda	глобальный	Использует модель восприятия. Учитывает изменения пороговой видимости, восприятия цвета, разрешающей способности зрения и чувствительности во времени. Учитывает влияние палочкового аппарата.
Логарифмический и экспоненциальный операторы	глобальные	Наиболее простые из глобальных операторов. Работают с приемлемым качеством лишь тогда, когда динамический диапазон изображения ненамного превышает динамический диапазон дисплея.
Логарифмический оператор Drago	глобальный	Оператор с переменным основанием логарифма, в зависимости от яркости каждого пикселя. Это позволяет управлять контрастом и детальностью изображения в областях с различной яркостью. Позволяет охватить более широкий динамический диапазон по сравнению с простыми логарифмическими операторами.
Гистограммный оператор Ward	глобальный	Сохраняет восприятие яркости, контраста, цветовых тонов с учётом засветки и разрешающей способности зрения. Обеспечивает высокую степень реализма изображения.
Оператор Schlick	глобальный	Относительно простой оператор, обеспечивающий приемлемое качество для ряда приложений
Пространственно-неоднородный оператор Chiu	локальный	Сохраняет локальный контраст. Применим не всегда. Требует значительных вычислительных затрат.
Retinex	локальный	Моделирует процессы зрительного восприятия. Существует в нескольких разновидностях. Позволяет достичь высокой степени сжатия динамического диапазона при сохранении постоянства цвета, яркости и др. параметрах восприятия изображения.
iCAM	локальный	Моделирует различные эффекты цветовосприятия. Наилучшим образом применима к изображениям со средним динамическим диапазоном.
Pattanaik MOM	локальный	Является одной из наиболее полных из существующих на сегодняшний день моделей визуального восприятия. Полутоновой оператор можно получить, путём инвертирования модели с учётом параметров дисплея. Является достаточно сложной, однако гибкой в плане оптимизации качества.
Пространственно-неоднородный оператор	локальный	Использует простую модель визуального восприятия, для сохранения различимости мелких деталей изображения и абсолютной ярко-

Ashickmin		сти.
Оператор фотографического тонового воспроизведения Reinhard	локальный	Метод, близкий к используемым в фототехнике. Гибкий с точки зрения контроля параметров, Быстрый и эффективный с вычислительных позиций.

В общем случае, полутоновые операторы можно разделить на четыре больших класса: глобальные, локальные, частотные и градиентные. При использовании локальных операторов обработка каждого пикселя изображения осуществляется на основе информации о ближайшем окружении рассматриваемого пикселя. При использовании глобальных, в качестве ближайшего окружения рассматривается изображение в целом. Частотные операторы уменьшают динамический диапазон изображения за счёт преобразований в области пространственных частот, градиентные – за счёт изменения производной функции параметров изображения. Наибольший интерес для видеоприложений представляют первые два класса: глобальные операторы – за счёт низкого потребления вычислительных ресурсов, что позволяет осуществить обработку в реальном масштабе времени (правда, вследствие некоторой ограниченности обрабатываемого яркостного и цветового охватов могут присутствовать искажения контрастов и видимости некоторых деталей) и локальные, которые позволяют осуществить эффективное сжатие диапазонов при максимальном учёте психофизических и психологических свойств зрения, являющиеся, однако, более сложными в вычислительном плане по сравнению с глобальными операторами. Перечень операторов приведён в таблице 1.

Форматы представления изображений со сверхшироким динамическим диапазоном (High dynamic range – HDR) приведены в таблице 2. Там же приведены нескольких форматов CIE 61966 для удобства сравнения. Ввиду большого объёма данных, для телевизионных систем целесообразно использовать такие форматы лишь на промежуточных стадиях обработки и постобработки, когда предполагается дальнейшее редактирование изображения. Для передачи же в составе цифрового потока они пока малопригодны, а применение к HDR-изображениям классических методов сжатия с потерей качества может внести заметные искажения. Для решения этой проблемы были разработаны расширения к алгоритмам MPEG и JPEG.

Таблица 2. Форматы представления HDR-данных

Формат	Цветовое пространство	Точность битового представления, бит/пиксель	Динамический диапазон ( $\log_{10}$ )	Относительный шаг квантования
sRGB	Значения RGB в диапазоне [0,1]	24	1.6	переменный
RGBE	Положительные значения RGB	32	76	1.0%
XYZE	(CIE) XYZ	32	76	1.0%
IEEE RGB	RGB	96	79	0.000003%
LogLuv24	$\log Y + (u', v')$	24	4.8	1.1%
LogLuv32	$\log Y + (u', v')$	32	38	0.3%
Half RGB	RGB	48	10.7	0.1%
scRGB48	RGB	48	3.5	переменный
scRGB-nl	RGB	36	3.2	переменный
scYCC-nl	$Y C_R C_B$	36	3.2	переменный

Метод представления HDR-данных, совместимый с восьмибитовым форматом JPEG был предложен Ward и Simmons. Изображение после обработки полутоновым оператором кодируется в формате JPEG/JFIF, при этом информация, необходимая для восстановления полного диапазона изображения хранится в дополнительном маркере, длиной 64 кбайт. Маркер содержит получаемое путём дискретизации "вниз" изображение, полученного, как логарифм частного от деления параметров изображения на выходе полутонового оператора на параметры исходного изображения, и подвергнутого сжатию. Контроль качества восстанавливаемого изображения осуществляется на основе информации, содержащейся в маркере. Так, снижение различимости мелких деталей при обработке полутоновым оператором может быть скомпенсировано путём подчёркивания границ или путём искусственного синтеза высоких частот в "относительном" изображении в маркере, в зависимости от типа приложения и от пользовательских предпочтений.

Проблема совместимости форматов решается достаточно просто: HDR - приложения могут использовать информацию, хранящуюся в маркере для восстановления полного диапазона изображения, в то время, как традиционные приложения этот маркер могут просто игнорировать. Большинство файлов изображений на выходе современных цифровых фотокамер занимают объём порядка 1 Мбайт. Т.о. использование маркера увеличивает объём передаваемого потока данных лишь на 5%. Для сравнения, объём данных при представлении наиболее компактными HDR-форматами – в 16 раз больше.

Mantuik и др. предложили метод представления HDR-изображений на основе библиотеки с открытым кодом XDIV и стандарта MPEG-4. В общем случае, процесс кодирования каждого кадра происходит следующим образом:

1. На вход кодера вместо RGB-данных с 8 битами на канал подаются данные в формате XYZ с 32 битами на канал.
2. Данные из координат XYZ преобразуют в координаты CIE ( $u, v$ ) с точностью 8 бит на канал и в яркостную координату  $L_p$  с точностью 11 бит.
3. Данные в формате 11/8/8 подвергаются модифицированному дискретному косинусному преобразованию Фурье (DCT) с выделением из яркостного канала высококонтрастных границ для отдельного кодирования.
4. Блоки DCT подвергают квантованию с использованием модифицированной таблицы и кодированию с переменной длиной кодовой последовательности.
5. Блоки выделенных границ объединяют с блоками DCT в общем потоке HDR-MPEG.

Процесс декодирования обратен процессу кодирования с объединением с блоками, содержащими границы. Полученные значения  $L_p, u, v$  могут быть преобразованы в формат CIE XYZ с плавающей запятой или направлены непосредственно на вход соответствующих таблиц преобразования для воспроизведения в реальном масштабе времени. Одним из основных достоинств описанного алгоритма является возможность представления всего видимого диапазона яркостей (12 порядков по амплитуде) в 11-битных кодовых словах при шаге квантования, лежащем ниже порога восприятия. Анализ кривой "контраст-интенсивность" позволяет рассчитать переменную величину шага квантования таким образом, чтобы оптимизировать количество уровней квантования в области низких яркостей, где глаз менее чувствителен.

### ВЫВОДЫ

*В настоящее время проблема передачи изображений со сверхшироким динамическим диапазоном приобретает всё большую актуальность. На сегодняшний день уже существу-*

*ют алгоритмы, позволяющие реализовать передачу HDR-изображений при сохранении совместимости с традиционными системами. Прорывы в технологиях производства дисплеев, камер и т.д. позволяют предположить широкое распространение HDRI-систем в недалёком будущем*

Литература

- 1 E.Reinhard, G.Ward, P.Debevec, S.Pattanaik - High dynamic range imaging: acquisition, display and image-based lighting – Morgan Kaufmann – 2007 – 502 pp.
- 2 K. Devlin – A review of tone reproduction techniques – University of Bristol – 2002
- 3 Min H. Kim and Lindsay W. MacDonald – Rendering high dynamic range images – EVA 2006 London Conference 2006
- 4 P. Ledda, A. Chalmers, T. Troscianko, H. Seetzen. – Evaluation of Tone Mapping Operators using a High Dynamic Range Display –ACM SIGGRAPH 2005, LA., ACM Press, 2005
- 5 R. Mantiuk, A.Efremov, K. Myszkowski, H. Seidel – Backward compatible high dynamic range MPEG video compression – ACM Transactions on Graphics (TOG) archive – Volume 25 , Issue 3, 2006
- 6 G. Ward, M. Simmons – JPEG-HDR: a backwards-compatible, high dynamic range extension to JPEG – International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques archive ACM SIGGRAPH 2005
- 7 P. Debevec, E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik – High dynamic range imaging – ACM SIGGRAPH 2004
- 8 Sung Ho, E. Montag – Evaluating tone mapping algorithms for rendering non-pictorial (scientific) high-dynamic-range images – ACM Transactions on Applied Perception 2006.