



Лекция 2. High Dynamic Range Images. Технология и алгоритмы.

Кристина Зипа

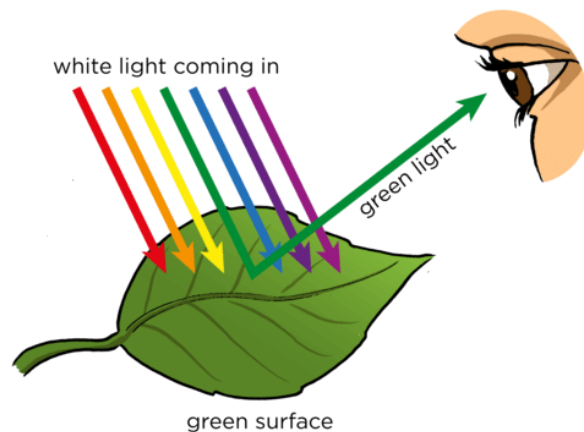
Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа

ВМК МГУ

Введение. Понятия из лекции 1

- **Свет и цвет**

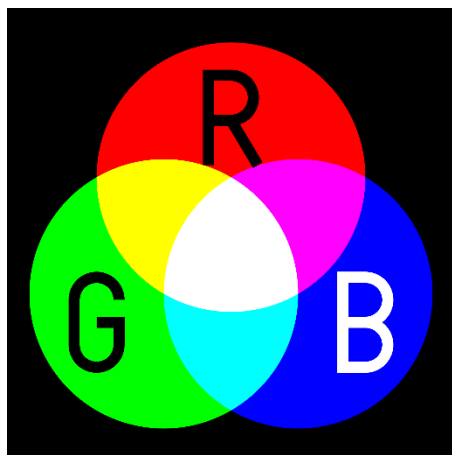
- Свет – электромагнитное излучение видимого диапазона длин волн (спектр)
- Цвет – психологическое свойство зрения, результат взаимодействия света, сцены и зрительной системы



- Трихроматическая теория
- Цифровое представление изображения
- Устройство глаза и устройство камеры

Введение. Понятия из лекции 1

- Свет и цвет
- **Трихроматическая теория**
 - любой видимый цвет можно получить комбинацией трех “базовых” цветов (A, B, C). $C = aA + bB + cC$.
 - различные цветовые пространства, самое часто используемое – RGB



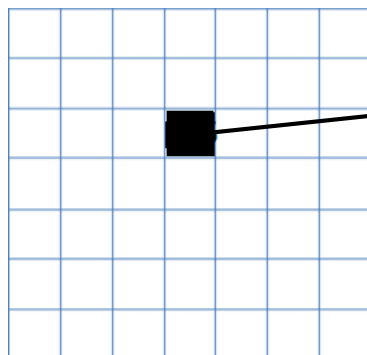
#FF0000	RGB (255, 0, 0)
#FF7F00	RGB (255, 127, 0)
#FFFF00	RGB (255, 255, 0)
#00FF00	RGB (0, 255, 0)
#0000FF	RGB (0, 0, 255)
#4B0082	RGB (75, 0, 130)
#8F00FF	RGB (143, 0, 255)

SuddenWhims.com

- Цифровое представление изображения
- Устройство глаза и устройство камеры

Введение. Понятия из лекции 1

- Свет и цвет
- Трихроматическая теория
- **Цифровое представление изображения**
 - матрица размера $N \times M \times C$, элементами которой являются значения одного из C каналов в каком-либо цветовом пространстве
 - размер одного значения обычно 1 байт, т.е. $\in [0, 255]$
 - иногда используется большая точность (10-16 бит) - **HDR**

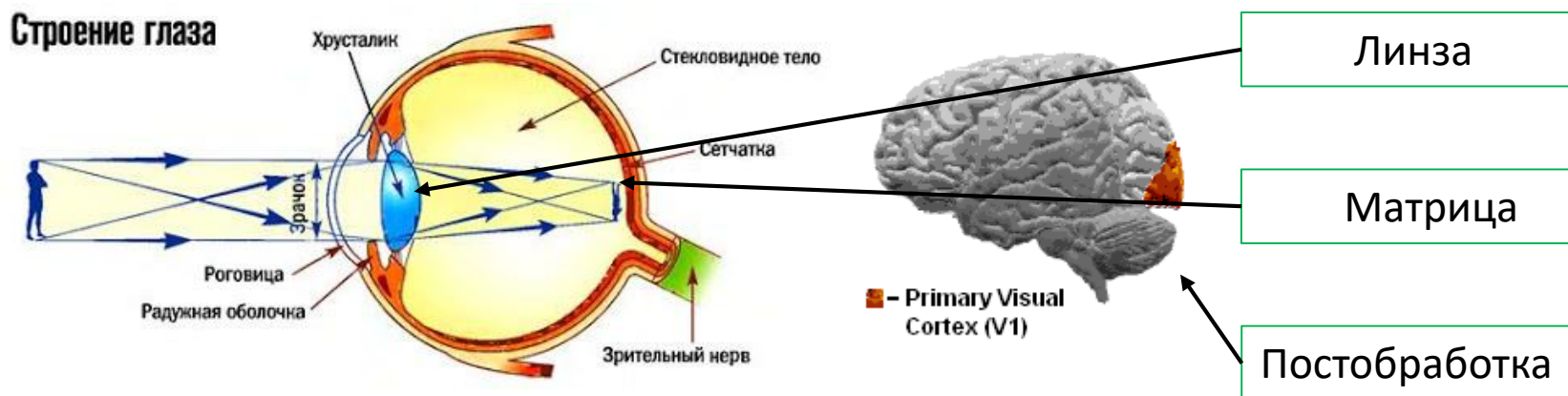


Пиксель – элемент матрицы. Например, $C=3$, пространство RGB – вектор цвета $(0,0,0)$

- Устройство глаза и устройство камеры

Введение. Понятия из лекции 1

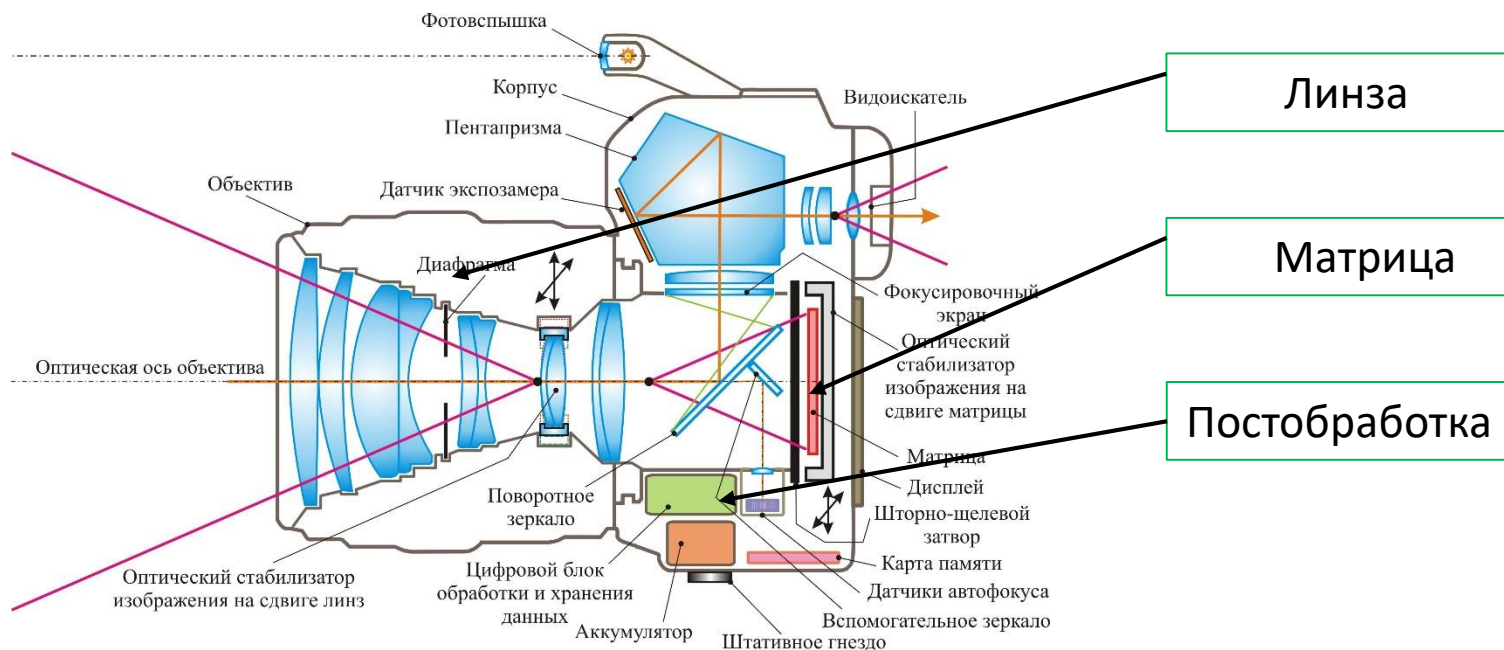
- Свет и цвет
- Трихроматическая теория
- Цифровое представление изображения
- **Устройство глаза и устройство камеры**
 - Колбочки и палочки, нелинейность восприятия



- Светочувствительные элементы на матрице, гамма-коррекция

Введение. Понятия из лекции 1

- Свет и цвет
- Трихроматическая теория
- Цифровое представление изображения
- **Устройство глаза и устройство камеры**
 - Колбочки и палочки, нелинейность восприятия
 - Светочувствительные элементы на матрице, гамма-коррекция



Понятие HDRI

HDRI – High Dynamic Range Images – Изображения Широкого Динамического Диапазона

> 8 бит различных передаваемых значений **яркости**

Обычные 8бит изображения = Изображения Узкого
(Динамического) Диапазона

- LDRI – Low Dynamic Range Images
- SDRI – Standard Dynamic Range Images



Динамический и статический диапазон

- Динамический диапазон - отношение между максимальным и минимальным значением возможных значений некоторой измеряемой величины
- Минимум часто определяется минимальной различимым значением, шумом, помехами и т.п.
- Измеряется как
 - Отношение
 - Двоичный логарифм отношения (стопы)
 - Яркость, часто в фотографии
 - Десятичный логарифм отношения (децибеллы)
 - Звук
- Человеческий глаз в состоянии адаптироваться к освещению в пределах 10-ти порядков изменения яркости! = **динамический диапазон**
- При этом одновременно (сцена) до 5-ти порядков изменения яркости = **статический диапазон**
- Мониторы – макс. 3 порядка = **статический диапазон**
- Технология dynamic contrast = **динамический диапазон**

Почему не хватает 8 бит?

Есть непреодолимые ограничения на формат вывода – дисплей, его дискретизация:

- Пространственная (разрешение, dpi, ppm)
- Временная (Hz)
- Хроматическая (число значений по цвету)
- Яркостная (число ступеней по яркости)

DPI и Hz

- Разрешение зоркого глаза – 1 угловая минута (1 / 60 градуса)
- 60 Hz – достаточно для большинства сцен, но чем выше яркость, тем больше нужно FPS

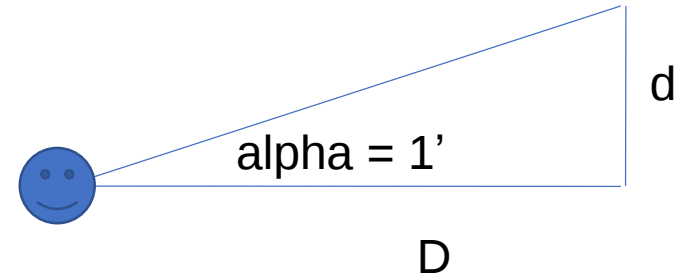


Таблица dpi для разных расстояний

Расстояние (м)	dpi	Модель	Разрешение	Пикселей на дюйм
0.2	436.6	MacBook Pro 15 Retina	2880×1800	220
0.3	291.1	Монитор LG 22MP65D-P	1920×1080	105
0.5	174.6	Монитор SAMSUNG S22D300NY	1920×1080	105
0.6	145.5	iPod touch (4-е поколение) и iPhone 4/4S	960×640	330
0.8	109.1	iPhone X	1125×2436	458
1	87.3	Samsung Galaxy 10	1440×3040	550
2	43.7			

Дискретизация изображения: цвет и яркость

- Цвет характеризуется:
 - Тон (150 разных)
 - Насыщенностью (25 разных)
 - Светлотой
- В модели RGB нормируем значение цвета $R+G+B=1$. Получается $255 \times 255 = 65025$ оттенков
- Человеческий глаз – от 5 порядков (без адаптации) до 10-ти порядков (с адаптацией)
- Мониторы – до 10 бит (3 порядка)

Фон	Яркость ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)
Ночное небо (без луны)	0.00001
Ночное небо (луна)	0.001
Ясный день	1000
Ясный день (солнце)	10000
Макс. стат. яркость обычного монитора (LCD)	1000

Тракт получения и визуализации изображений



Пример HDR-фотографий

LDR



HDR



Заход солнца над рекой Арно во Флоренции. Вид из Понте Санта Тринита.

Источник - <https://www.easyhdr.com/ru/>

Пример HDR-фотографий

LDR



HDR



Oriental Pearl Tower в Шанхае. Источник - <https://www.easyhdr.com/ru/>

Визуализация (рендеринг)

Отобразить геометрию объекта

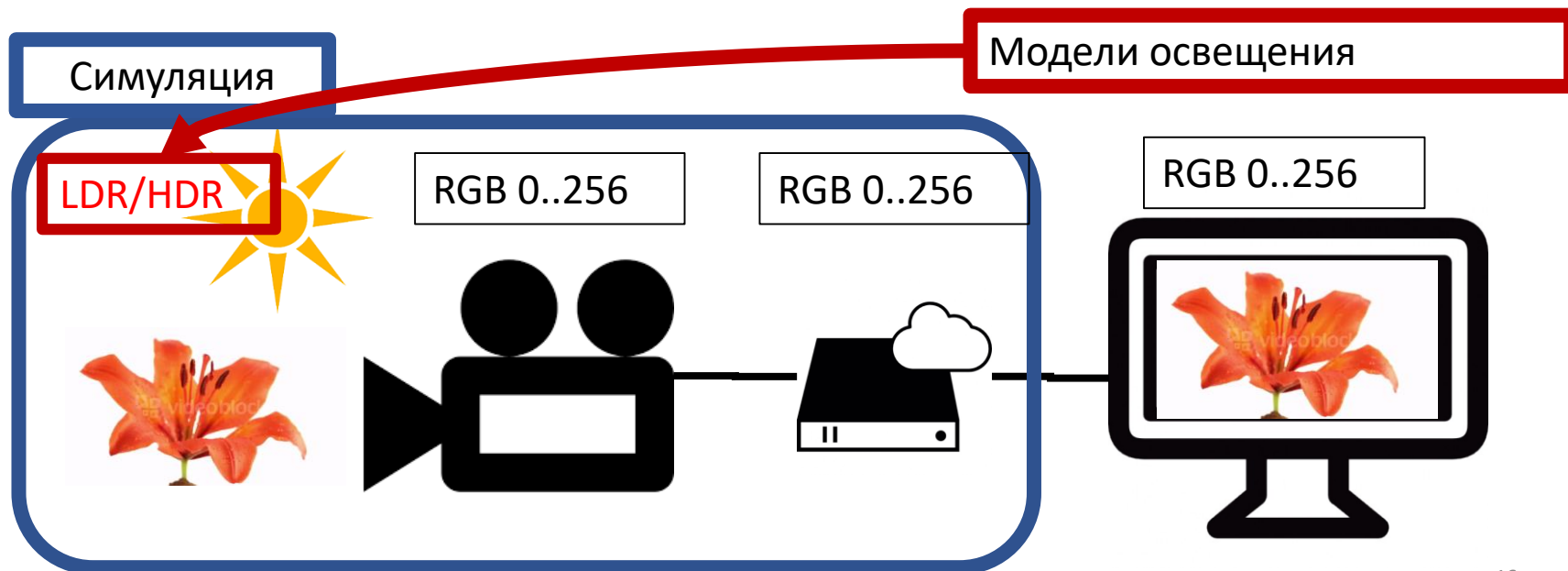
Какой полигон объекта оказался в этом пикселе?

Отобразить цвет объекта

Какого цвета будет этот пиксель?

Не фотореалистичный рендеринг

- OpenGL. Используем для материалов и источников триплеты цветов.
- Используем псевдо-BRDF и псевдо-яркости, рендеринг каждого канала.



Визуализация (рендеринг)

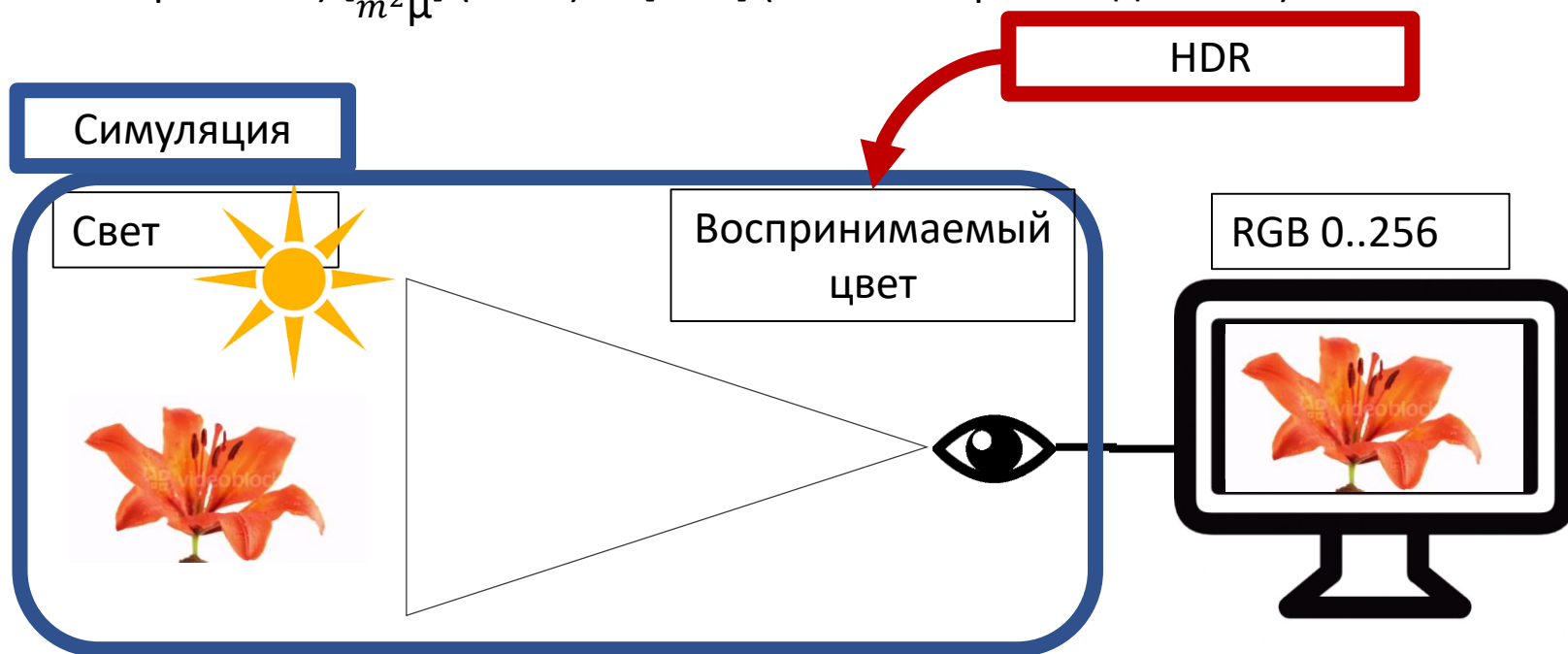
Отобразить геометрию объекта

Какой полигон объекта оказался в этом пикселе?

Отобразить цвет объекта

Какого цвета будет этот пиксель?

Фотореалистичный рендеринг (уравнение рендеринга с физической яркостью) $[\frac{Cd}{m^2\mu}]$ (0..Inf) -> [RGB] (0..256+ - яркость дисплея)



Визуализация (рендеринг)

Отобразить геометрию объекта

Какой полигон объекта оказался в этом пикселе?

Отобразить цвет объекта

Какого цвета будет этот пиксель?

Фотореалистичный рендеринг (уравнение рендеринга с физической яркостью) $\left[\frac{cd}{m^2\mu}\right] (0..Inf) \rightarrow [RGB] (0..256+ - \text{яркость дисплея})$

Цвета RGB 0..256

Радиометрические величины

$$L(p, \omega_o) = L_e(p, \omega_o) + \int_{\Omega} f(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) |\cos \theta_i| d\omega_i$$

- L - суммарная яркость, приходящая из точки p в направлении ω_o
- L_e - яркость, исходящая из точки p в направлении ω_o (p источник света)
- L_i - яркость, приходящая в точку p из направления ω_i
- $f(p, \omega_o, \omega_i)$ - BRDF
- ω_o, ω_i - направления, заданные телесными углами



Визуализация (рендеринг)

- Изображение получают камеры=> строим модель камеры:
 - Оптическая система (апертура, линза, выдержка, ...)
 - Матрица (Байеровский шаблон)
 - Обработка внутри камеры (ПО, например, гамма-коррекция)
- 👍 Легко реализовать простую камеру (полноценную – сложнее)
- 👎 У камер есть ограничения

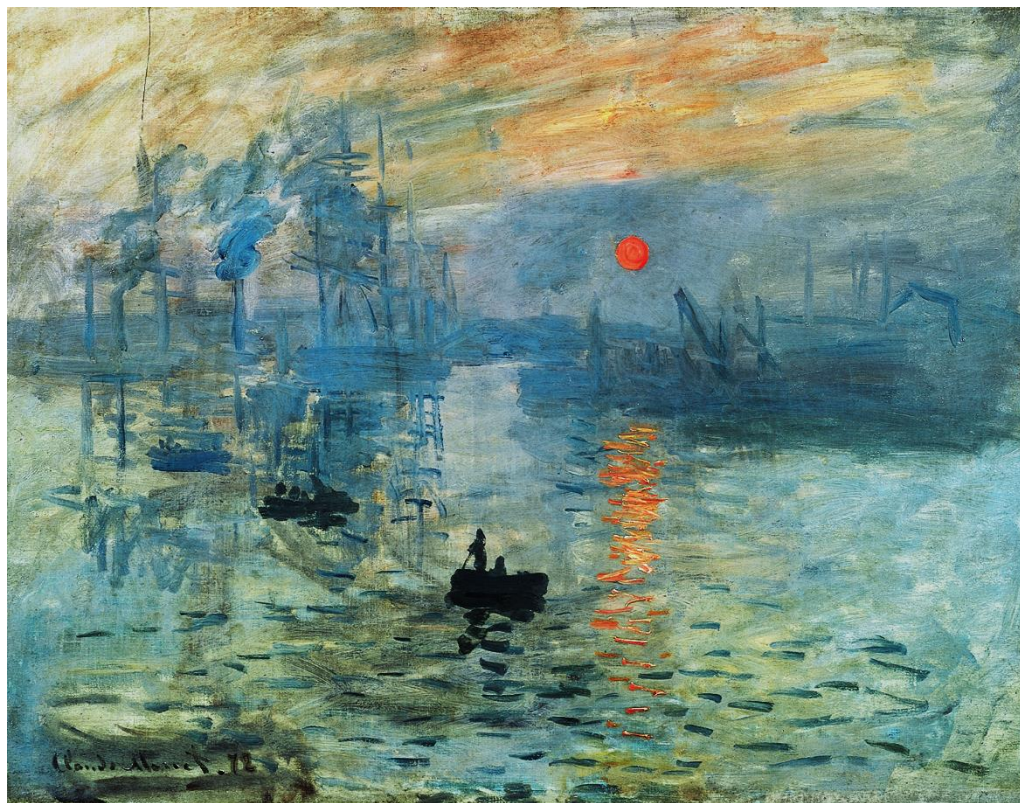


Похоже на фотографию, не похоже на то, что мы видим!

Как преобразовать наши расчеты в изображение?

- Стоим физически точную модель, используем спектры источников, строим HDR, урезаем до 10-12 бит и подаём на HDR-монитор (в случае LDR урезаем в 8 бит)
- Как «урезать»? Построим модель глаза и мозга 😊
 - Задача не решена полностью в текущий момент времени!
 - используем алгоритмы **тональной компрессии** (частично решают задачу модели глаза и мозга)
 - художники

Художественные средства повышения динамического диапазона



Моне «Impressions at Sunrise»

Художественные средства повышения динамического диапазона



Моне «Impressions at Sunrise»

Художественные средства повышения динамического диапазона



А. Куинджи. «Лунная ночь на Днепре»

Пример HDR-рендеринга



Пример HDR-рендеринга

С использованием HDR-панорамы и без неё



Промежуточные итоги

- HDR – средство повышения реализма фотографий и видео
- HDR используется в фотографии, в визуализации (как выход алгоритма и в качестве панорам освещения)
- Ограничения LDR-дисплея преодолимы (доказано опытом художников)

Вопросы:

- Как получить такое изображение?
- Как его хранить?
- Как визуализировать?

Отвечают:

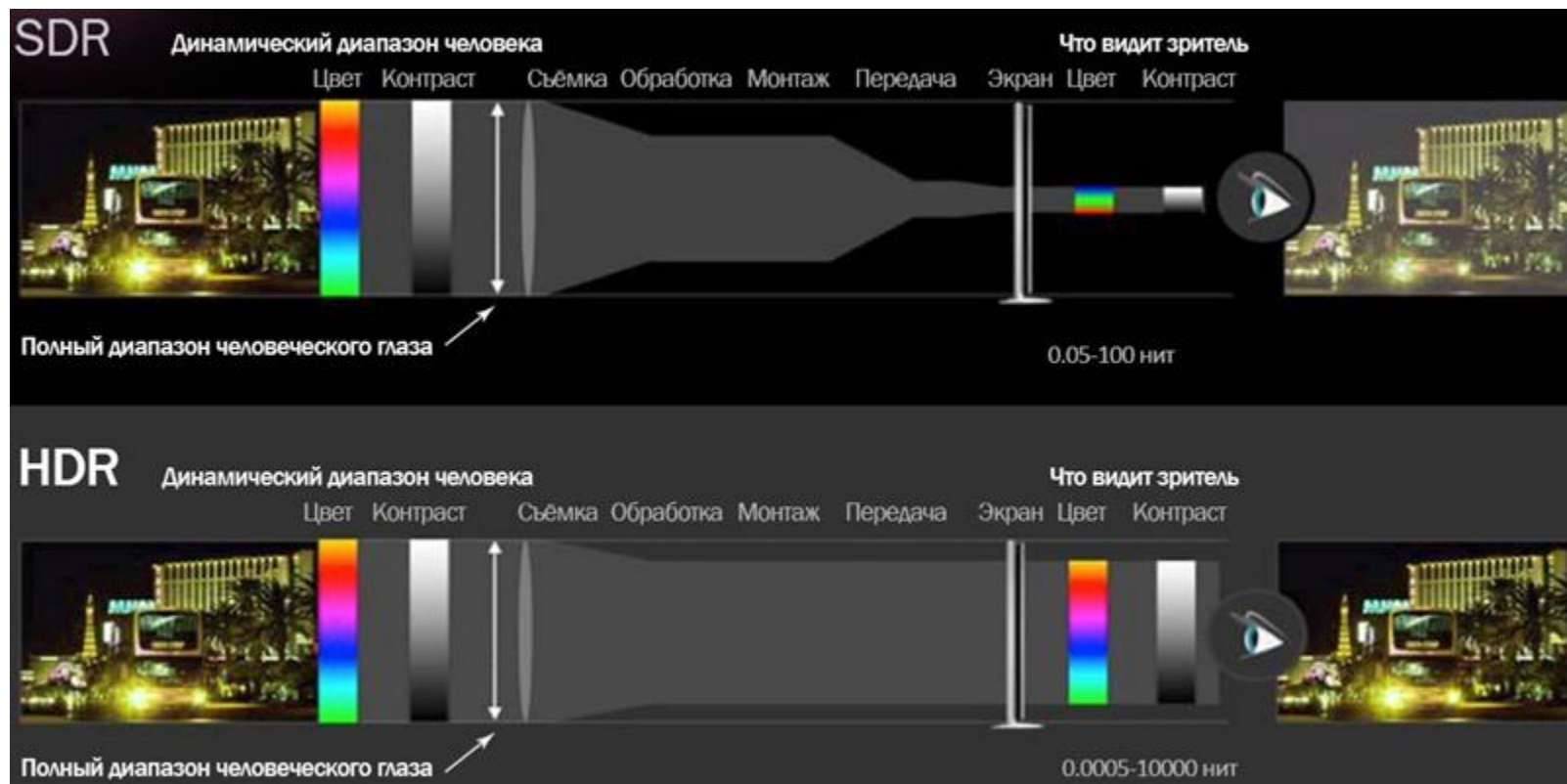
- Технология
- Алгоритмы

Технология HDRI

Технология HDR

В совокупности реализует pipeline с HDR-изображениями внутри

- Получение HDR с помощью камеры напрямую
- Хранение HDR
- Визуализация на HDR-мониторе или через HDR-проектор



Технология получения HDR

- Аппаратура камер, прямое получение HDR-данных
- Требуется специальная аппаратура (дорогая)
- Очень перспективный путь



Canon C300 Mk II/C500 – 14 bit



Panasonic VLT – 14 bit



Видеокамера Canon EOS C300 Mark II

RUB 699,900

Pixel24.ru

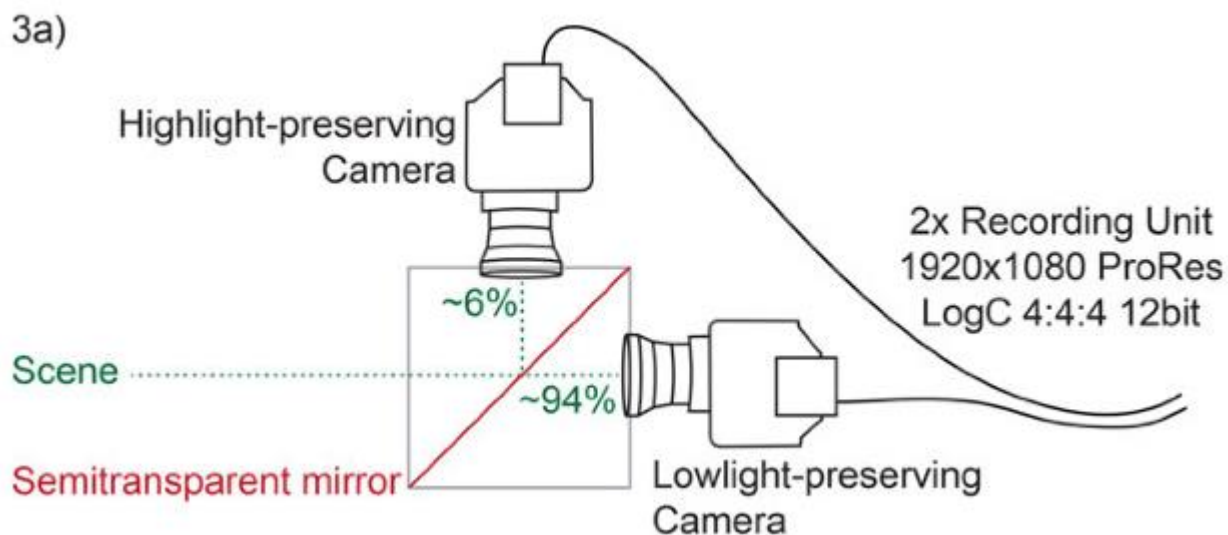
\$9,995 - ~640000p

Технология получения HDR

HIGH DYNAMIC RANGE FOR FILMPRODUCTIONS – STUTTGART HDR

(<https://www.hdm-stuttgart.de/vmlab/projects/hdr>)

- 18 стопов
- Датасет для алгоритмов тональной компрессии
- 2 камеры с 35mm сенсорами

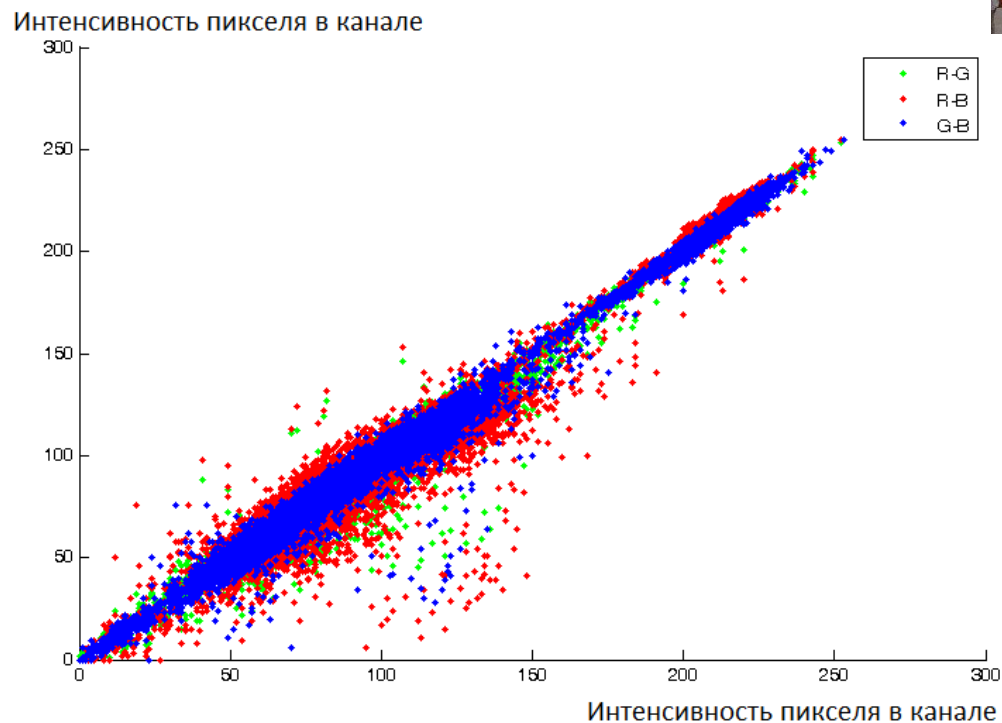


Форматы хранения HDR

- RAW содержат снимок значений сенсора камеры. Такое изображение можно обработать не дешёвым алгоритмом камеры, а более сложным на ПК, но занимать в памяти он будет намного больше. RAW имеет расширенный диапазон, но не равный диапазону зрения.
- HDR (PIC)
- TIFF
- OpenEXR
- ...

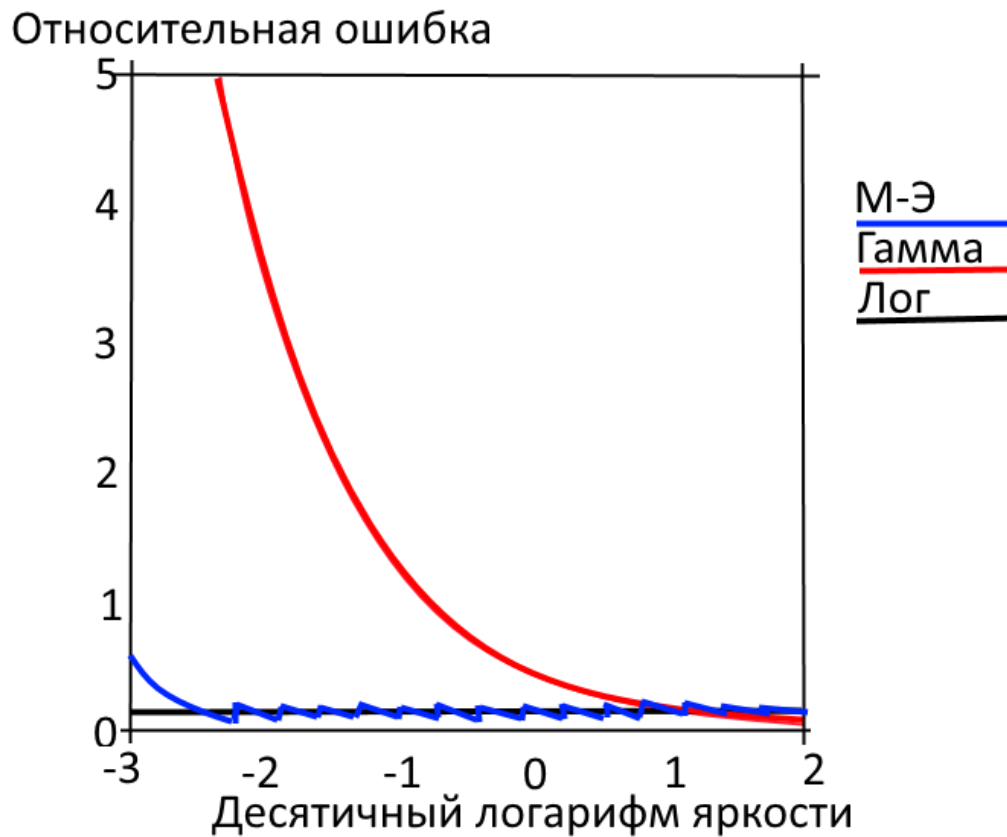
Зависимость яркости и цвета

- Цвет отдельно
- Разброс меньше, чем по яркости
- Источники редко бывают цветными и насыщенными



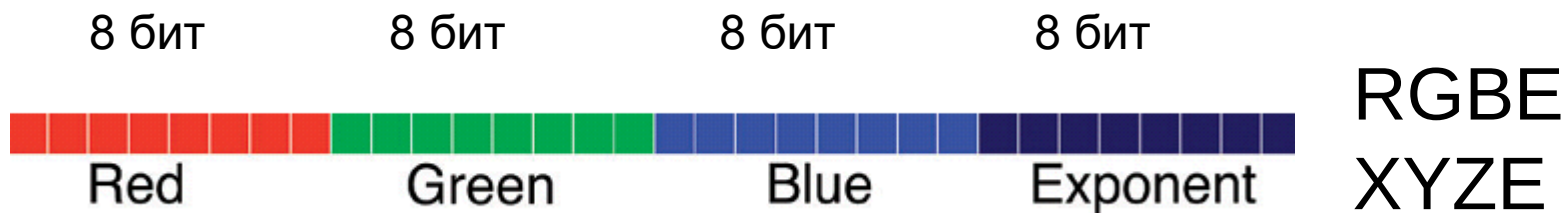
Кодирование яркости

- Гамма-кодирование (степенное) $I' = I^{\gamma}$
- Логарифмическое кодирование $I' = k^I$
- Мантисса-экспонента (плавающая точка)



Формат HDR

- Появился как часть программного пакета Radiance (1989)
- Самый простой и часто используемый формат
 - Де-факто: Аналог BMP для HDR
- ~25% сжатие (1:1.3), поддерживается RLE, размер как у 24бит BMP



$$E = \lceil \log_2 (\max (R_W, G_W, B_W)) + 128 \rceil$$

$$R_M = \left\lfloor \frac{256 R_W}{2^{E-128}} \right\rfloor$$

$$G_M = \left\lfloor \frac{256 G_W}{2^{E-128}} \right\rfloor$$

$$B_M = \left\lfloor \frac{256 B_W}{2^{E-128}} \right\rfloor$$

$$R_W = \frac{R_M + 0.5}{256} 2^{E-128}$$

$$G_W = \frac{G_M + 0.5}{256} 2^{E-128}$$

$$B_W = \frac{B_M + 0.5}{256} 2^{E-128}$$

Формат TIFF

- Tagged Image Format – один из очень старых форматов
- 32-бит на компоненту IEEE-floating point RGB
 - 96 бит на пиксель
-  Сжатие без потерь
 - Идеально для сохранения каких-либо floating-point буферов и т.п.
-  В три раза больше размер файлов, чем формат HDR.
- LogLuv кодирование. – преобразовать в тройку: яркость + тон и квантовать яркость
- XYZ -> Luv

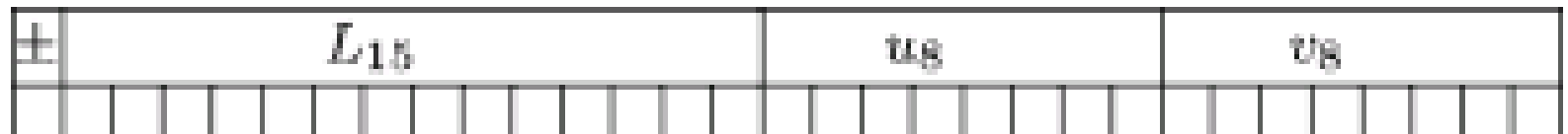
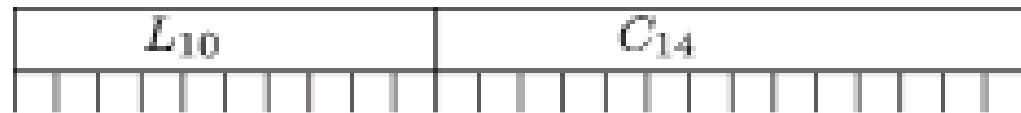
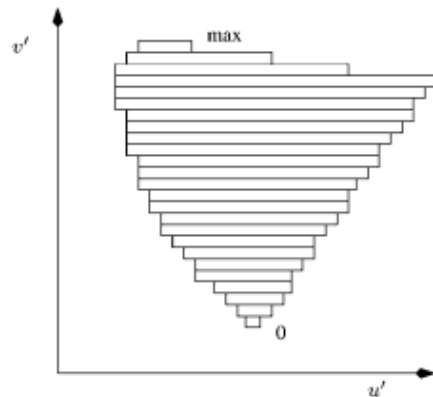
Формат TIFF: LogLuv кодирование

$$L_{15} = \lfloor 256 (\log_2 Y_W + 64) \rfloor$$

$$Y_W = 2^{\frac{L_{15} + 0.5}{256} - 64}$$

$$L_{10} = \lfloor 64 (\log_2 Y_W + 12) \rfloor$$

$$Y_W = 2^{\frac{L_{10} + 0.5}{64} - 12}$$

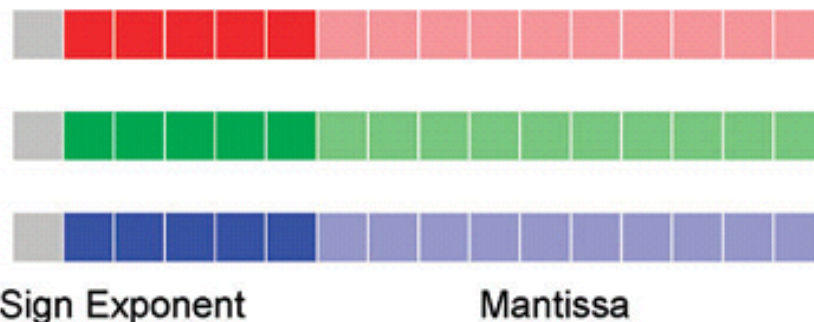


Формат OpenEXR

- 2002 Industrial Light and Magic
 - C++ библиотека (openexr.com)
- Разные форматы поддерживаются
 - 16-бит на канал
 - 24-бит на канал
 - 32-бит на канал
- Гибкий формат:
 - Сжатие (ZIP, PIZ)
 - PIZ – формат сжатия на основе вейвлетов
 - Произвольные каналы данных
 - Прозрачность и т.п.
 - Атрибуты и т.п.

Пример кодирования 16-бит

$$h = \begin{cases} (-1)^S 2^{E-15} \left(1 + \frac{M}{1024}\right) & 1 \leq E \leq 30 \\ (-1)^S 2^{-14} \frac{M}{1024} & E = 30 \end{cases}$$

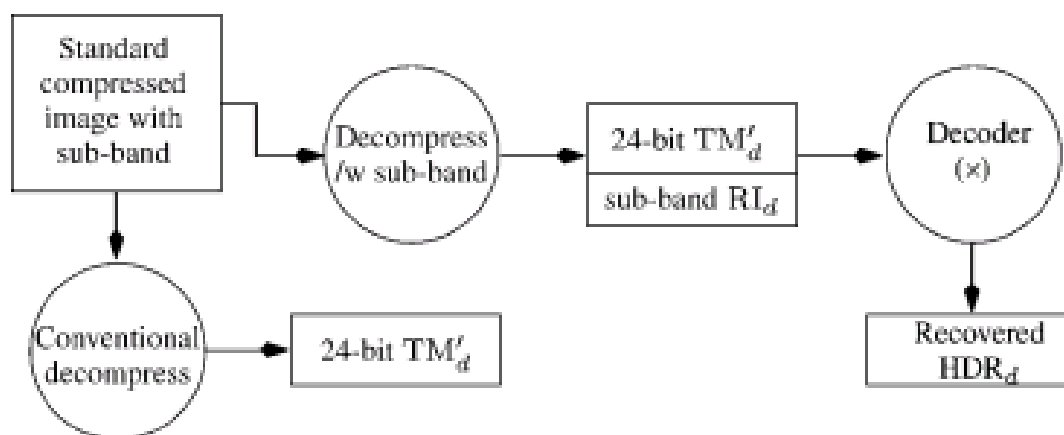


Представляемые значения: 0,000061-65,504
~9 порядков (включая числа меньше 0,000061)

Шаг квантования <0,1%

Очень маленькая ошибка! Сравните: у HDR 1%

Другие форматы. Сжатие HDR с потерями



Форматы хранения HDR-изображений

Format	Encoding(s)	Compression	Metadata	Support/Licensing
HDR	RGBE	Run-length	Calibration, color space,	Open source software (<i>Radiance</i>)
	XYZE	Run-length	+user-defined	Quick implementation
TIFF	IEEE RGB	None	Calibration, color space,	Public domain library (<i>libtiff</i>)
	LogLuv24	None	+registered, +user-defined	
	LogLuv32	Run-length		
EXR	Half RGB	Wavelet, ZIP	Calibration, color space, +windowing, +user-defined	Open source library (<i>OpenEXR</i>)

Технология визуализации HDR

2 подхода:

- Прямое регулирование яркости пикселя
- Использование двух или более модуляторов

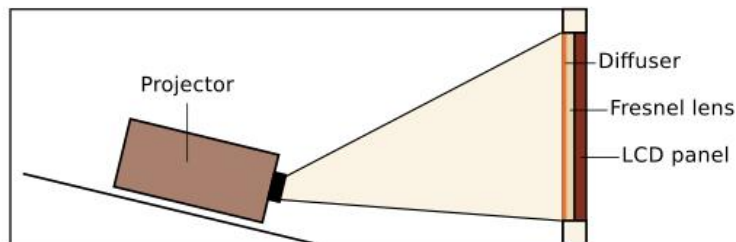
	Матрица	Поддержка HDR
LG G6	IPS 5,7"	HDR10,
	2880×1440 пикс.	Dolby Vision
	565 PPI	
LG V30/V30+	POLED 6"	HDR10
	2880×1440 пикс.	
	538 PPI	
Apple iPhone X	OLED 5,8"	HDR10,
	2436×1125 пикс.	Dolby Vision
	458 PPI	
Samsung Galaxy S8/S8+	AMOLED 5,8"/6,2"	HDR10,
	2960x1440 пикс.	Dolby Vision,
	568/531 PPI	Mobile HDR Premium
Samsung Galaxy Note 8	AMOLED 6,3"	HDR10,
	2960x1440 пикс.	Dolby Vision,
	522 PPI	Mobile HDR Premium

Регулирование яркости пикселя

- Требования:
 - Нужно точно варьировать яркость от 0 до 3 000 - 6 000 cd/m²
 - Цвет одного пикселя не должен перетекать на соседей
- Сканирующий лазерный дисплей (SLDT Scanning Laser Display Technology developed by JENOPTIK GmbH)
 - 👍 Хороший статический контраст 100 000:1 (полное отсутствие чёрного при выключенном лазера)
 - 👍 Мощные и яркие RGB источники – хороший цветовой охват
 - 👎 Пятно лазера подразмывается
 - 👎 Цена высока (источники дорогие)
- OLED (органические излучающие диоды Organic light emitting diodes)
 - 👍 Дешёвые
 - 👎 Проблема с мощностью (максимальной яркостью)

Модуляторы

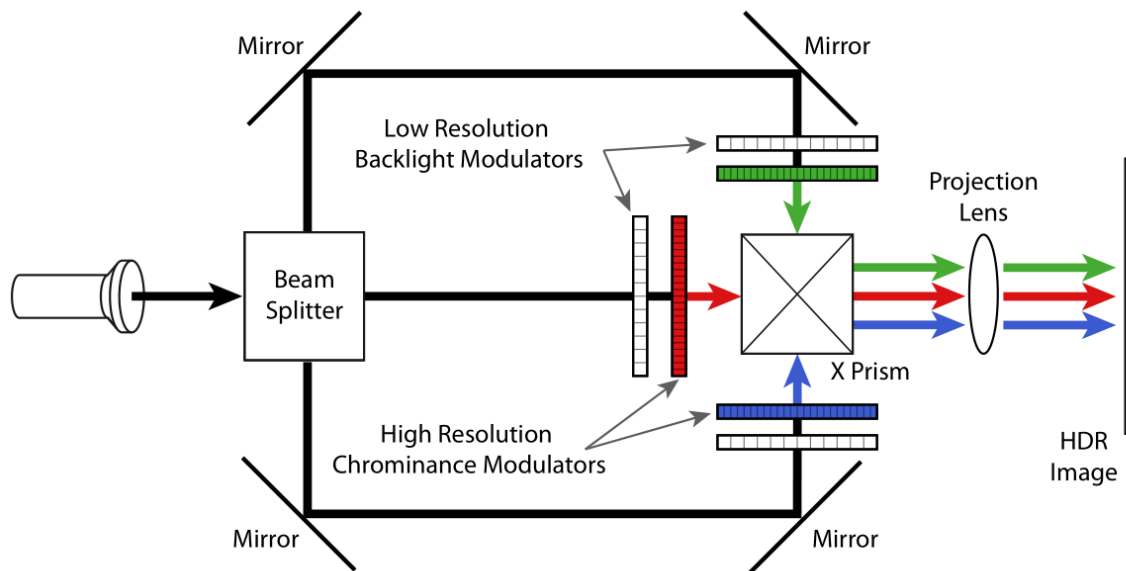
- Подсветка + пассивный экран или проектор + 2 экрана
- Для каждого изображения строится 2 текстурных карты, затем они умножаются



Простая схема устройства с проектором

Модуляторы

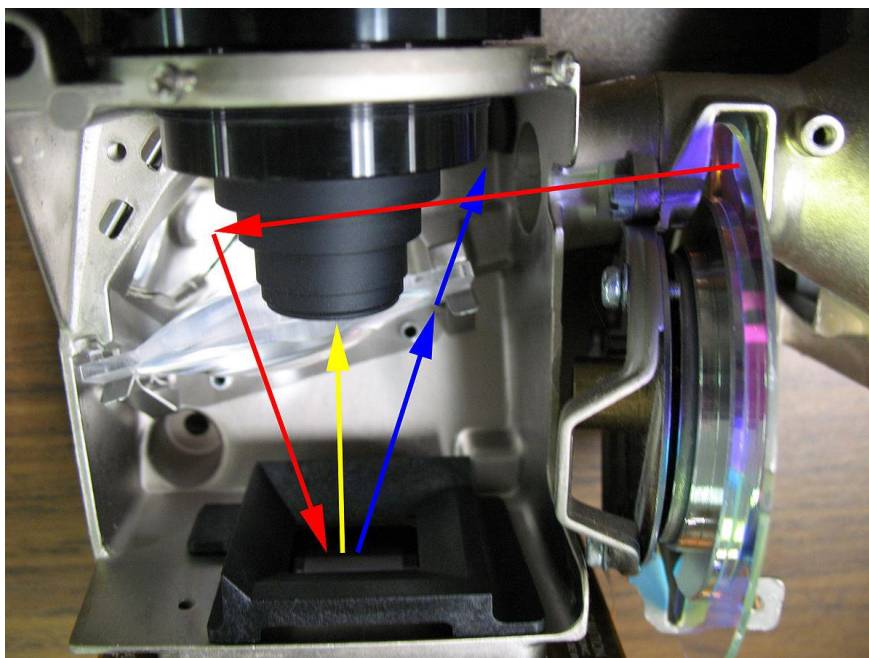
- Подсветка + пассивный экран или проектор + 2 экрана
- Для каждого изображения строится 2 текстурных карты, затем они умножаются



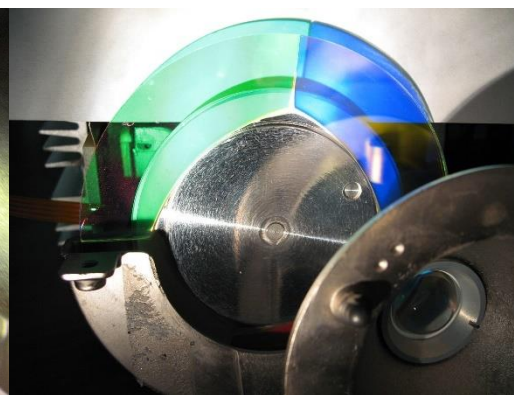
Более сложная схема с тремя экранами

Модуляторы

- Подсветка + пассивный экран или проектор + 2 экрана
- Для каждого изображения строится 2 текстурных карты, затем они умножаются



Ход луча в DLP-проекторе



Свет от лампы проходит через вращающееся колесо, отражается от зеркала и попадает на управляемое микрозеркало, оттуда либо на линзу, либо глушится.

Модуляторы

- Подсветка + пассивный экран или проектор + 2 экрана
- Для каждого изображения строится 2 текстурных карты, затем они умножаются
- Технологии модулирующих слоёв:
 - LCD
 - LCoS(liquid crystal on silicone - LCoS)
 - DLP (digital light processing)
- 👉 Ослабление (LCD, LCoS) или перенаправления (DLP), пропускают свет (1% for LCDs.)
- 👉 Засветка от соседних пикселей
- 👍 В целом приводит к неплохому результату

Промежуточные итоги

Вопросы:

- Как получить HDR изображение?
- Как его хранить?
- Как визуализировать?

Отвечает технология:

- Можно купить дорогую установку, чтобы снять HDR
- Можно использовать для хранения один из бесплатных форматов
- Можно вывести изображение на DLP-проектор или HDR-монитор (не более 10-12 бит, остальное теряем)

Алгоритмы HDRI

Алгоритмы HDR

- Получение HDR
 - Синтез HDR
 - Из набора LDR-фотографий
 - Съёмка видео-HDR, обработка «призраков»
- Визуализация HDR на LDR-мониторе (Тональная Компрессия)
 - Классические алгоритмы
 - Тональная компрессия видеопоследовательностей
- Визуализация набора LDR-фотографий на LDR-мониторе (Exposure Fusion)

Алгоритмы получения HDR

Синтез изображений

- Результат работы алгоритмов визуализации
- Основная задача – визуализация на мониторе

Комбинирование LDR с разными выдержками

- Получение HDR с помощью обычных бытовых фотокамер

Получение HDR путём синтеза (рендеринг)

Отобразить геометрию объекта

Какой полигон объекта оказался в этом пикселе?

Отобразить цвет объекта

Какого цвета будет этот пиксель?

Фотореалистичный рендеринг (уравнение рендеринга с физической яркостью) $[\frac{cd}{m^2\mu}]$ (0..Inf) -> [RGB] (0..256+ - яркость дисплея)

Цвета RGB 0..256

Радиометрические величины

$$L(p, \omega_o) = L_e(p, \omega_o) + \int_{\Omega} f(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) |\cos \theta_i| d\omega_i$$

- L - суммарная яркость, приходящая из точки p в направлении ω_o
- L_e - яркость, исходящая из точки p в направлении ω_o (p источник света)
- L_i - яркость, приходящая в точку p из направления ω_i
- $f(p, \omega_o, \omega_i)$ - BRDF
- ω_o, ω_i - направления, заданные телесными углами



Получение HDR путём синтеза (рендеринг)

Подробнее о рендеринге – на других лекциях:

- Геометрические модели
- Модели освещения
- Методы трассировки лучей
- ...

Вкратце:

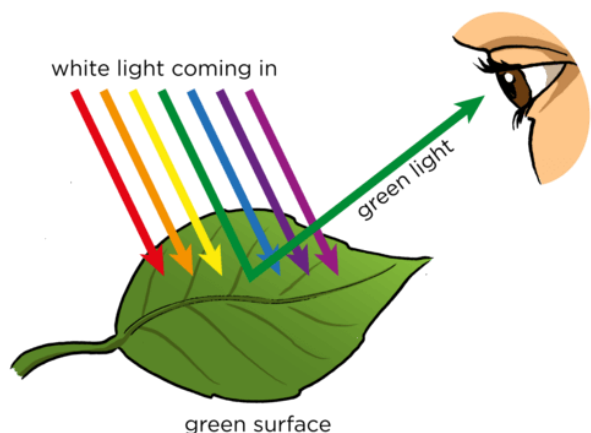
- Спектр источника взаимодействует с материалами
- Лучи **разной** энергии летят в камеру (глаз наблюдателя)
- Применяем кривые чувствительности глаза (или матрицы камеры), получаем RGB **разной** величины

Если без HDR:

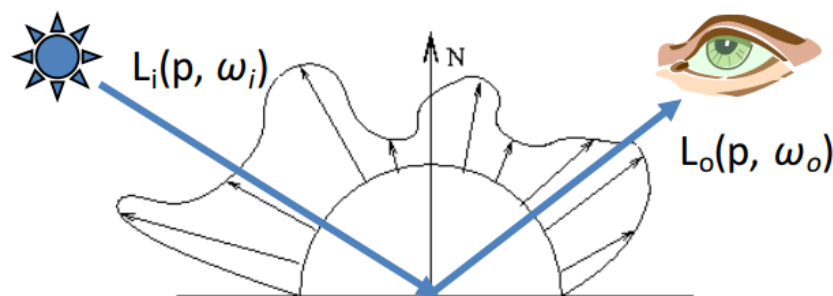
- Можно без радиометрии и фотометрии, в у.е. 0..1 (например, OpenGL)

Получение HDR путём синтеза (рендеринг)

Как реально ведёт себя свет



Сложная модель материала (ДФО)
Упрощаем до 3 лучей (RGB)



Годится для рендеринга HDR
панорамы, например.

Источник – (0,1,0)

Материал (отражательный) (0.5,
0.5, 0.5)

⇒ Цвет (0, 0.5, 0)

- HDR имеет смысл только как
моделирование адаптации
наблюдателя к сцене

Простая модель материала (коэффициенты
диффузного, зеркального отражения света)

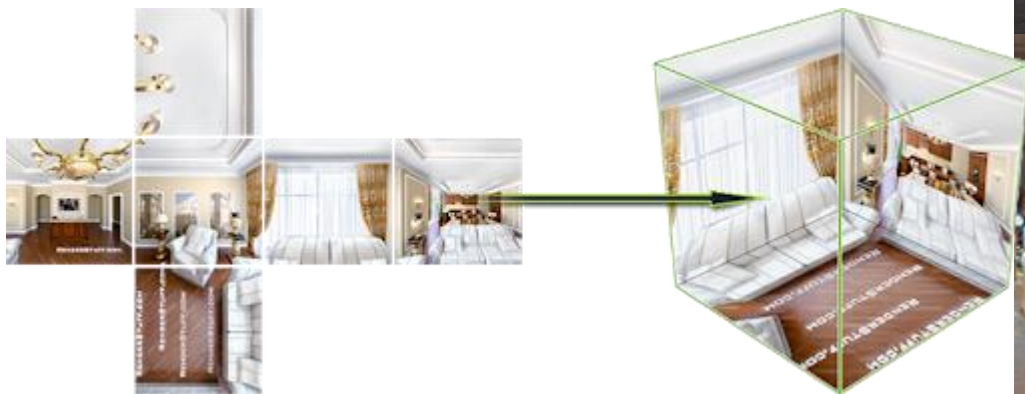


Получение HDR путём синтеза (рендеринг)

HDRI Панорамы – карты
окружения для последующего
освещения

Виды:

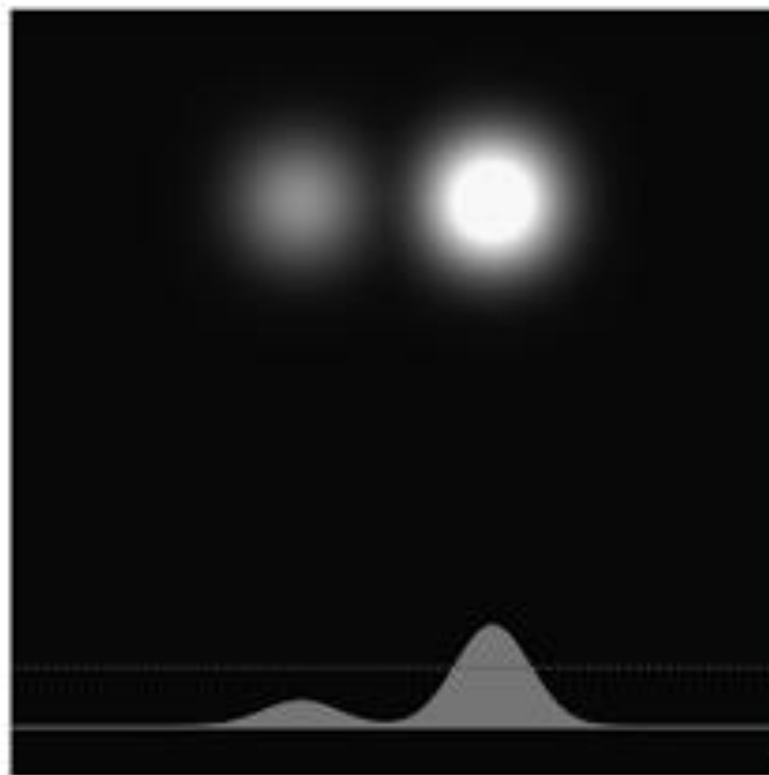
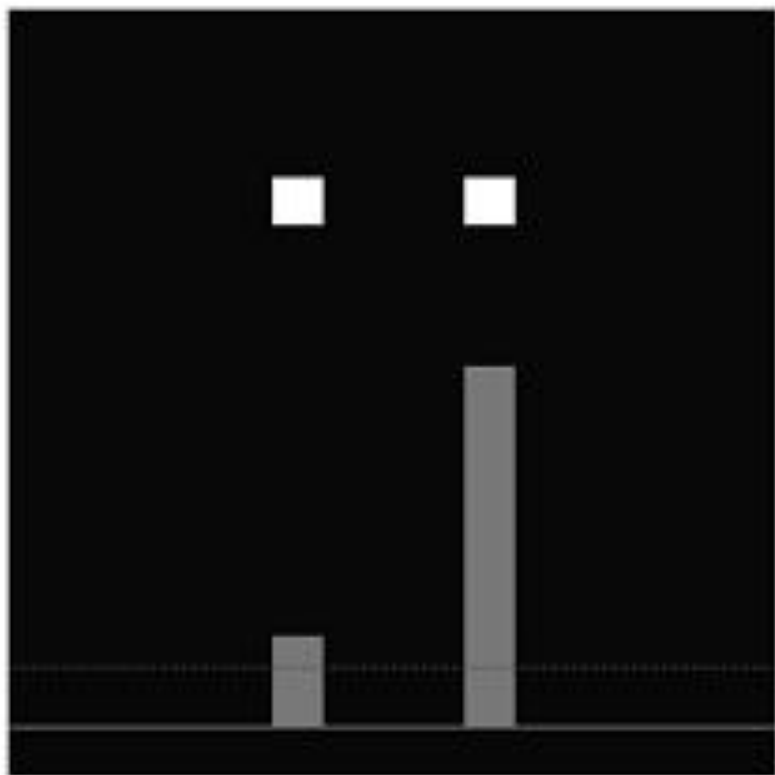
- Сферические
- Цилиндрические
- Кубические



Примеры карт окружения



Влияние HDR в описании источника (панорамы) при использовании эффекта размытия



Получение HDR из набора фотографий с разными выдержками



Выдержка T1



Выдержка T2



Выдержка T3

Пусть отклик камеры линеен. Рассмотрим один канал изображения.

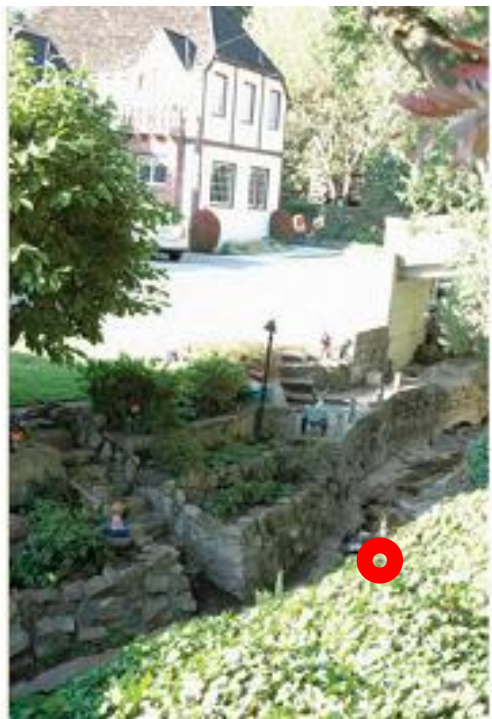
$$I_{ij} * T_1 = A_{ij}$$

$$I_{ij} * T_2 = B_{ij}$$

$$I_{ij} * T_3 = C_{ij}$$

P_{ij}

Получение HDR из набора фотографий с разными выдержками



Выдержка T1



Выдержка T2



Выдержка T3

P_{ij}

В общем случае:

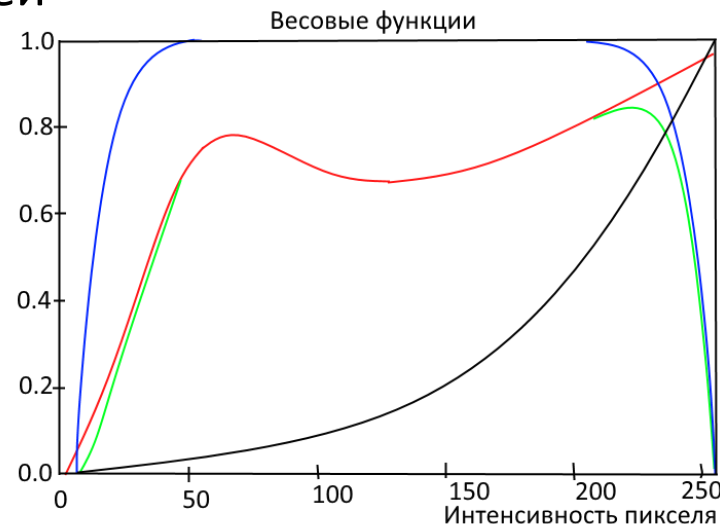
$$f(I_{ij} * T_1) = A_{ij}$$

$$f(I_{ij} * T_2) = B_{ij}$$

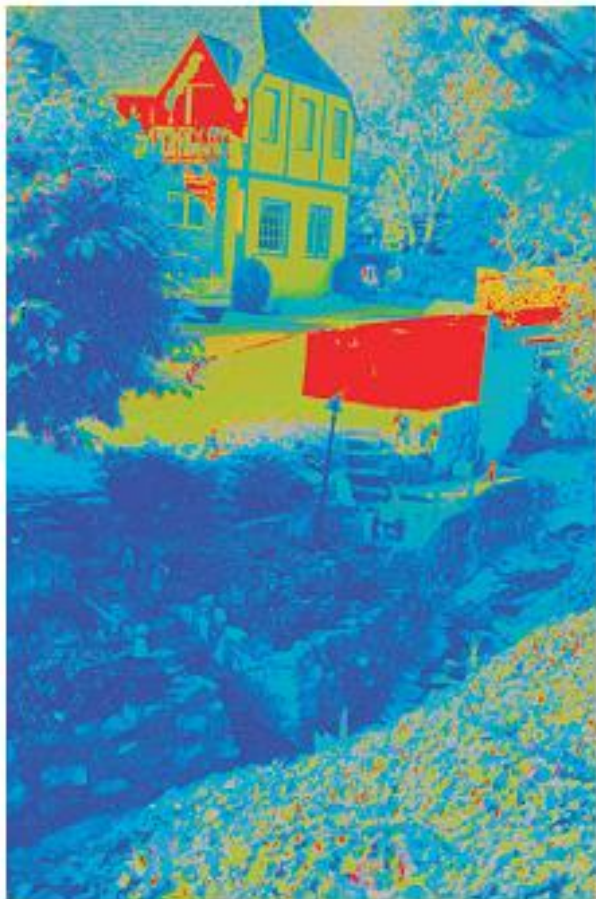
$$f(I_{ij} * T_3) = C_{ij}$$

Получение HDR из набора фотографий с разными выдержками

- 1) для каждой фотографии делаем гамма-преобразование ($\wedge 2.2$)
 - В общем случае – линеаризация отклика камеры
- 2) приводим яркости всех пикселей в единое пространство (нормализуем)
- 3) результат – усреднение пикселей
 - 0 и 255 – выбросить
 - Остальные нужно смешать
 - Желательно взять с бОльшим весом те пиксели, яркость которых соответствует диапазону наиболее хорошо передаваемых пикселей



Получение HDR из набора фотографий с разными выдержками



Получение HDR из набора фотографий с разными выдержками. Улучшения

Кривая отклика камеры может не быть известна

Каждый производитель вносит изменения в кривую:

- Скрывая шум
- Увеличивая насыщенность
- Увеличивая контраст

Изображения с разными выдержками могут совпадать не полностью

- Сдвиг/поворот изображения
- Двоение изображения (ghosting) – из-за движения в кадре между моментами съемки и во время съемки
- Ореолы вокруг источников света

Восстановление кривой отклика камеры из изображений

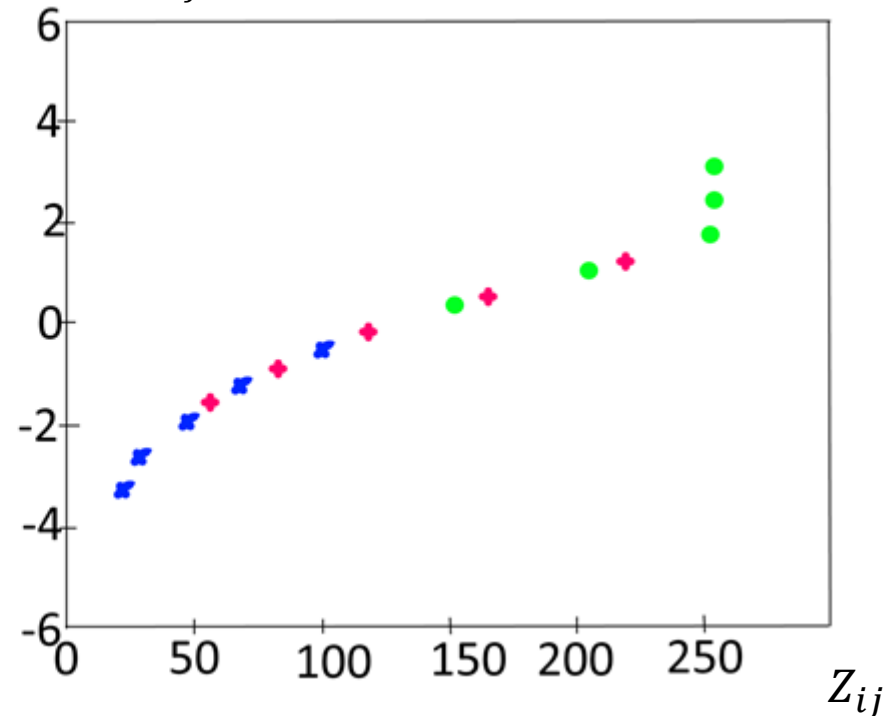
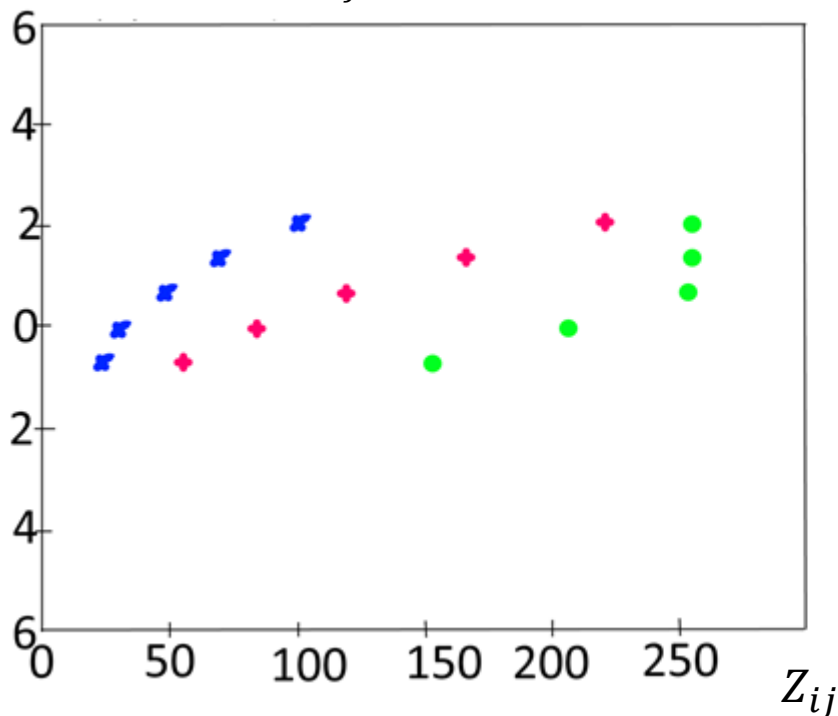
$Z_{ij} = f(E_i * \Delta(t_j))$ – значение экранной яркости пикселя i на кадре j

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i * \Delta(t_j)$$

$$\ln(f^{-1}(Z_{ij})) = \ln E_i + \ln \Delta(t_j) = g(Z_{ij})$$

$\ln E_i + \ln \Delta(t_j)$

$g(Z_{ij})$

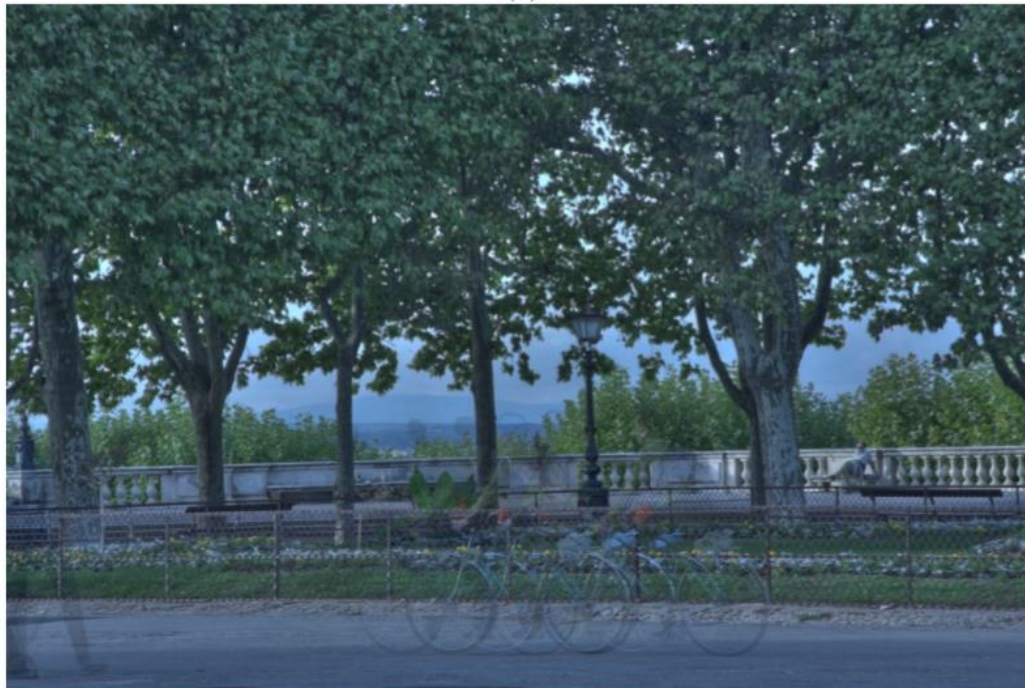


Получение HDR-изображения в видео

Съемка ведётся с переключением выдержки камеры



(a)



(b)

Пример реконструированного изображения с артефактами

Получение HDR-изображения в видео



(a)



(b)



(c)



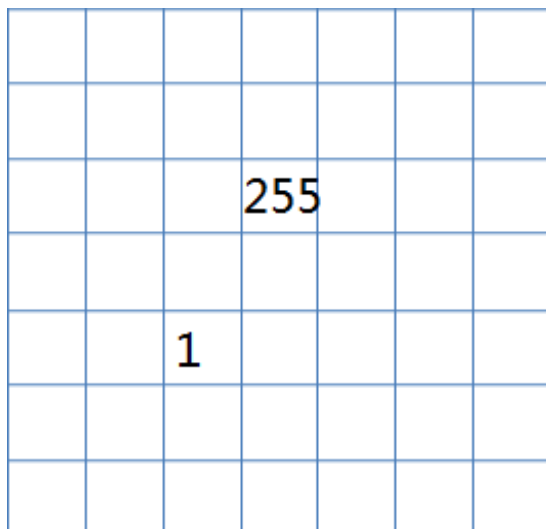
(d)

Пример: результат различных алгоритмов дегостинга

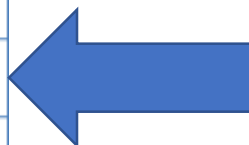
Алгоритмы тональной компрессии

$LDR(p_0) = TM(HDR(p \in P)), p_0 \in P$ — множество пикселей

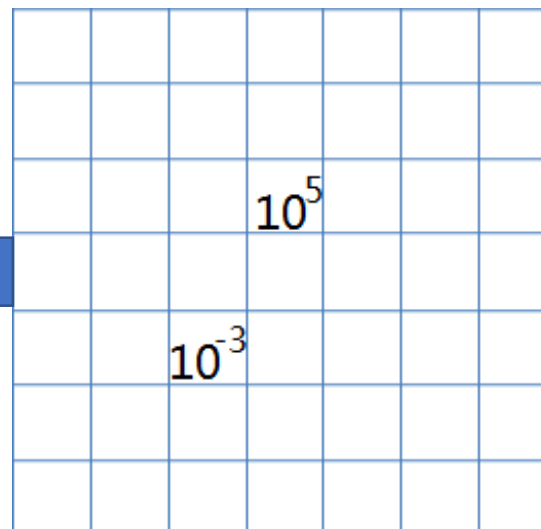
LDR



TM



HDR



Алгоритмы тональной компрессии

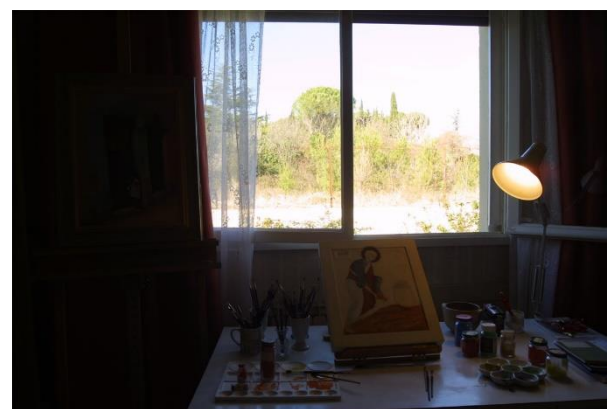
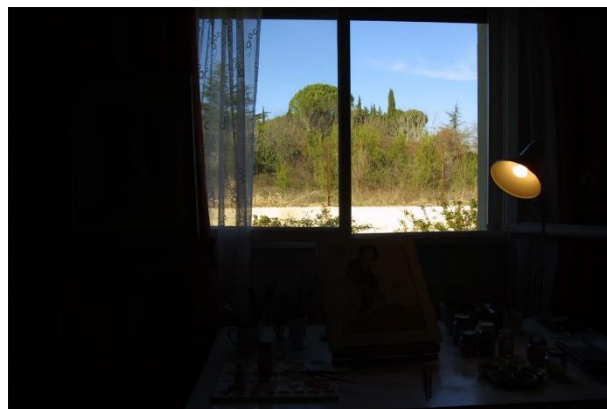
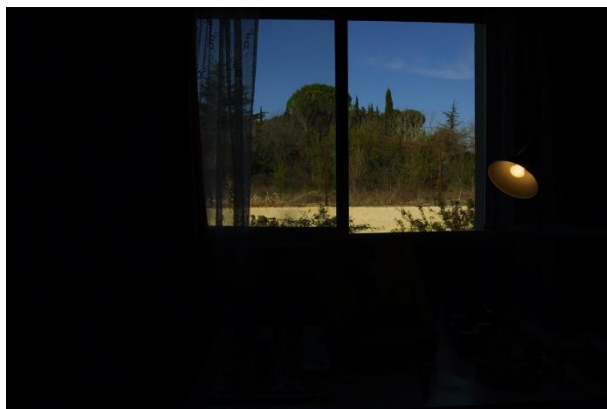
Классификация по способу реализации:

- Глобальные операторы
 - Идентичная нелинейная кривая сжатия для всех пикселей изображения
 - Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes
- Пространственно-зависимые операторы
 - Локальные операторы
 - Модуляция кривой для каждого пикселя и его окружения
 - Photographic Tone Reproduction for Digital Images
 - Частотные операторы
 - Работают в частотной области
 - Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images
 - Градиентные операторы
 - Работают с производной изображения
 - Gradient Domain High Dynamic Range Compression

Классификация по цели:

- Абсолютные значения\относительные значения
- Теоретические\экспериментальные
- Яркость\детали\художественные эффекты

Тестовое изображение

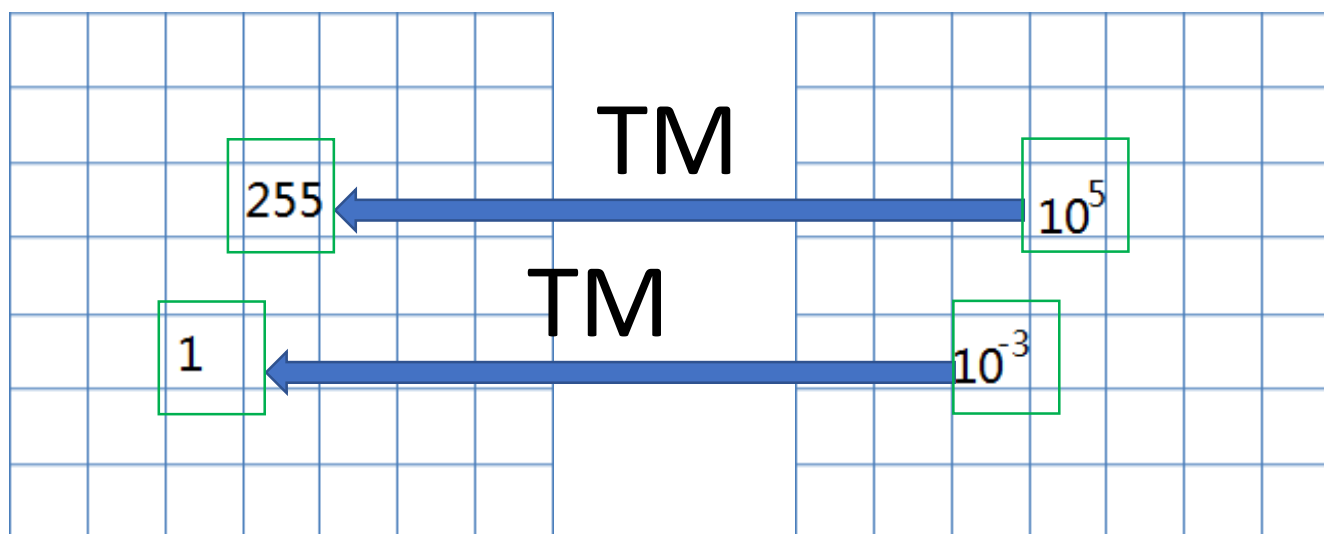


Глобальные операторы

$LDR(p_0) = TM(HDR(p_0)), p_0 \in P$ — множество пикселей

LDR

HDR



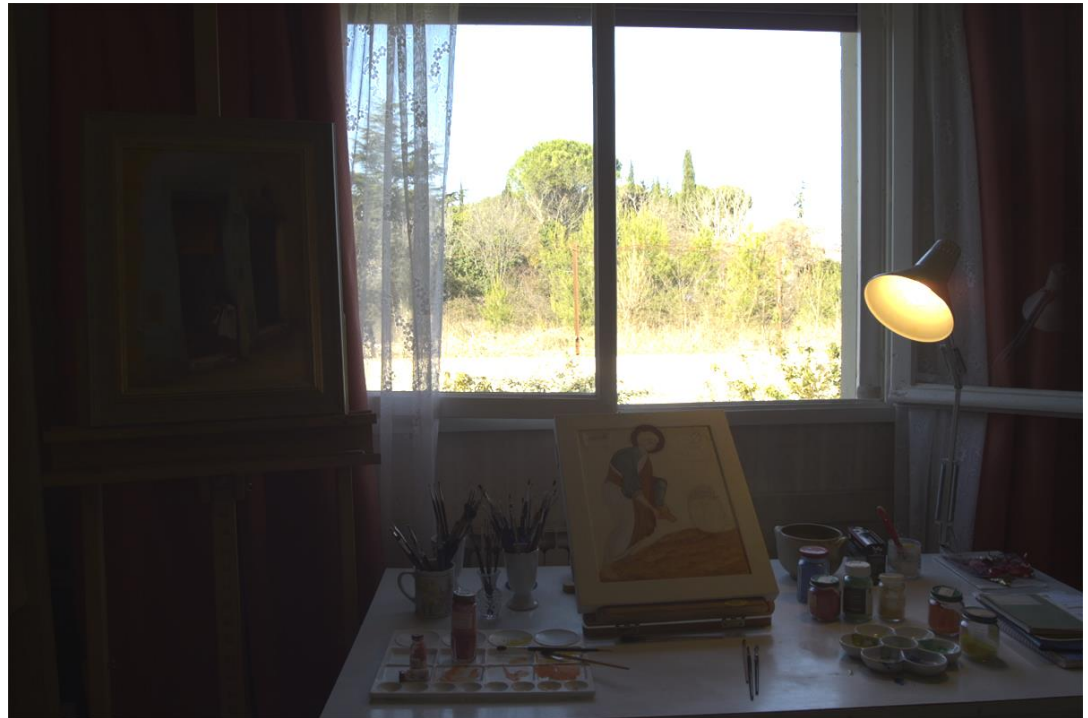
Идентичная нелинейная кривая сжатия для всех пикселей изображения

- 👍 Высокая эффективность
- 👎 Проблемы с очень широким диапазоном

Глобальные операторы

Примеры:

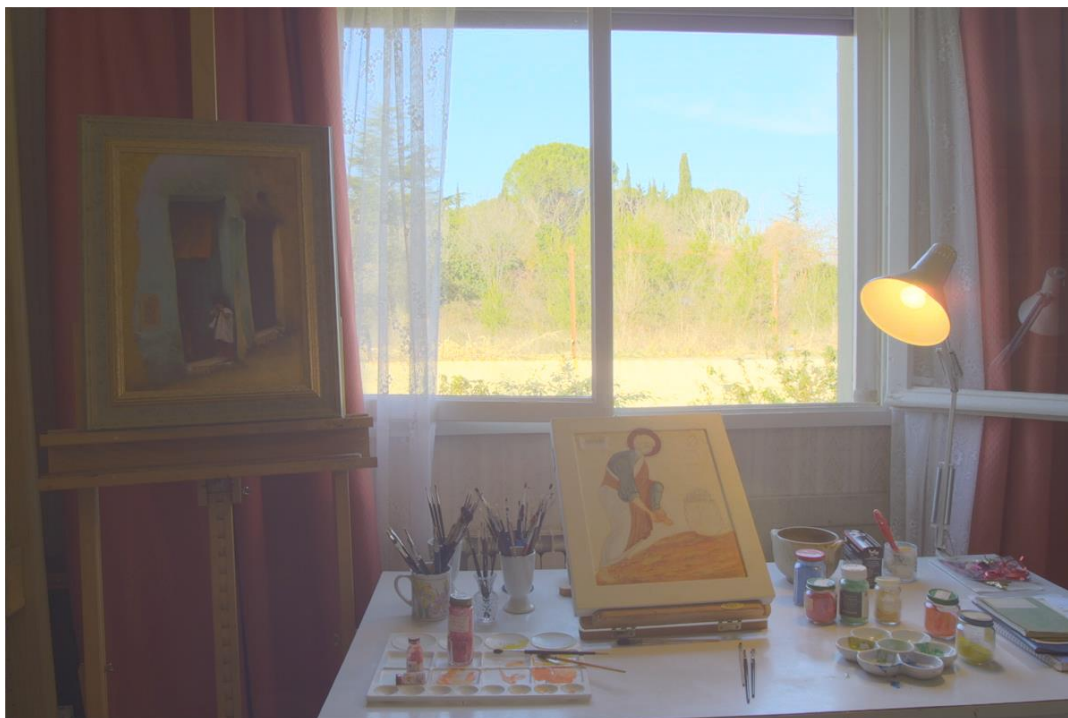
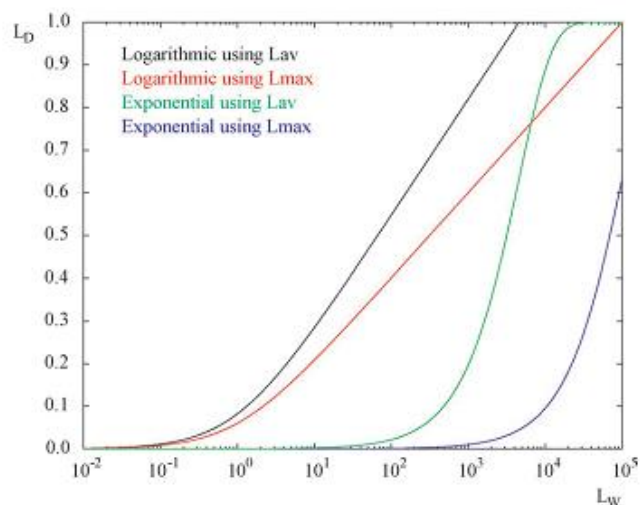
- Линейное сжатие
- Отбрасывание предельных значений
- Нелинейная коррекция
- Комбинация методов
- ...



Отбрасывание 10% сверху и
последующая нелинейная
коррекция (степень 0.5)

Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes

Adaptive Logarithmic Mapping for
Displaying High Contrast Scenes
F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen, and N.
Chiba
In Eurographics 2003



- Закон Вебнера-Фехнера, логарифмическое восприятие
- Использование глобальной адаптации
- Использование максимума для ограничения выходной яркости
- Использование параметра сдвига для настройки контрастной адаптации

Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes

Работа ведётся в пространстве XYZ, поэтому используется прямая и обратная конвертация с сохранением отношений хроматических компонент

$$L_m = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{p \in N} \ln(Y_p)\right), L_w = \frac{Y}{L_m}$$

$$L_d = \frac{L_{dmax} \cdot 0.01}{\log_{10}(L_{wmax} + 1)} \cdot \frac{\log(L_w + 1)}{\log\left(2 + \left(\left(\frac{L_w}{L_{wmax}}\right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}\right) \cdot 8\right)}$$

L_{dmax} – потенциальный максимум устройства

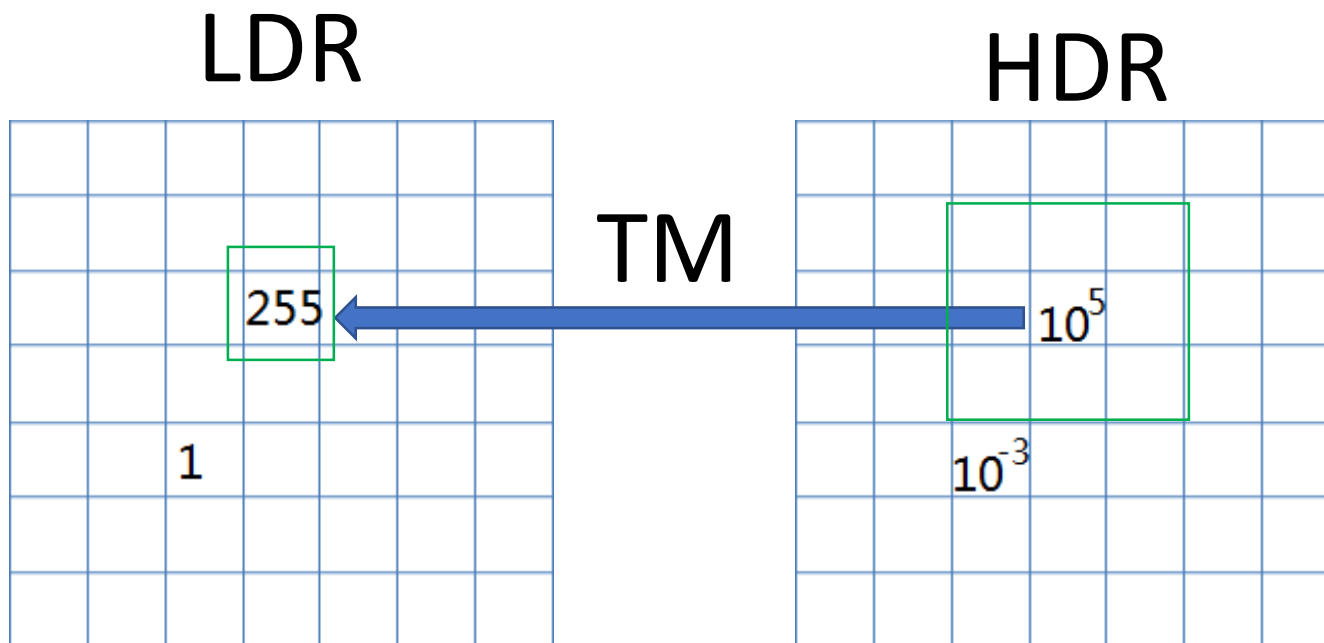
L_{wmax} – максимальное значение нормированной яркости по изображению

b ($\sim 0.7-0.9$) – регулирует отображение пикселей с низкой и средней яркостью

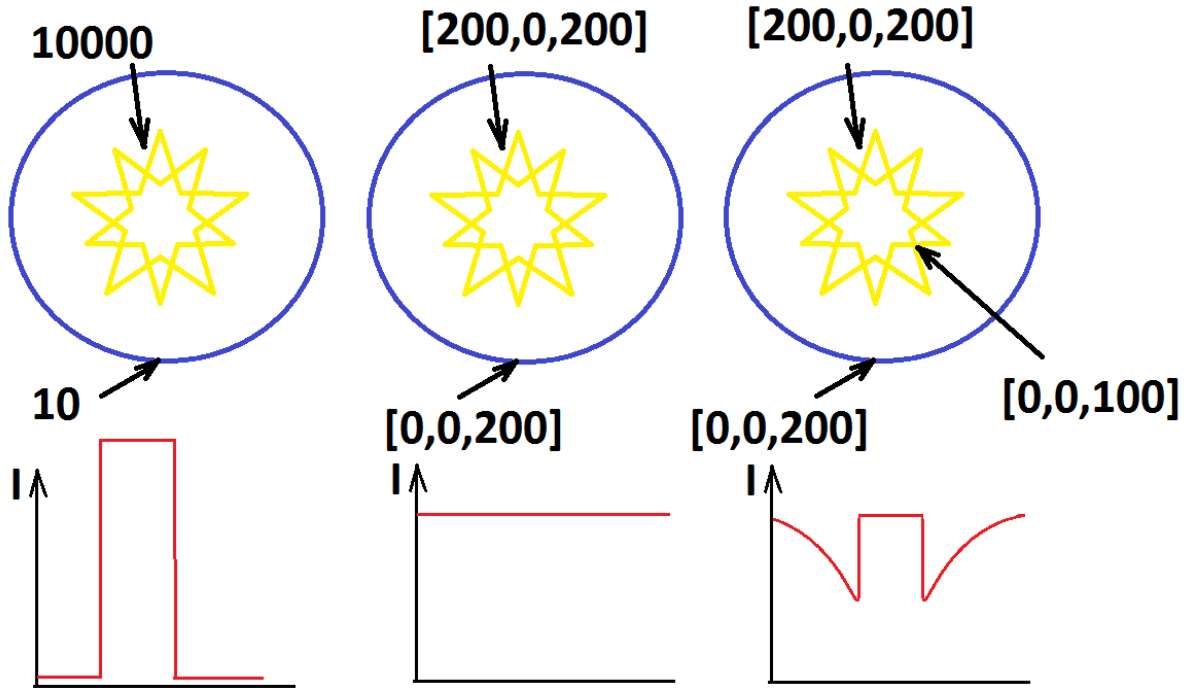
Пространственно-зависимые операторы

$$LDR(p_0) = TM(HDR(p \in P_w)),$$

$p_0 \in P$ — множество пикселей,
 $P_w \in P$ — подмножество пикселей, включающее p_0



Общий подход локальных методов. Инвертирование контраста



$$L_d(x, y) = \frac{1}{k L_w^{\text{blur}}(x, y)} L_w(x, y)$$

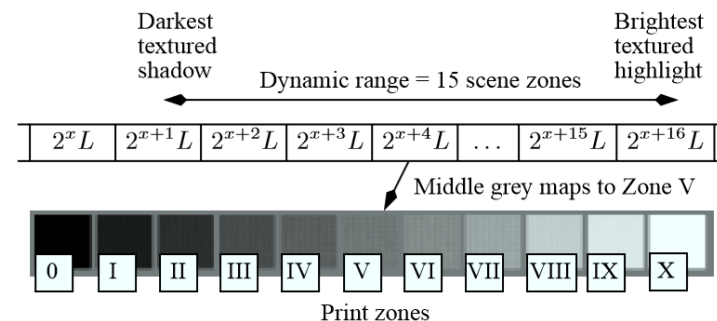
Photographic Tone Reproduction for Digital Images

Photographic Tone Reproduction for Digital Images

E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda
In ACM Transactions on Graphics, 2002

Попытка аппроксимации процесса экспонирования фотографии

1. Линейное экспонирование (Зонная система)
2. Ретушь (dodging and burning).
Селективное высветление / затемнение участков фотографии
 1. Для каждого участка фотографии нужно найти наибольшую область, не содержащую контрастных переходов
 2. Темные пиксели в светлых областях – затемняются.
 3. Светлые пиксели в темных областях высветляются

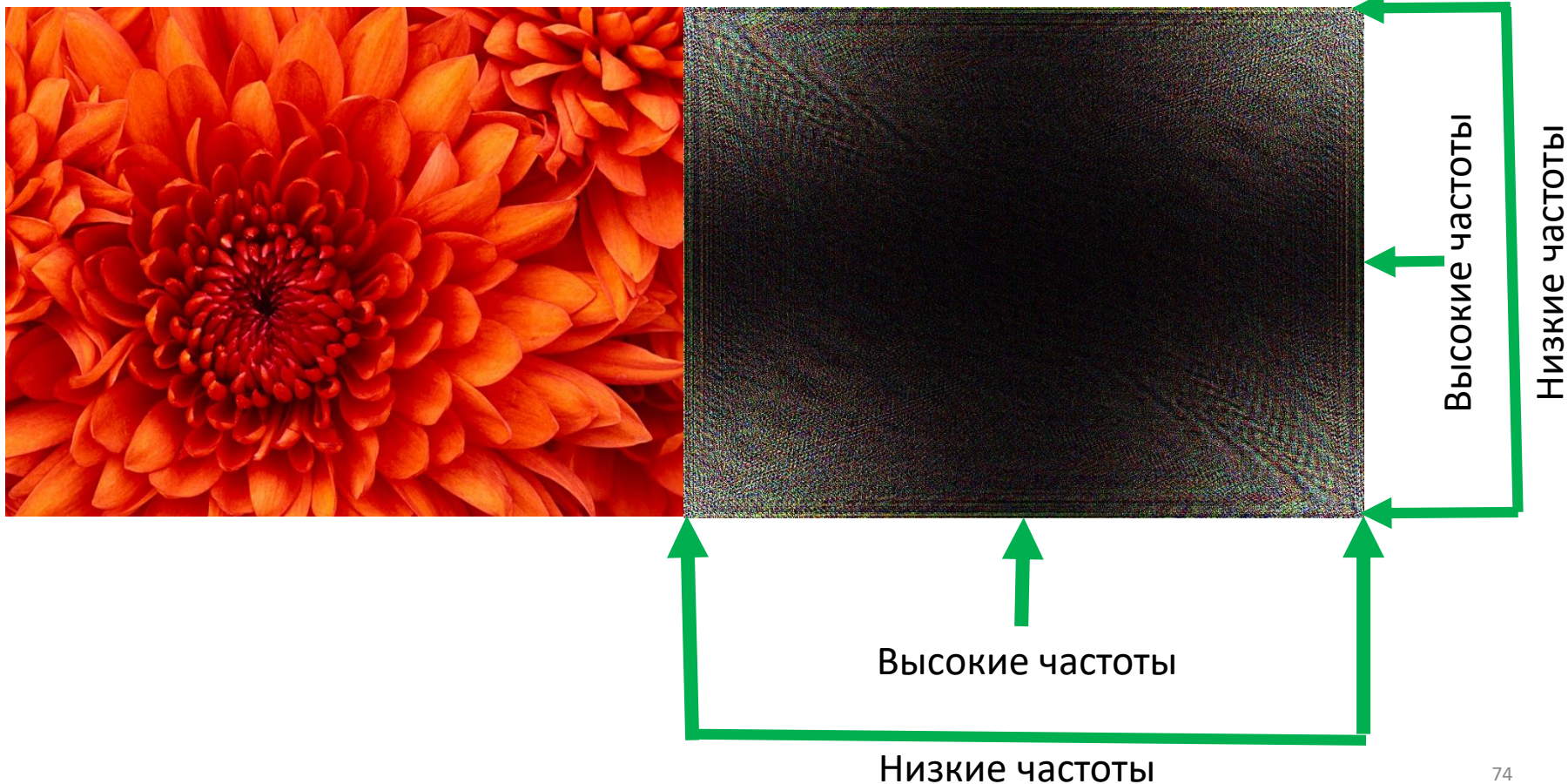


Общий подход градиентных и частотных методов

- Идея 1:
 - Разделение освещенности (illuminance) и отражательности (reflectance)
 - Можно сжимать освещенность
- Идея 2:
 - В областях большой яркости часто большие градиенты
 - Источники света, блики и т.п.
 - Можно дифференцировать картинку и дальше работать с производными

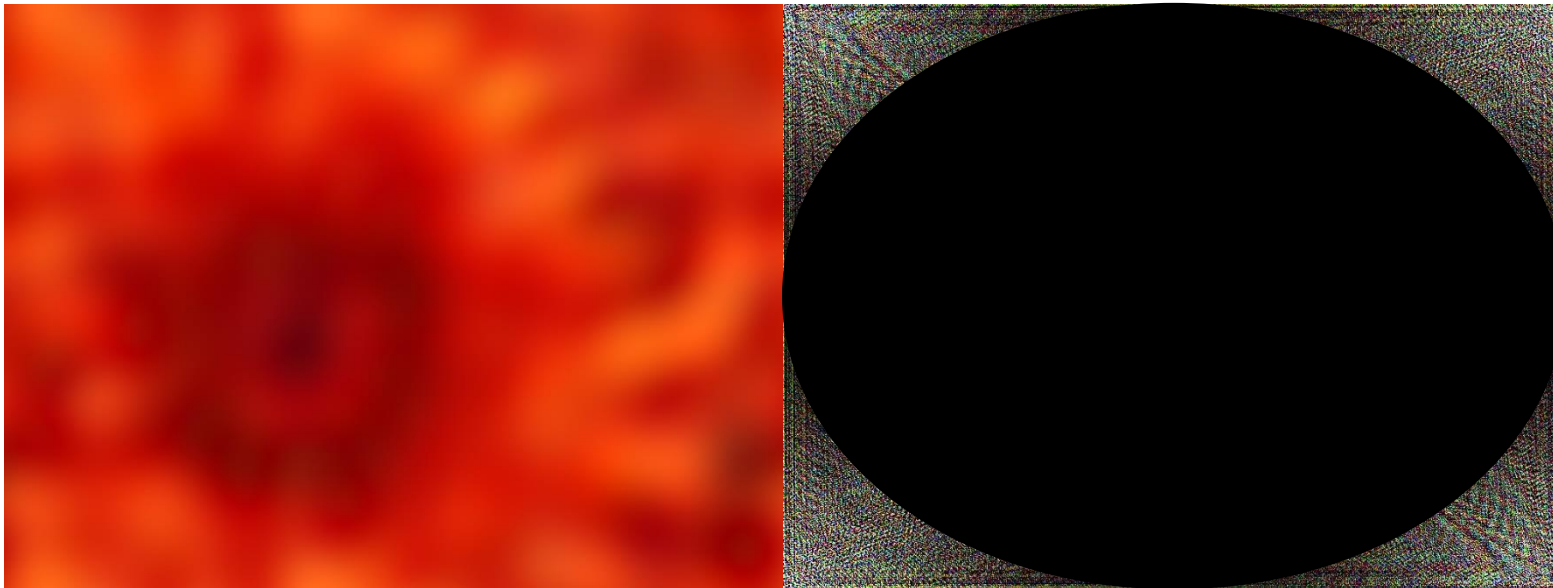
Частота изображения

- Двумерное преобразование Фурье

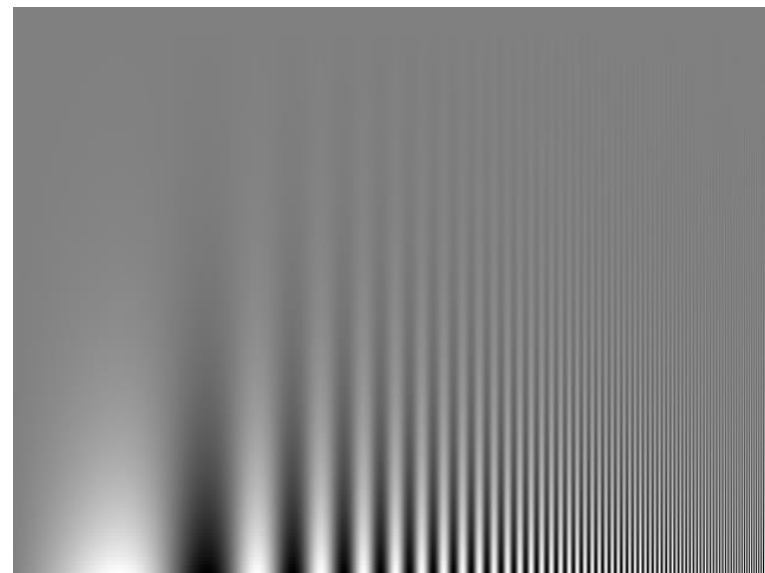
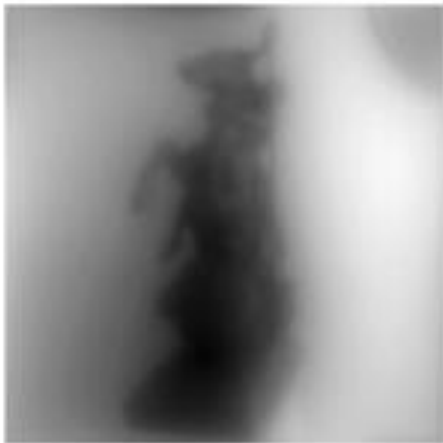


Частота изображения

- Двумерное преобразование Фурье



Пример работы с различными частотами изображения



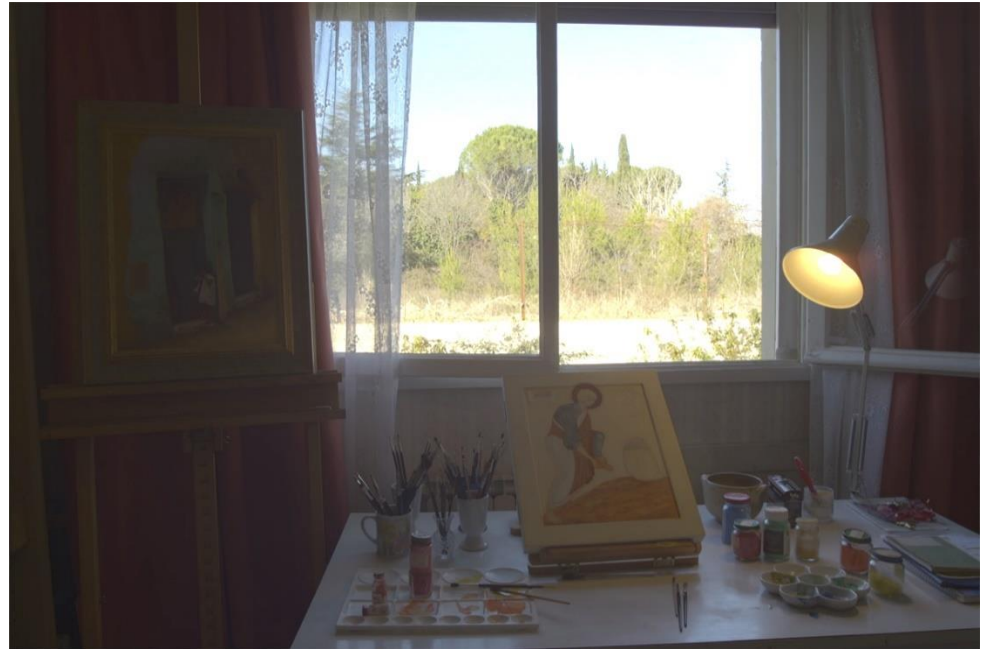
Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images

[Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images](#)

F. Durand and J. Dorsey

In ACM Transactions on Graphics, 2002

- 1) Преобразование RGB->Yxy
(Input)
- 2) Применение билатерального фильтра , получили «освещенность»
Base
- 3) Деление исходного изображения на «освещенность» $\text{Detail} = \text{Input} / \text{Base}$
- 4) Сжатие диапазона за счет деления изображения (Base) до достижения нужного уровня контраста
- 5) Реконструкция изображения и перевод в RGB

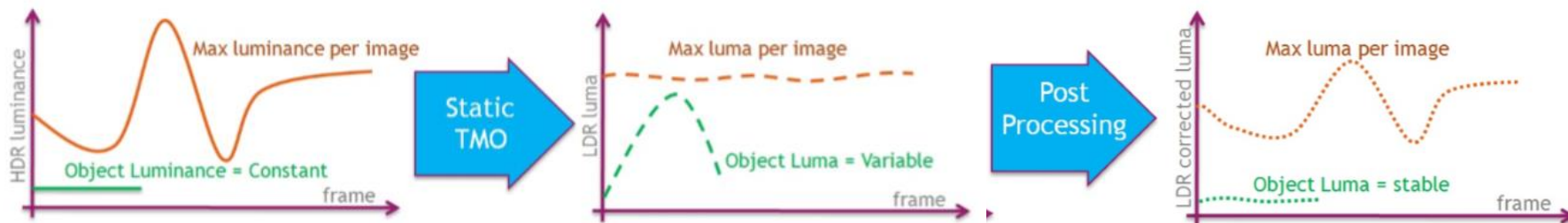


Gradient Domain High Dynamic Range Compression

Gradient Domain High Dynamic Range Compression
R. Fattal, D. Lischinski, and M. Werman
In ACM Transactions on Graphics, 2002



TM видеопоследовательностей



- Глобальные операторы более устойчивы
- Главные проблемы:
 - Мерцание (если алгоритм базируется на неустойчивой статистике)
 - Несогласованность временной яркости – несохранение изменения яркости в исходном HDR и в результирующем LDR
 - Гостинг (в локальных методах)
- Возможные решения проблемы мерцания:
 - Детектировать мерцание (сильную вариацию яркости во входных кадрах), иначе соответствовать изменению яркости
 - Прямая фильтрация кривой адаптации (постпроцессинг)
- Решение проблемы рассогласованности – явный учёт отношения между входом и выходом.

Применение к временным последовательностям. Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes

Работа ведётся в пространстве XYZ, поэтому используется прямая и обратная конвертация с сохранением отношений хроматических компонент

$$L_m = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{p \in N} \ln(Y_p)\right), L_w = \frac{Y}{L_m}$$

$$L_d = \frac{L_{dmax} \cdot 0.01}{\log_{10}(L_{wmax} + 1)} \cdot \frac{\log(L_w + 1)}{\log\left(2 + \left(\left(\frac{L_w}{L_{wmax}}\right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}\right) \cdot 8\right)}$$

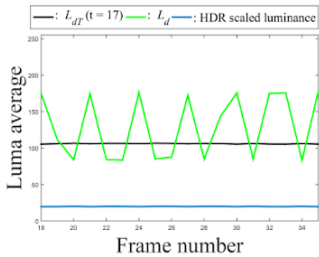
L_{dmax} – потенциальный максимум устройства

L_{wmax} – максимальное значение нормированной яркости по изображению

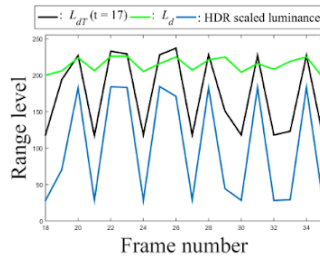
b ($\sim 0.7-0.9$) – регулирует отображение пикселей с низкой и средней яркостью

Применение к временным последовательностям. Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes

A temporal tone mapping adaptation: An application using logarithmic camera C. Walbrecq, B. Magnier, I. Marc, IST 2018



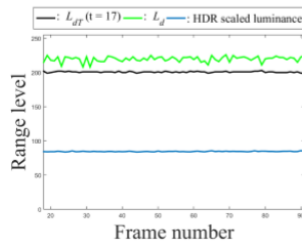
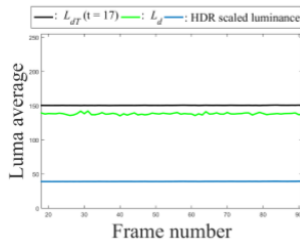
(a) Average of the luma level



(b) Range level

$$L_{mT} = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=0}^t L_{max}(T - i) \quad L_{maxT} = \frac{L_{mT}}{L_m}$$

$$L_{dT} = \frac{L_{dmax} \cdot 0.01}{\text{Log}_{10}(L_{maxT} + 1)} \cdot \frac{\log(L_w + 1)}{\log\left(2 + \left(\left(\frac{L_w}{L_{maxT}}\right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}\right) \cdot 8\right)}$$



(c) Original Drago algorithm, frame 36



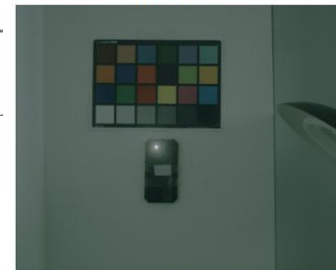
(d) Temporal tone mapping, frame 36



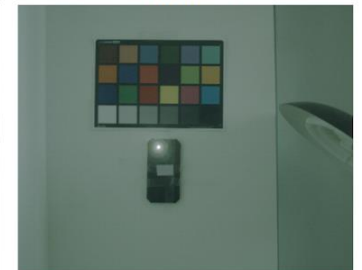
(e) Original Drago algorithm, frame 37



(f) Temporal tone mapping, frame 37



(g) Original Drago algorithm, frame 38



(h) Temporal tone mapping, frame 38

Тональная компрессия видео

Temporally Coherent Local Tone Mapping of HDR Video. T. Aydin et al. 2014

- Использование оптического потока
- Карты пространственно-временной и временной фильтрации
- <https://www.youtube.com/watch?v=6yltM8UB7k4>

Tone mapping for video gaming applications. Khaldieh et al. 2018

- Для игр (интерактивно, быстро)
- Используем кодировщик (Perceptual Quantizer – PQ) над яркостью (примерно как воспринимает разные яркости человек)
- Считаем гистограмму (2048 JND), выделяем редкие, средние, частые бины
- Настраиваем параметры глобальной кривой статистиками из гистограммы
- Пост-процессинг для устранения мерцания

VR+HDR: A system for view-dependent rendering of HDR video in virtual reality. Najaf-Zadeh et al. 2017

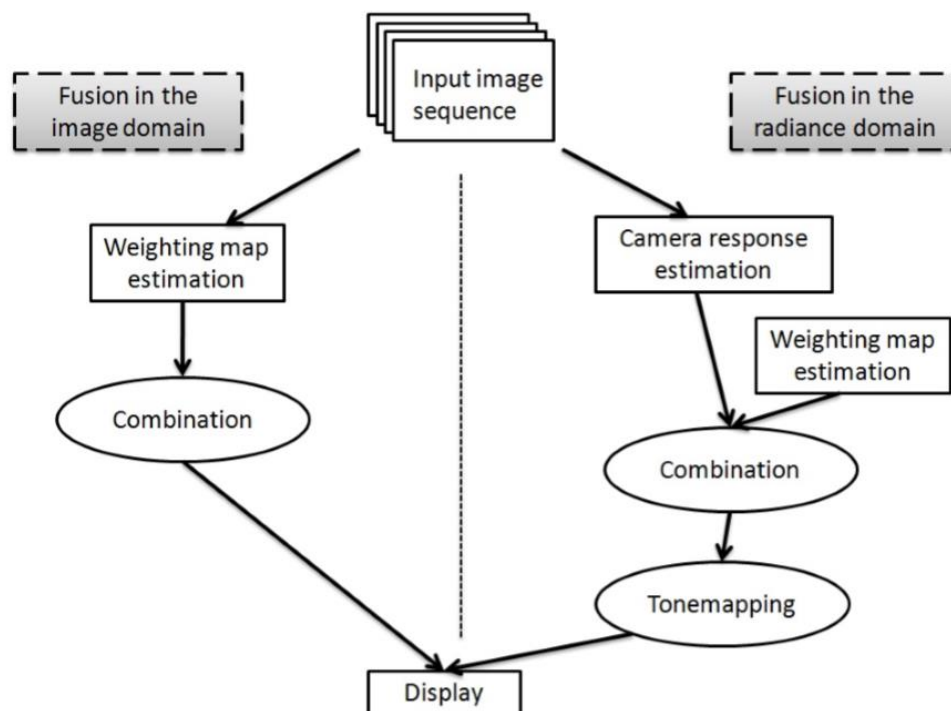
- Работа с панорамой для приложений виртуальной реальности
- Поле зрения 100 градусов в панораме 360 градусов

Exposure Fusion

Техника смешения фотографий с разной выдержкой без построения HDRI

Используют фотографии в качестве альтернативы ТМ

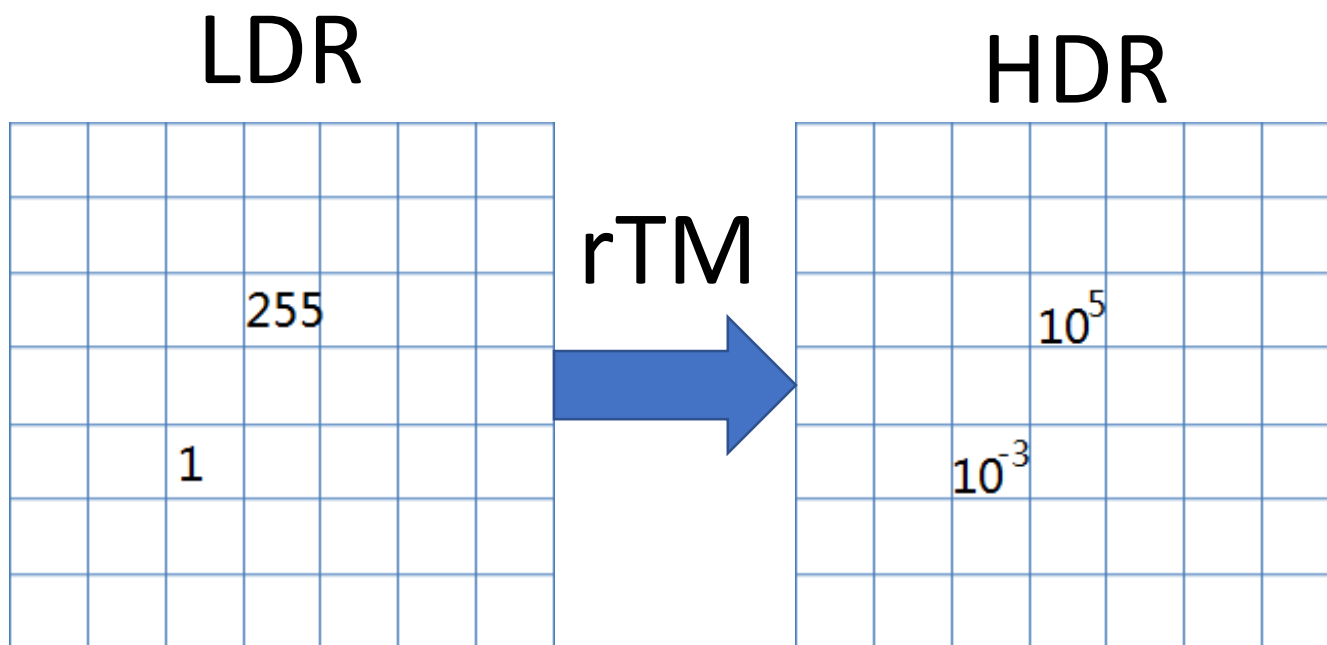
$$Result = \frac{\sum_{i=1}^N w_i * Image_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$



Exposure Fusion Result



Обратная задача (восстановление HDR)

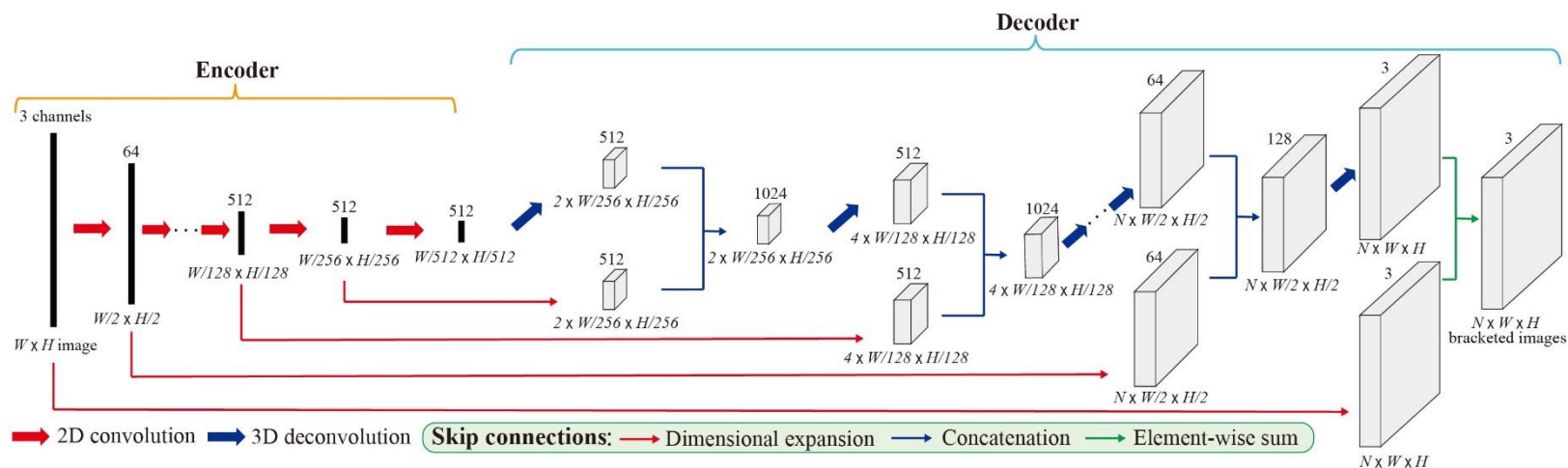


- Теоретически можно аппроксимировать (не точно восстановить), какие были значения, если накопить знания
- Машинное обучение

Обратная задача (восстановление HDR)

Deep Reverse Tone Mapping. Y. Endo et al., SIGGRAPH Asia 2017

<http://www.npal.cs.tsukuba.ac.jp/~endo/projects/DrTMO/>



Обратная задача (восстановление HDR)

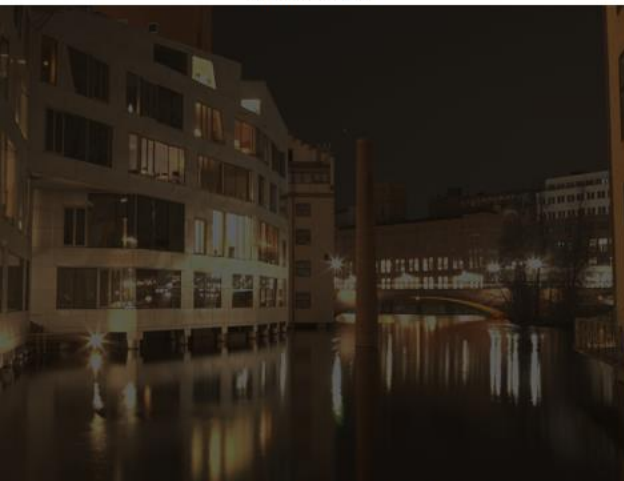
Обучение: 1,043 HDR -> 46,935 LDR (9 выдержек, 5 типов кривых), 512×512



Обратная задача (восстановление HDR)

Результаты

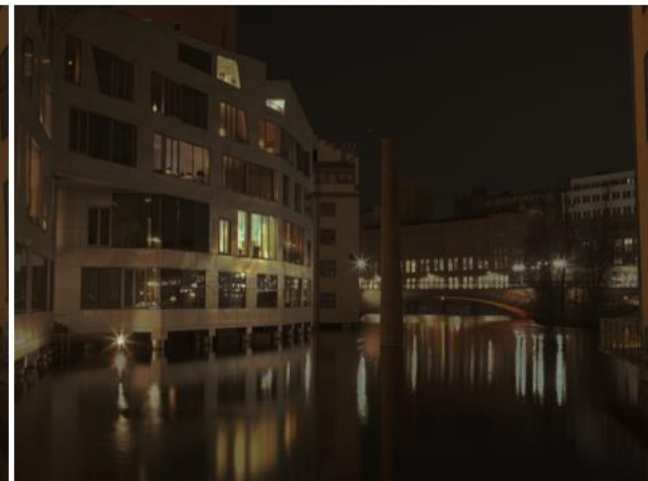
Input images



[Eilertsen et al. 2017]



Ours (MergePhotoshop)



Промежуточные итоги

Вопросы:

- Как получить HDR изображение?
- Как визуализировать?

Отвечают алгоритмы:

- Можно синтезировать HDR или получить из набора фотографий, снятых одной камерой, из видео убрать дефекты съёмки
- Примените алгоритм тональной компрессии, позаботьтесь о стабильности

Бонусы алгоритмов:

- Получи результат фотографии мгновенно без HDR (Exposure Fusion)
- Восстанови, каким бы мог быть HDR (нейросети)

ИТОГИ

- HDR повышает реализм
- Технология HDR – не слишком сложно, но дорого, не решает все проблемы
- Алгоритмы HDR - несовершенные, но бесплатно

