

Спецкурс ОСФИ

Лекция 3

16 апреля 2015

Изображения широкого динамического диапазона

Докладчик: Кристина Зипа

Лаборатория компьютерной графики и
мультимедиа ВМК МГУ

План лекции

- Зачем нам нужны изображения широкого диапазона (HDR) и что это такое
- Отображение HDR
 - HDR дисплеи
 - Алгоритмы тональной компрессии (Tone mapping) HDR - > LDR
- Получение HDR-изображений
- Кодирование HDR-изображений
- Применение HDR для освещения сцены при визуализации
- Exposure Fusion

Зачем нам HDR?

- Синтез изображений
 - Не фотореалистичный? Можно без HDR. OpenGL
 - Фотореалистичный. Физические значения яркости -> яркость дисплея
 - 1 задание $[\frac{Cd}{m^2\mu}] \rightarrow [RGB] (0..256+)$
 - Общая задача при визуализации Float->Byte
- Rendering LDR (3dsmax) vs Rendering HDR (3dsmax)



Как обойтись без HDR?

- 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 отобразить результат визуализации?

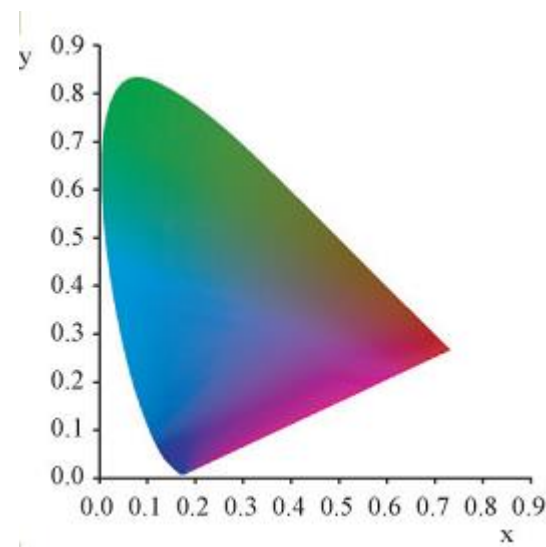
- Причина недостаточности камеры: глаз – аналоговый, а камера цифровая
- Будем решать задачу:
 1. Какое у нас устройство вывода?
 2. Как вывести изображение?

Дискретизация изображения

- Достаточно ли типичных параметров дискретизации изображения?

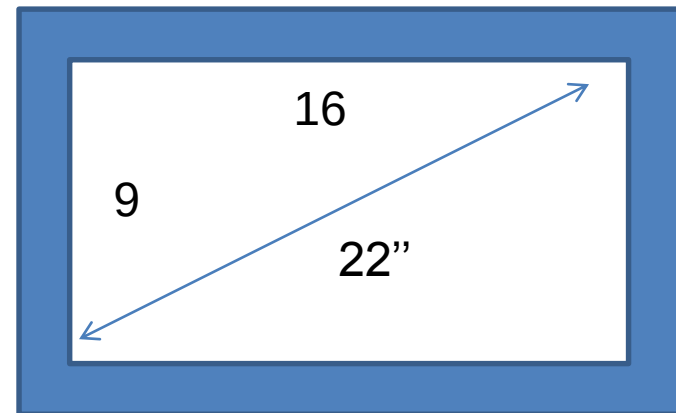
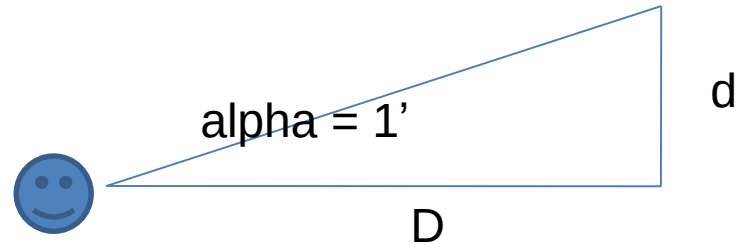


- Разрешение
- Цвет
- Яркость



Дискретизация изображения: разрешение

- Считается, что разрешение зоркого глаза – 1 угловая минута ($1 / 60$ градуса)
- На расстоянии 1м человек может различить квадратики размером $\text{tg}(1/60)\text{м} \sim 0,3\text{мм}$
- Какое разрешение должно быть у монитора 16х9 диагональю 22'', чтобы человек не различал пиксели?
- Размер экрана $\sim 50 \times 30\text{см}$.
- Размер пикселя: 1666х1000
- Вполне по силам современным дисплеям!



Дискретизация изображения: разрешение

- Таблица соответствий dpi (количество точек на дюйм) и расстояний просмотра

Расстояние (м)	dpi
0.2	436.6
0.3	291.1
0.5	174.6
0.6	145.5
0.8	109.1
1	87.3
2	43.7

- Dpi некоторых устройств

Модель	Диагональ экрана	Разрешение	Пикселей на дюйм
MacBook Pro 15 Retina		2880×1800	220
Монитор LG 22MP65D-P	21	1920×1080	105
Монитор SAMSUNG S22D300NY	21	1920×1080	105
iPod touch (4-е поколение) и iPhone 4/4S		960×640	330
iPhone 6+		1920×1080	401
Телефон Samsung Galaxy s6	5.1	2560×1440	575

Дискретизация изображения:

разрешение: цвет

- Цвет характеризуется:
 - Тон
 - Насыщенностью
 - Светлотой
- Что можно сказать про тон и насыщенность?
- В разных источниках – разные данные!
- Можно считать, что около 150 оттенков тона + 25 по насыщенности можно различить
 - В.В.Мешков и А.Б.Матвеев "Основы светотехники" (М., Энергоатомиздат, 1989)
 - "Физическая энциклопедия" под ред. А.М.Прохорова в 5 томе (М., Большая Российская энциклопедия", 1998)
- Грубо: несколько тысяч цветов, не считая светлоты (яркости).
- В модели RGB нормируем значение цвета $R+G+B=1$. Получается $255*255 = 65025$ оттенков.
- 8 бит на канал достаточно для кодирования цвета!

Дискретизация изображения: разрешение: яркость

- Человеческий глаз в состоянии адаптироваться к освещению в пределах 10-ти порядков изменения яркости!
- При этом одновременно (сцена) до 5-ти порядков изменения яркости
- Мониторы – макс. 2 порядка
 - Поэтому для обычных мониторов 8 бит вполне хватает
- Но этого не хватает для описания динамического диапазона яркостей

Что такое динамический диапазон?

- Отношение между минимальным и максимальным значением возможных значений некоторой измеряемой величины
- Минимум часто определяется минимальной различимым значением, шумом, помехами и т.п.
- Часто применяются для различных систем, динамика определяется сигналом во времени
- Измеряется как
 - Отношение
 - Двоичный логарифм отношения (стопы)
 - Яркость, часто в фотографии
 - Десятичный логарифм отношения (децибеллы)
 - Звук

Примеры статического и динамического диапазона

- 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. 2 порядка = **статический диапазон**
- Технология dynamic contrast = **динамический диапазон**

Типичные яркости излучения

Фон	Яркость (cd * 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 (CRT, LCD)	1000

Этого не хватает для описания динамического диапазона яркостей

Изображения широкого диапазона

- Изображения с количеством различных передаваемых значений яркости более 8 бит называются Изображениями Широкого (Динамического) Диапазона
 - HDR – High Dynamic Range Images
- Обычные 8бит изображения = Изображения Узкого (Динамического) Диапазона
 - LDR – Low Dynamic Range Images
- Задачи, связанные с HDR:
 - Визуализация HDR (нужно нам в первую очередь)
 - Получение HDR и хранение HDR (для использования данных реального мира)

План лекции

- Зачем нам нужны изображения широкого диапазона (HDR) и что это такое
- Отображение HDR
 - HDR дисплеи
 - Алгоритмы тональной компрессии (Tone mapping) HDR - > LDR
- Получение HDR-изображений
- Кодирование HDR-изображений
- Применение HDR для освещения сцены при визуализации
- Exposure Fusion

HDRI-дисплеи

- Добавление подсветки для каждого пикселя
- Для каждого изображения строится 2 текстурных карты
 - Jonathan Cohen, Chris Tchou, Tim Hawkins, Paul Debevec. Real-Time High Dynamic Range Texture Mapping. Proceedings of the Eurographics Workshop in London, United Kingdom, June 25–27, 2001, pp. 313-320
- Рекомбинация в процессе отображения
-  Более простая обработка, чем ТМ
-  Дороговизна, нераспространенность

Как преобразовать наши расчеты в изображение?

- 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»

LDR vs HDR



LDR vs HDR



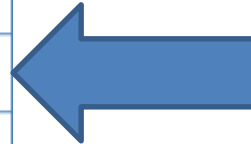
Преобразование HDR->LDR

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

LDR

			255			
		1				

TM



HDR

			10^5			
			10^{-3}			

Преобразование HDR->LDR

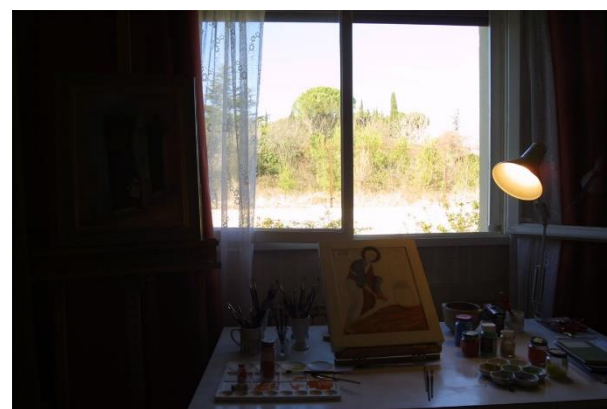
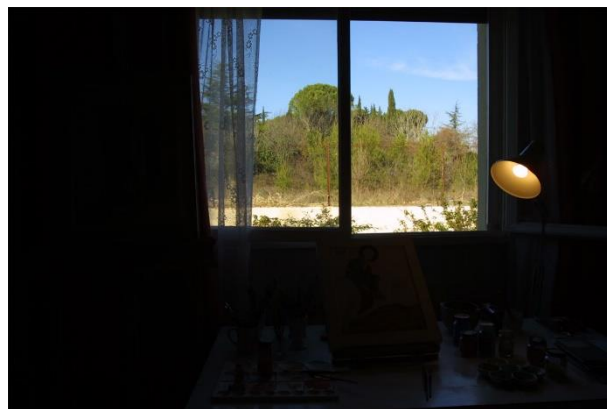
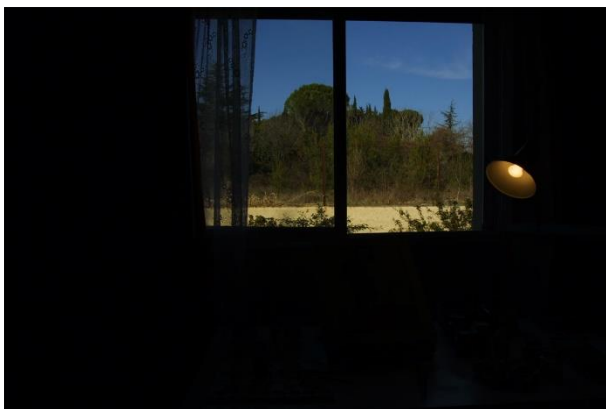
- Глобальные операторы
 - Идентичная нелинейная кривая сжатия для всех пикселей изображения
 - Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes
- Пространственно-зависимые операторы
 - Локальные операторы
 - Модуляция кривой для каждого пикселя и его окружения
 - Photographic Tone Reproduction 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 методов ТМ

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



Тестовое изображение

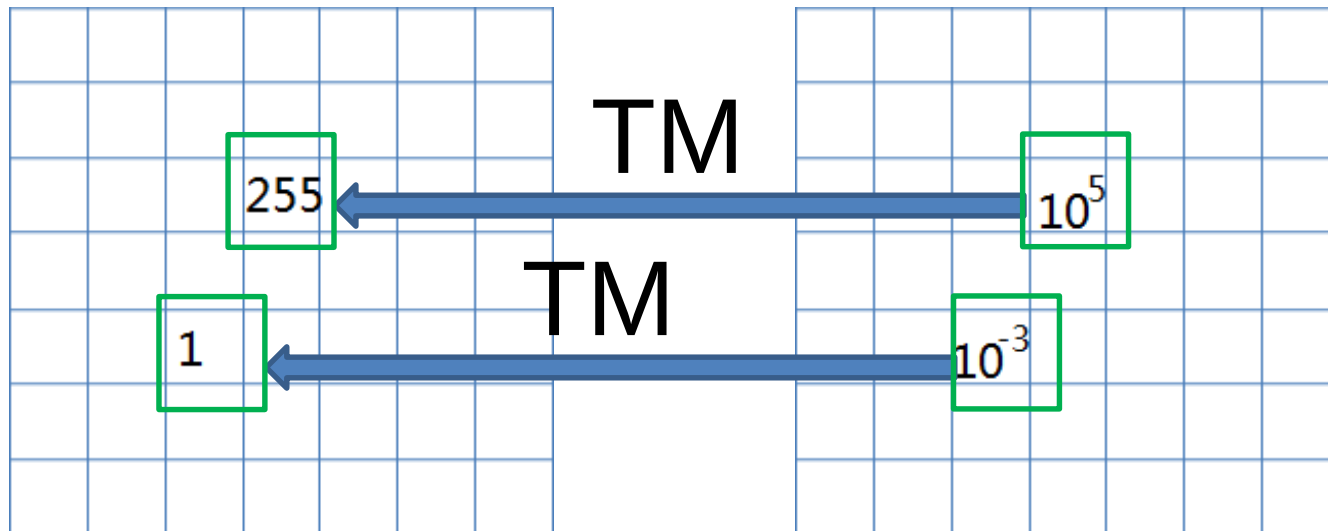


Глобальные операторы

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

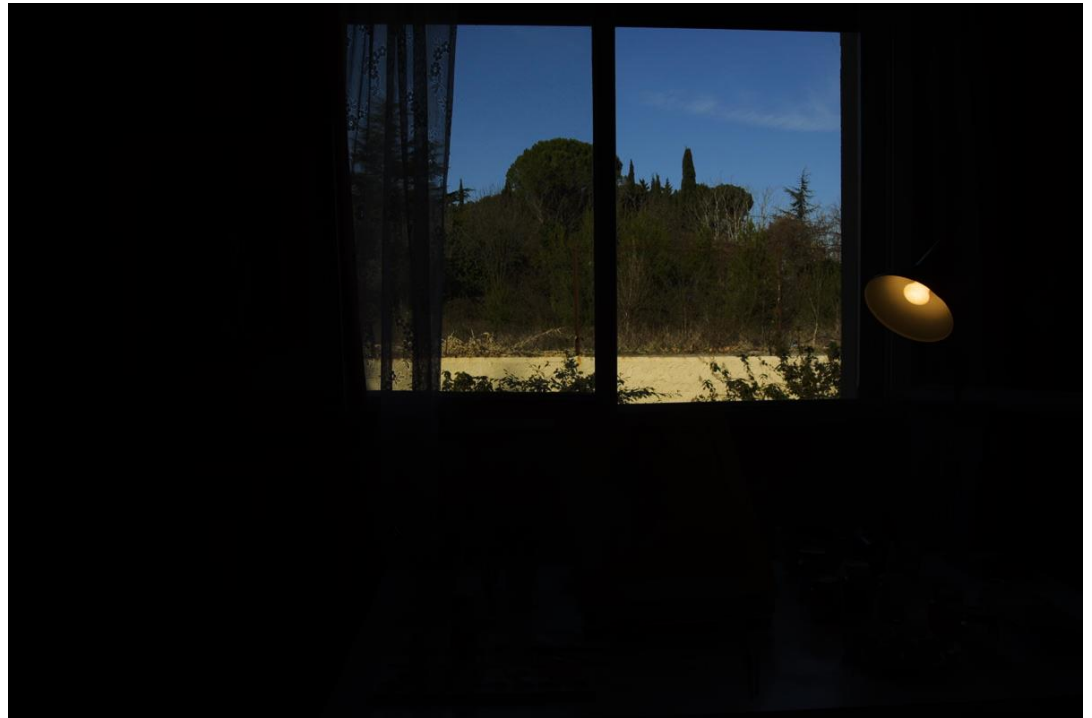
LDR

HDR



Глобальные операторы

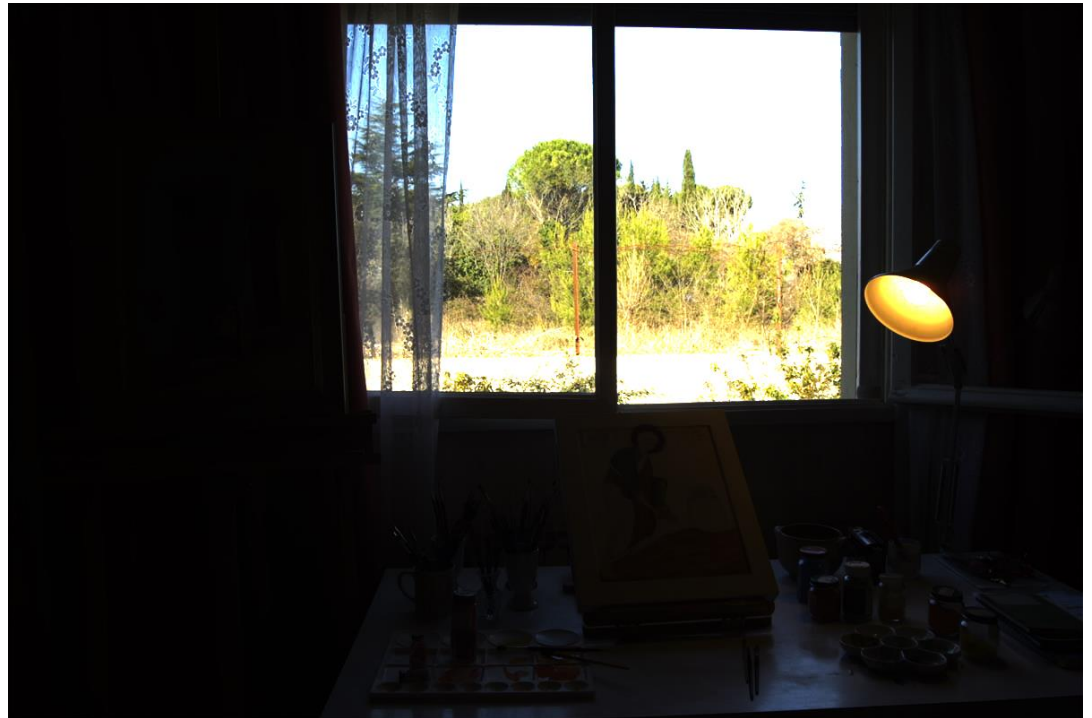
- Примеры:
 - Линейное сжатие
 - Отбрасывание предельных значений
 - Нелинейная коррекция
 - Комбинация методов
 - ...



Линейное сжатие

Глобальные операторы

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



Отбрасывание 10% сверху

Глобальные операторы

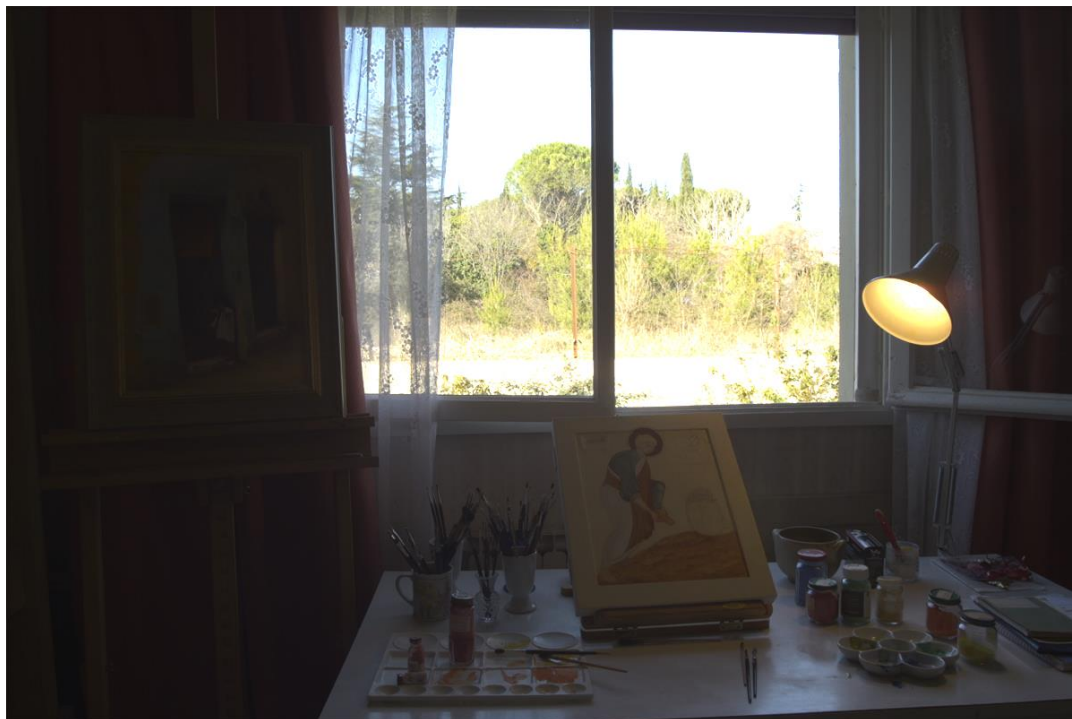
- Примеры:
 - Линейное сжатие
 - Отбрасывание предельных значений
 - Нелинейная коррекция
 - Комбинация методов
 - ...



Нелинейная коррекция (степень 0.3)

Глобальные операторы

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



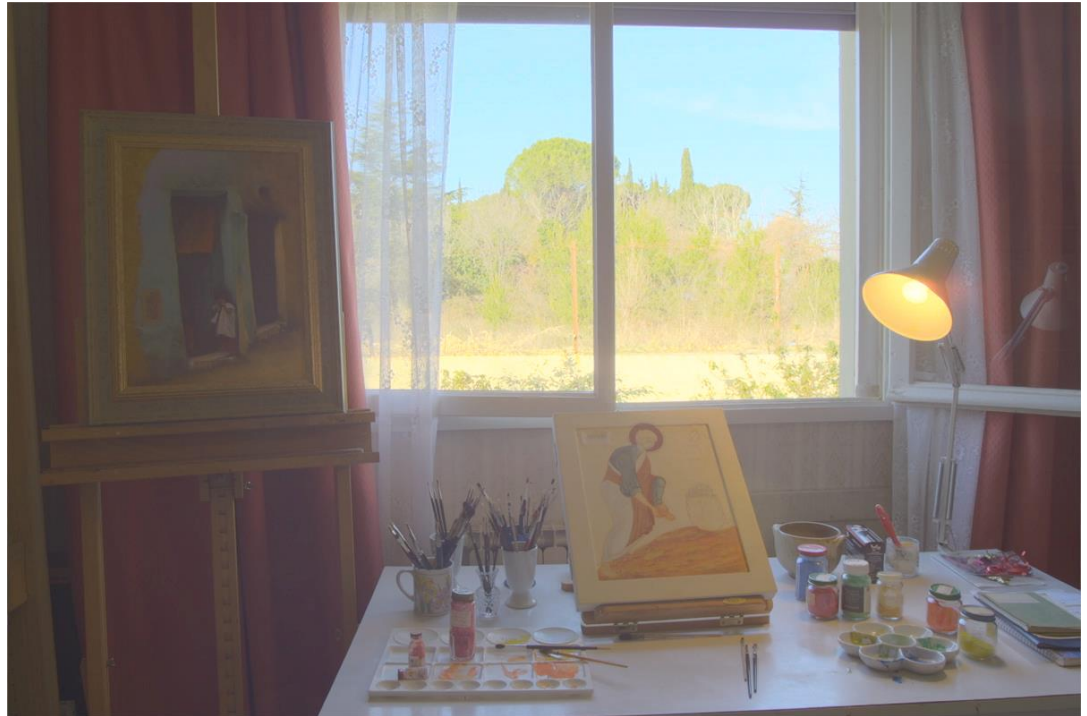
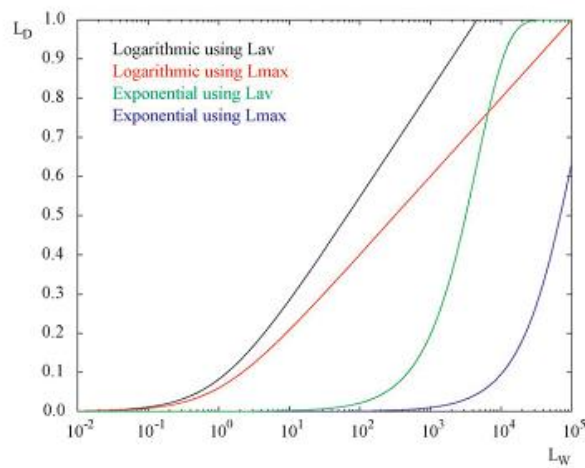
Отбрасывание 10% сверху
и последующая нелинейная
коррекция (степень 0.5)

Глобальные операторы

- Идентичная нелинейная кривая сжатия для всех пикселей изображения
- Высокая эффективность
- Проблемы с очень широким диапазоном
 -  Т.е. функция должна быть монотонно возрастающей
 -  Чем больше диапазон, тем больше значений нужно отобразить в 256 значений

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



Пространственно-зависимые операторы

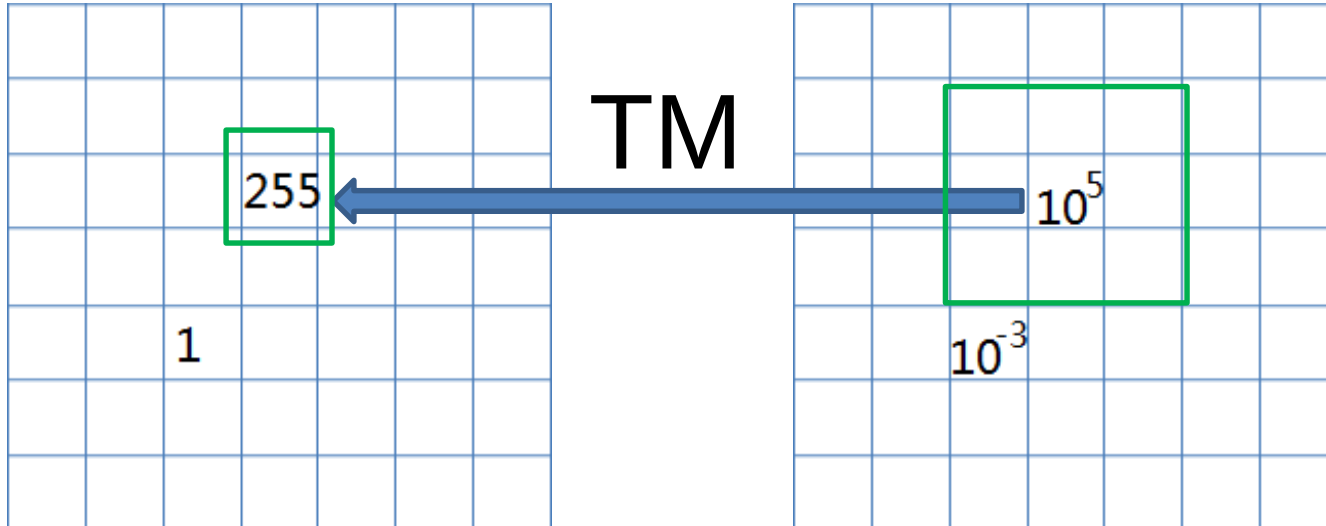
$$LDR(p_0) = TM(HDR(p \in P_w)),$$

$p_0 \in P$ — множество пикселей,

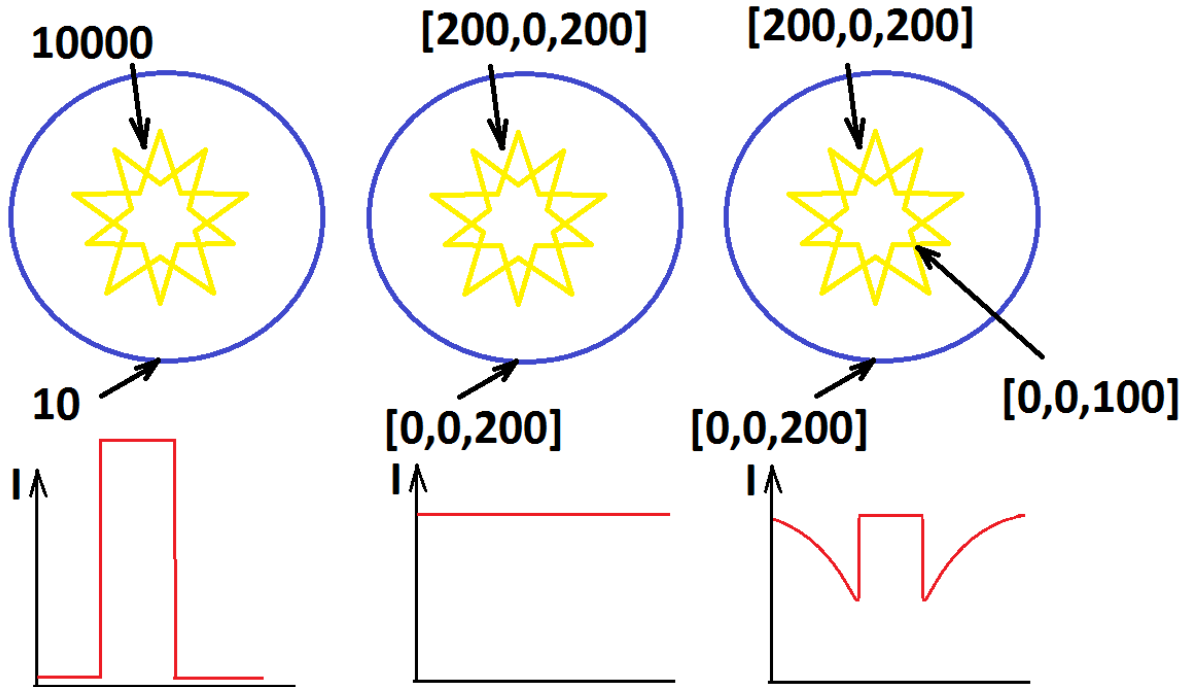
$P_w \in P$ — подмножество пикселей, включающее p_0

LDR

HDR



Общий подход локальных методов. Инвертирование контраста



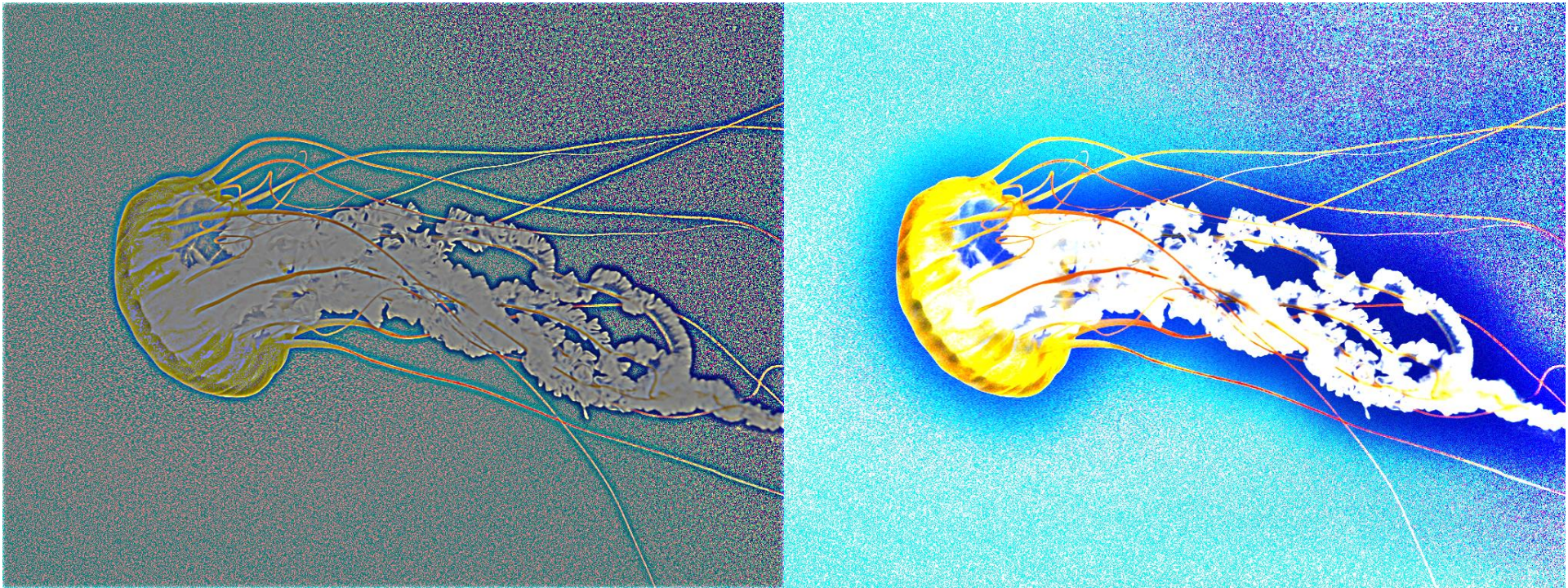
Общий подход локальных методов. Инвертирование контраста

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



Общий подход локальных методов. Инвертирование контраста

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



Влияние размера фильтра

w=3



w=12



w=24



w=51



Влияние коэффициента k

$K=1$



$K=2$



$K=3$



$K=4$



Photographic Tone Reproduction for Digital Images

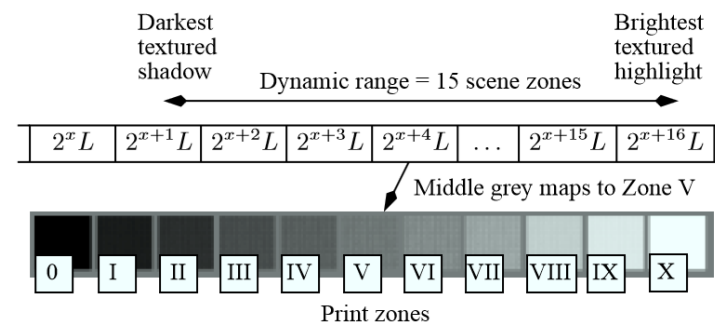
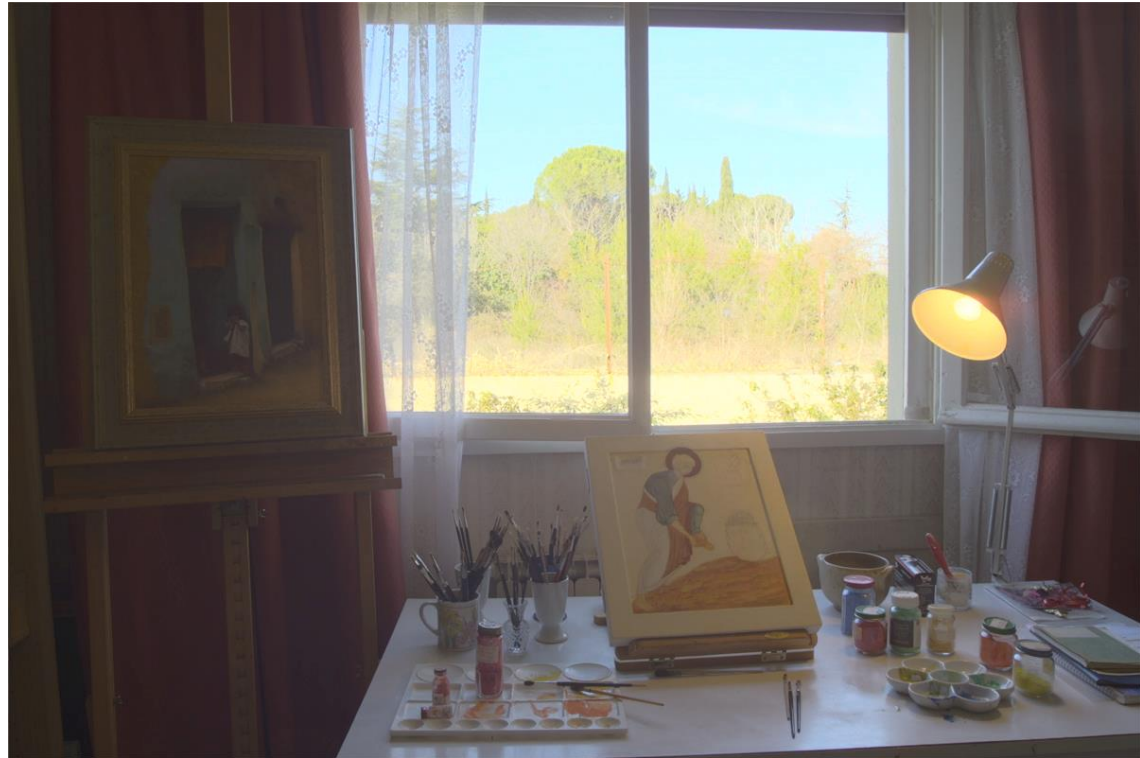
Photographic Tone Reproduction for
Digital Images

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

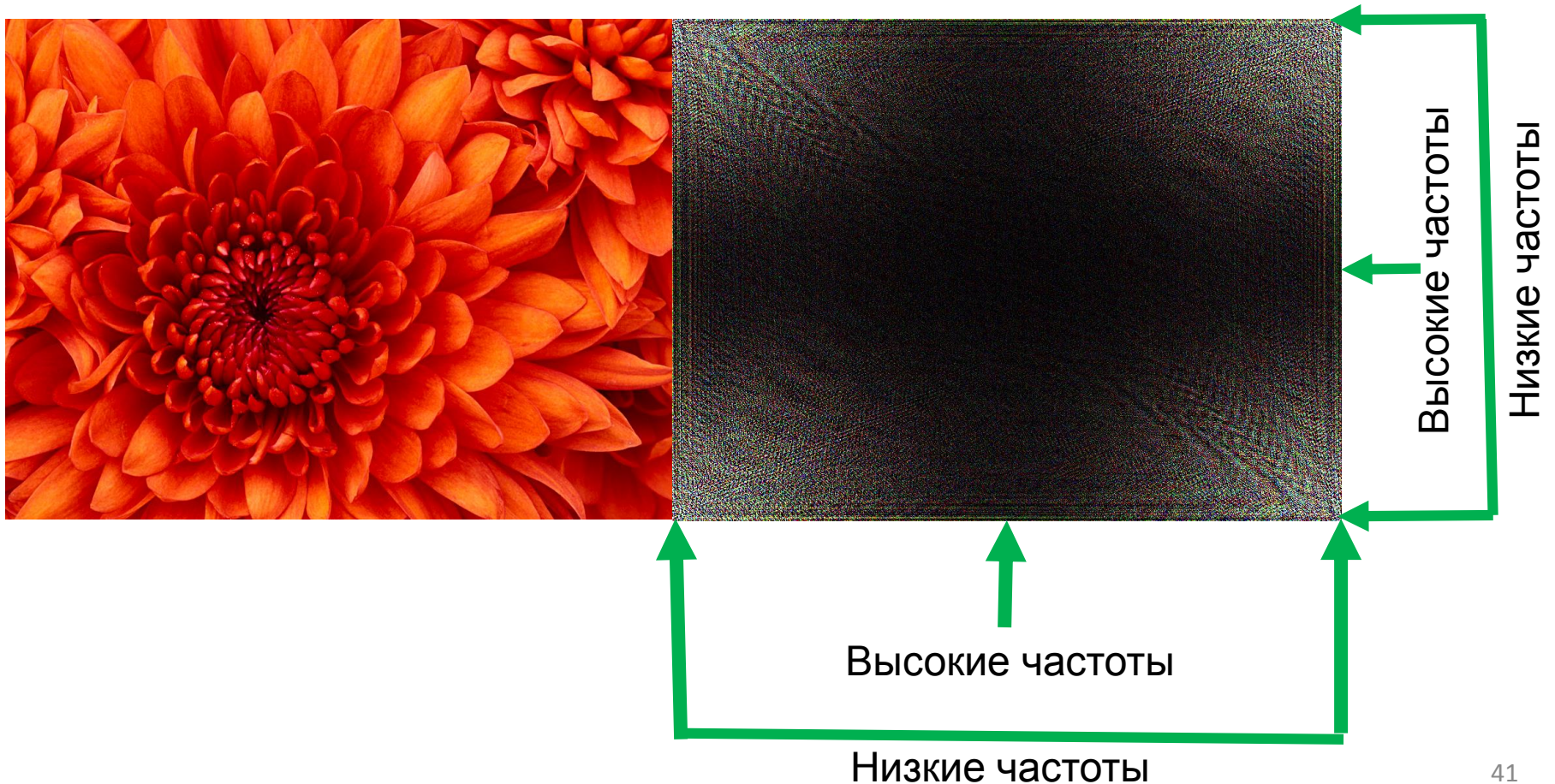


Общий подход градиентных и частотных методов

- 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

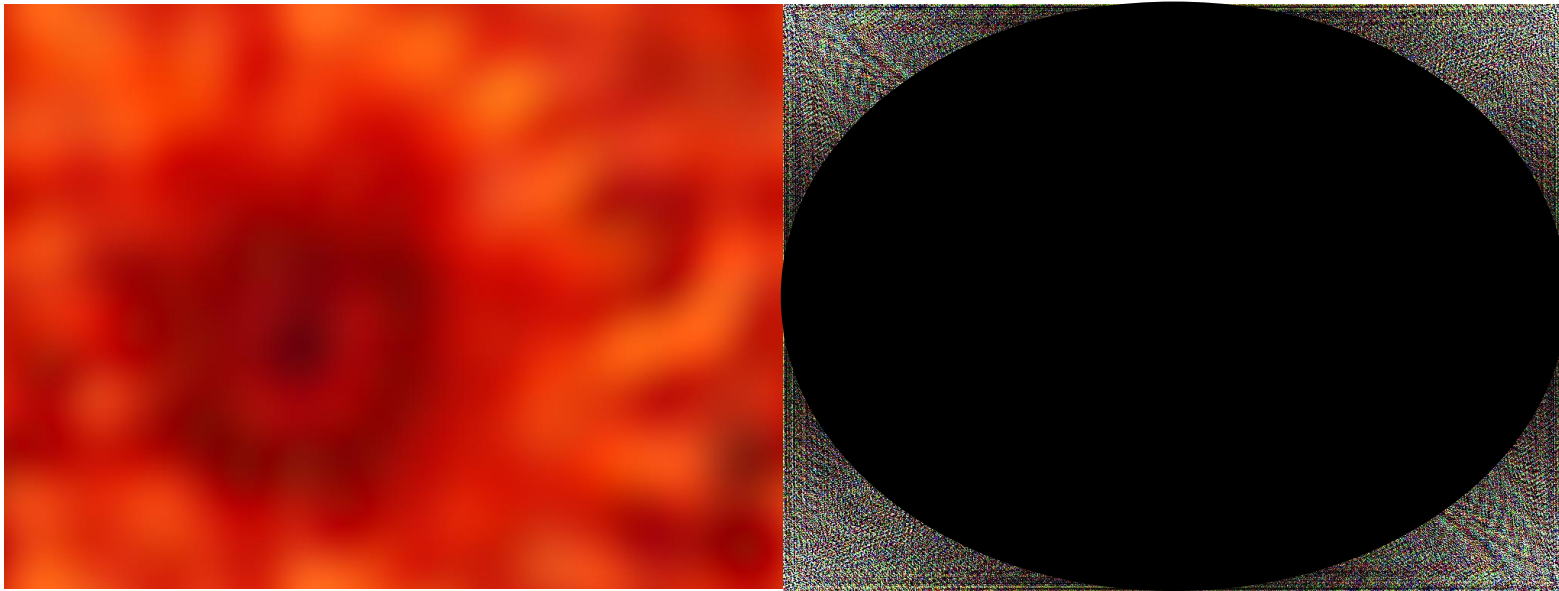
Частота изображения

- Двумерное преобразование Фурье

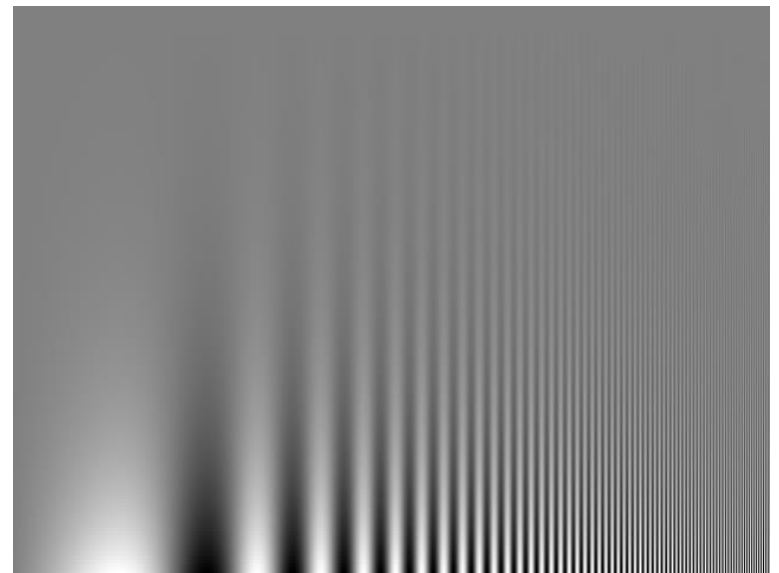


Частота изображения

- Двумерное преобразование Фурье



Пример работы с различными частотами изображения



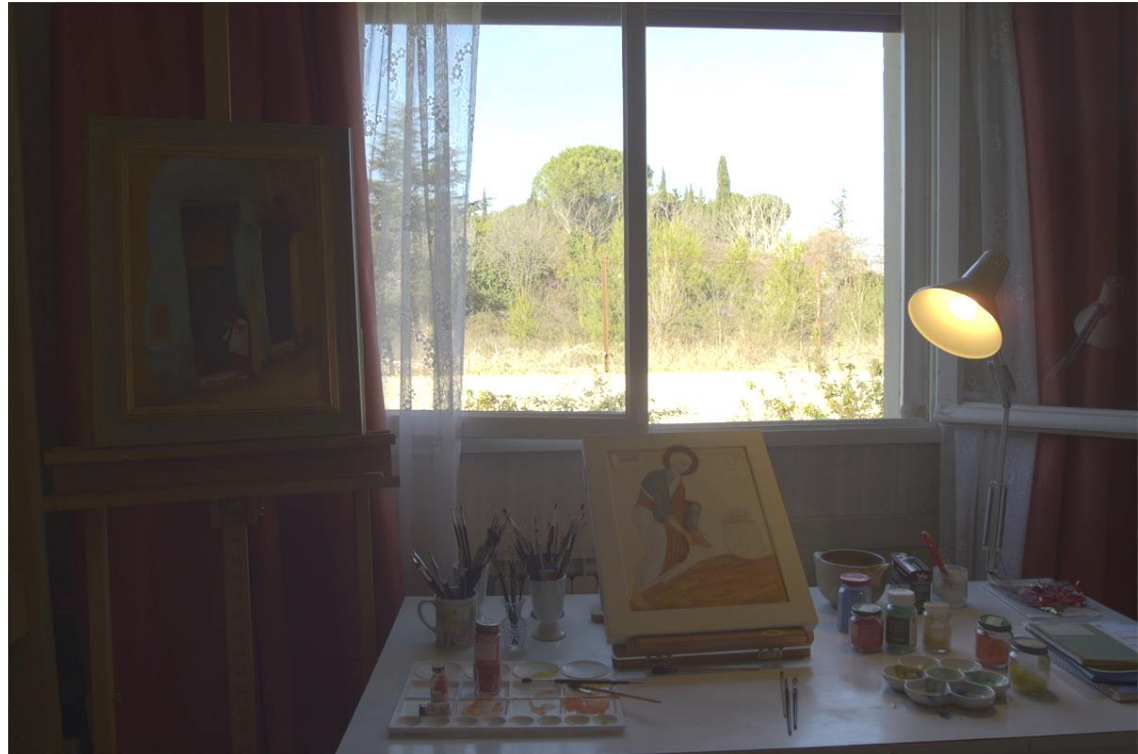
Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images

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

F. Durand and J. Dorsey

In ACM Transactions on Graphics, 2002

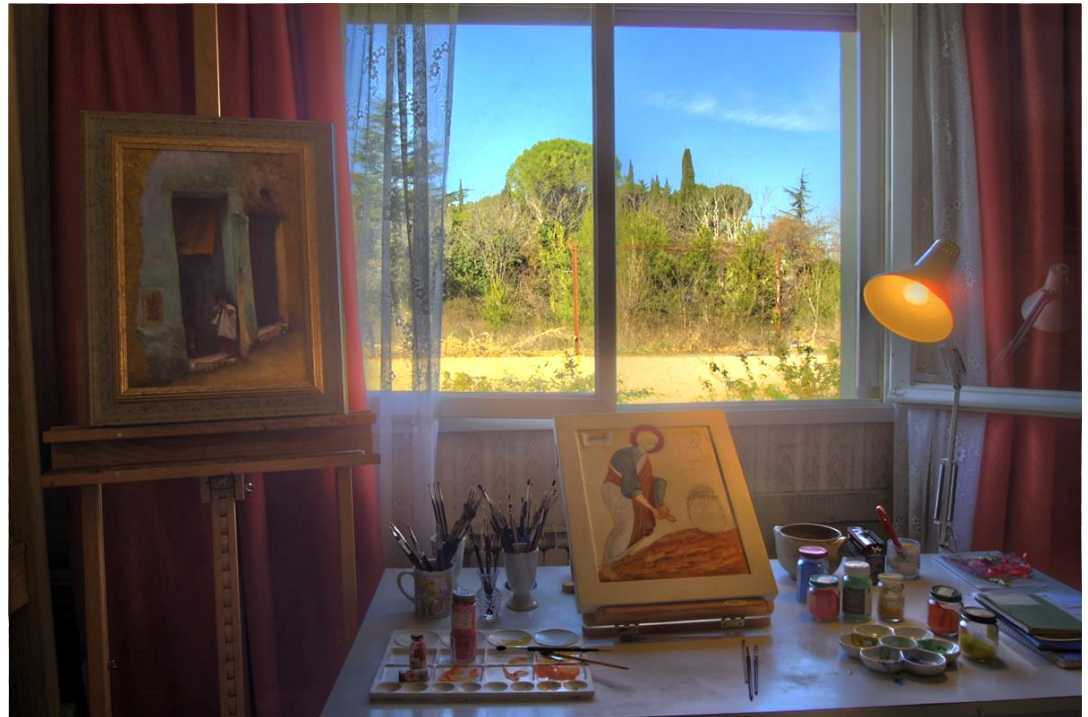
- 1) Преобразование RGB->Yxy (Input)
- 2) Применение билатерального фильтра, получили «освещенность» Base
- 3) Деление исходного изображения на «освещенность» Detail = Input / Base
- 4) Сжатие диапазона осуществляется за счет деления изображения (Base) до достижения нужного уровня контраста
- 5) Реконструкция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



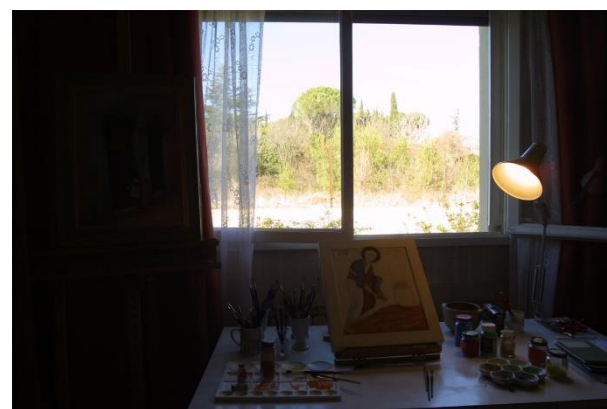
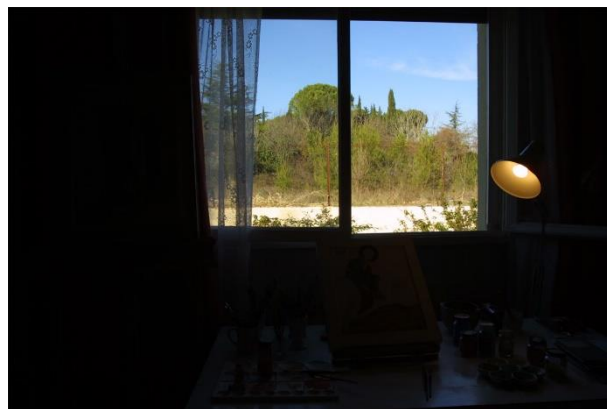
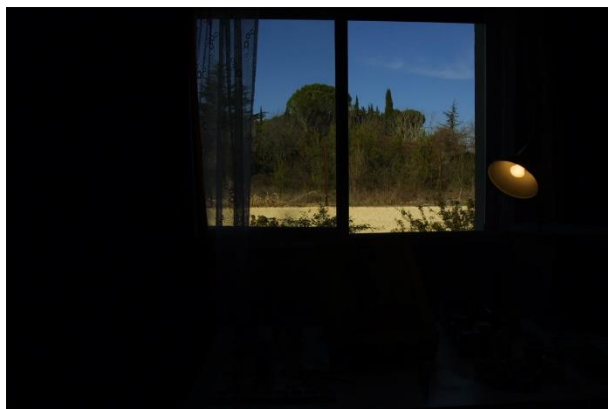
Gradient Domain High Dynamic Range Compression

Gradient Domain High Dynamic Range
Compression

R. Fattal, D. Lischinski, and M. Werman
In ACM Transactions on Graphics, 2002



Ещё раз: тестовое изображение



Еще раз: результаты работы разных операторов сжатия диапазона



План лекции

- Зачем нам нужны изображения широкого диапазона (HDR) и что это такое
- Отображение HDR
 - HDR дисплеи
 - Алгоритмы тональной компрессии (Tone mapping) HDR - > LDR
- Получение HDR-изображений
- Кодирование HDR-изображений
- Применение HDR для освещения сцены при визуализации
- Exposure Fusion

Способы получения HDR

Синтез изображений

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

Комбинирование LDR с разными выдержками

- Получение HDR с помощью обычных бытовых фотокамер

Аппаратура камер, прямое получение HDR-данных

- Требуется специальная аппаратура (дорогая)
- Очень перспективный путь

Получение HDR из набора фотографий с разными выдержками



Получение HDR из набора фотографий с разными выдержками

- Предполагаем, что отклик сенсоров камеры линейный по отношению к яркости излучения, попадающей на сенсоры
- $T_1=1\text{сек}$ $T_2=2\text{сек}$, рассмотрим пиксель P_{ij}
- $\Rightarrow P_{ij2} = 2 * P_{ij1}$
 - Необходимо знание экспозиции для каждой фотографии (фотоаппараты сохраняют в EXIF)
- $I_1 = P_{ij1} / T_1$
- $I_2 = P_{ij2} / T_2$
- В идеале $I_1 = I_2$ для P внутри передаваемого диапазона

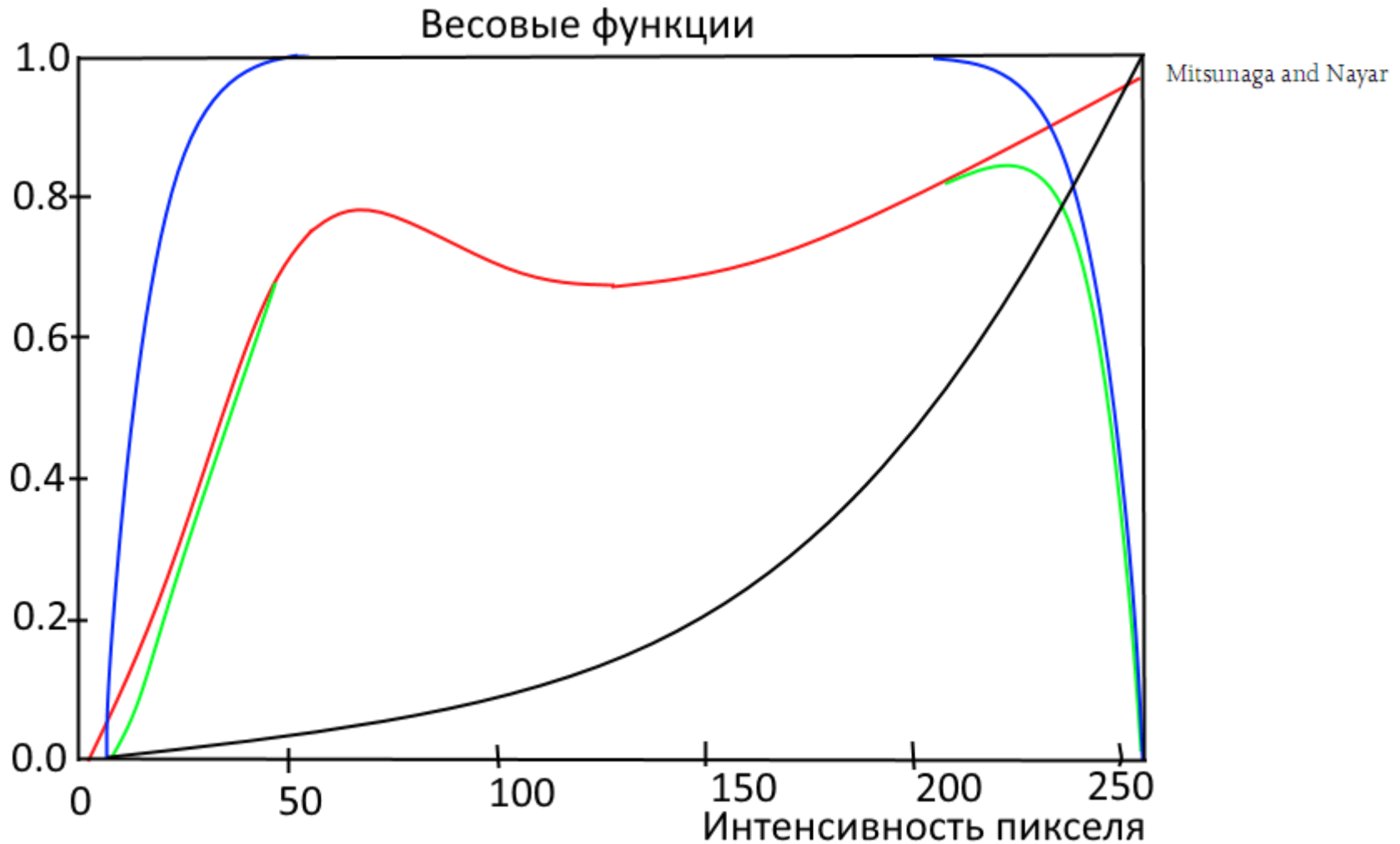
Общий алгоритм построения HDR из набора фотографий

- 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

Как усреднять пиксели?

- 0 и 255 – выбросить
- Остальные нужно смешать
- Желательно взять с бОльшим весом те пиксели, яркость которых соответствует диапазону наиболее хорошо передаваемых пикселей

Некоторые возможные функции смешивания



Результат



Чего не хватает?

- Кривая отклика камеры может не быть известна
 - Нужно уметь восстанавливать из изображений
- 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

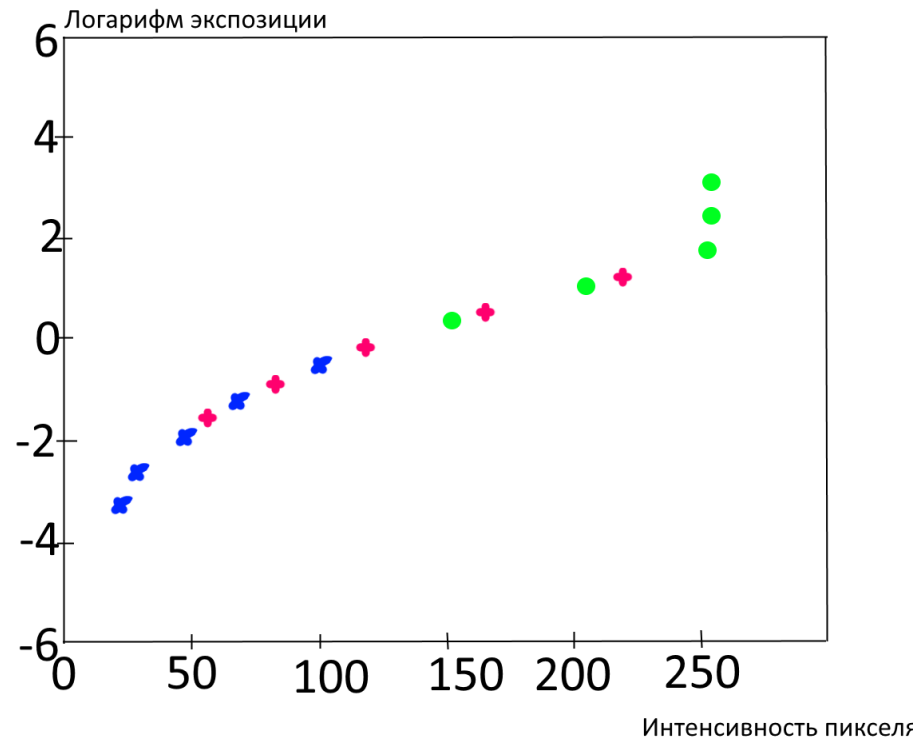
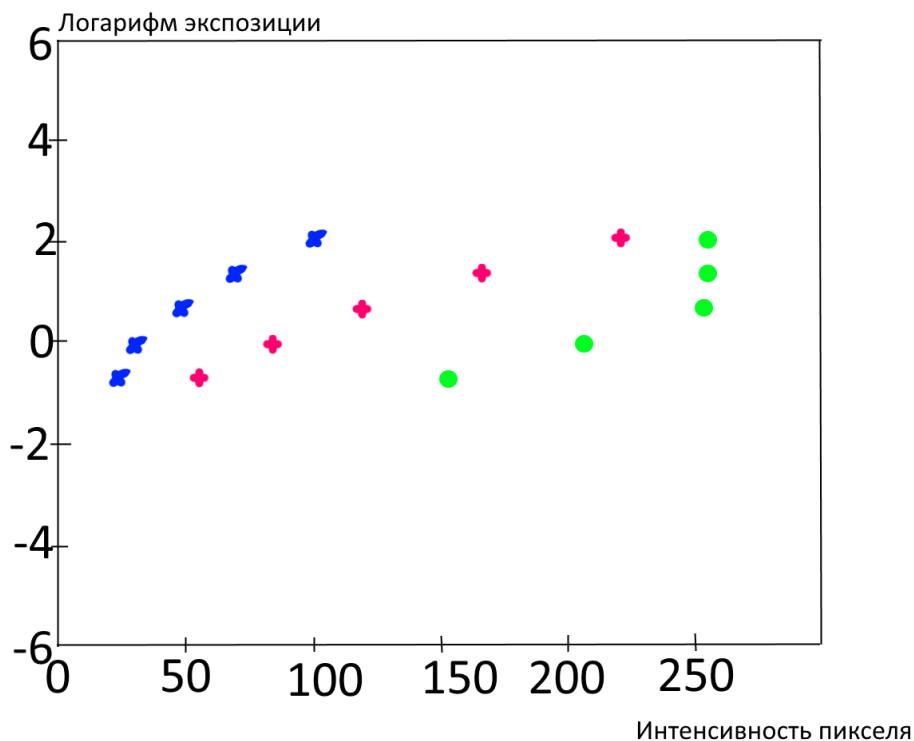
Восстановление кривой отклика камеры из изображений

- Можно полагаться на sRGB и считать гамму 2.2 кривой отклика камеры.
- Это наивно т.к. каждый производитель вносит изменения в кривую:
 - Скрывая шум
 - Увеличивая насыщенность
 - Увеличивая контраст
- Основная идея – каждый пиксель статической картинки с разными экспозициями представляет собой набор выборок кривой отклика камеры

Пример



- 3 пикселя, 5 экспозиций
- Линейная оптимизация среднеквадратичной ошибки



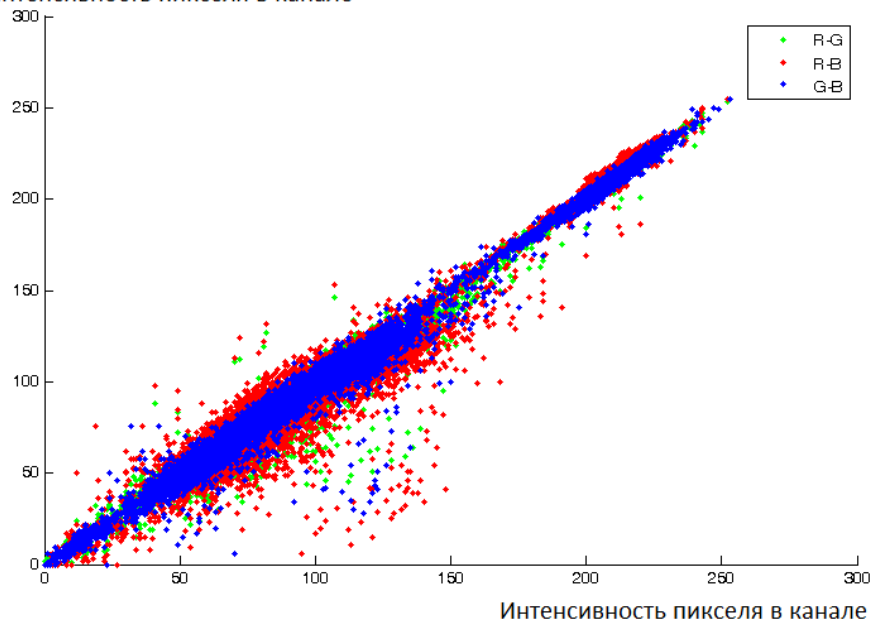
План лекции

- Зачем нам нужны изображения широкого диапазона (HDR) и что это такое
- Отображение HDR
 - HDR дисплеи
 - Алгоритмы тональной компрессии (Tone mapping) HDR - > LDR
- Получение HDR-изображений
- Кодирование HDR-изображений
- Применение HDR для освещения сцены при визуализации
- Exposure Fusion

Зависимость яркости и цвета

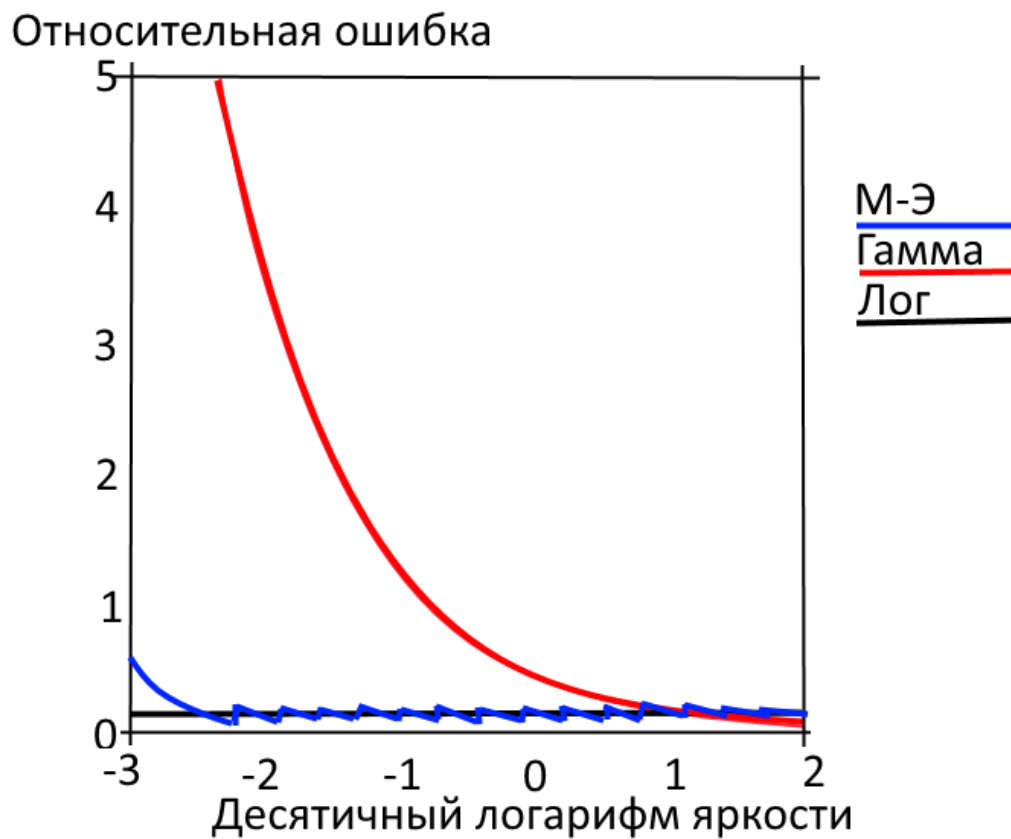
- Цвет отдельно
- Разброс меньше, чем по яркости
- Источники редко бывают цветными и насыщенными

Интенсивность пикселя в канале



Кодирование яркости

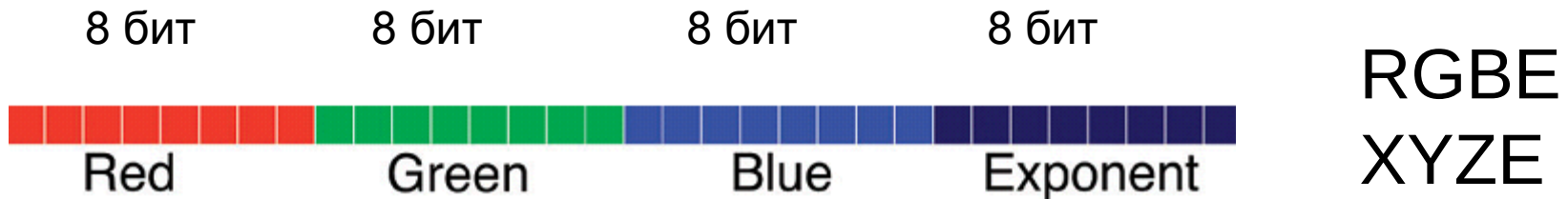
- Гамма-кодирование (степенное) $I' = I^{\gamma}$
- Логарифмическое кодирование $I' = k^I$
- Мантисса-экспонента (плавающая точка)



Формат HDR (PIC)

- Появился как часть программного пакета Radiance (1989)
- Самый простой и часто используемый формат
 - Де-факто: Аналог BMP для HDR

Формат HDR: Кодирование



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

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

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

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

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

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

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

Формат HDR: Сжатие

- Поддерживается RLE
- ~25% сжатие (1:1.3)
- Размер как у 24бит BMP

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.

Формат TIFF: LogLuv кодирование

- Идея – преобразовать в тройку: яркость + тон и квантовать яркость
- XYZ -> Luv

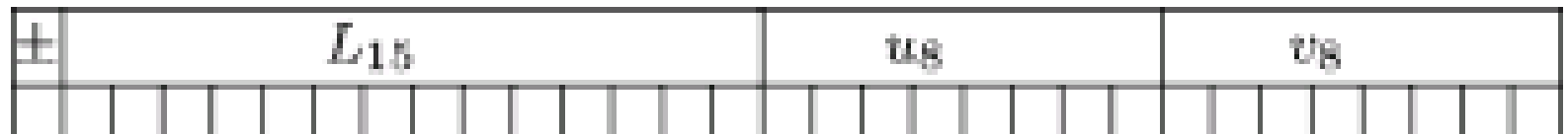
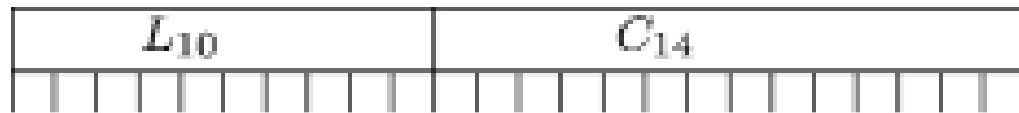
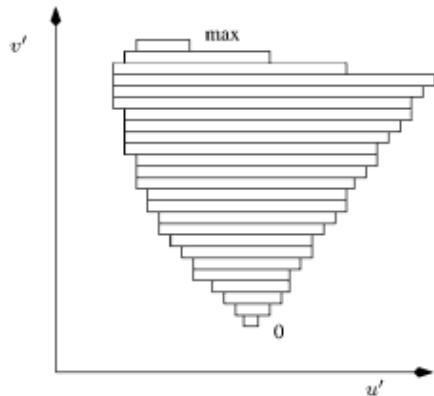
Формат TIFF: LogLuv кодирование

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

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

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

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

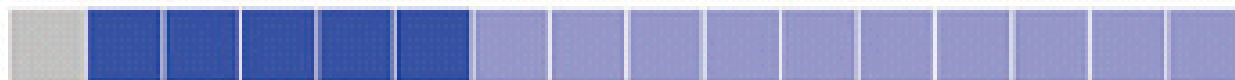
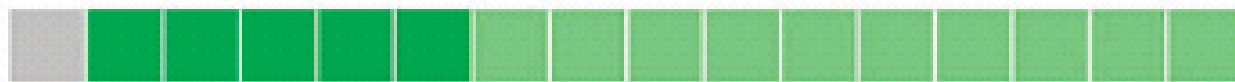
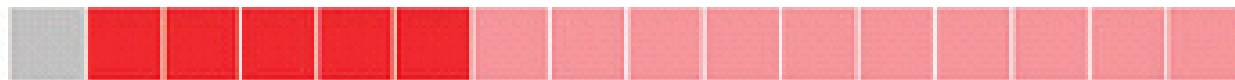


Формат OpenEXR

- 2002 Industrial Light and Magic
 - C++ библиотека (openexr.com)
- Разные форматы поддерживаются
 - 16-бит на канал
 - 24-бит на канал
 - 32-бит на канал

Формат OpenEXR: 16 бит кодирование

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



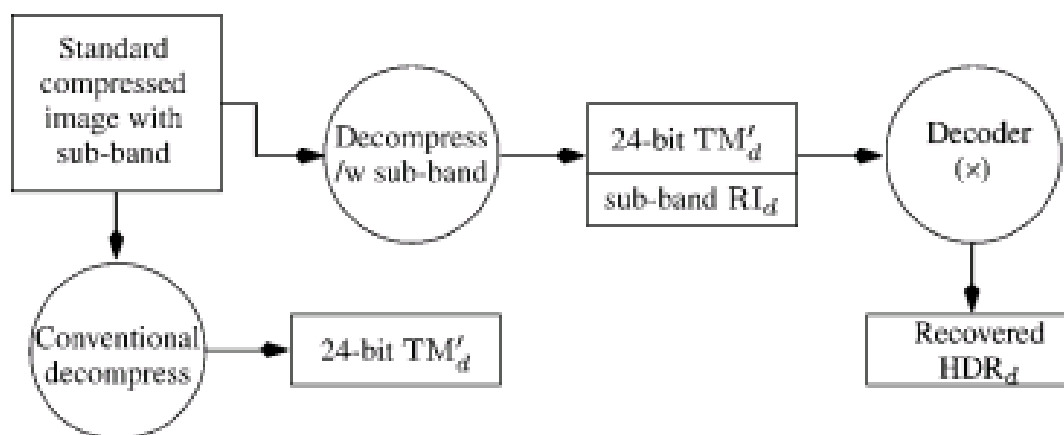
Sign Exponent

Mantissa

Формат OpenEXR: 16 бит кодирование

- Представляемые значения: 0,000061-65,504
- ~9 порядков (включая числа меньше 0,000061)
-  Шаг квантования <0,1%
 - Очень маленькая ошибка! Сравните: у HDR 1%
- Гибкий формат:
 - Сжатие (ZIP, PIZ)
 - PIZ – формат сжатия на основе вейвлетов
 - Произвольные каналы данных
 - Прозрачность и т.п.
 - Атрибуты и т.п.

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>)

План лекции

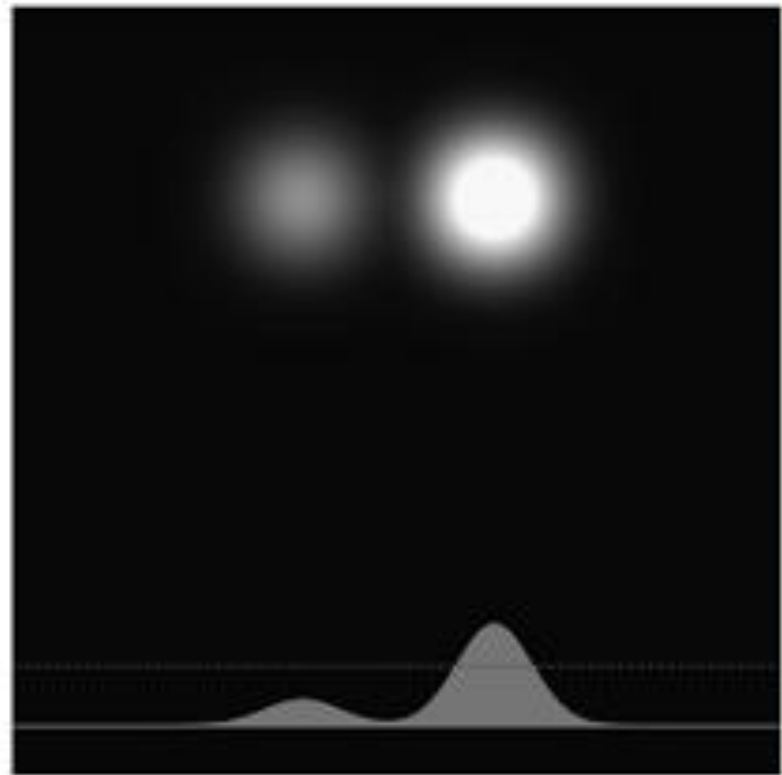
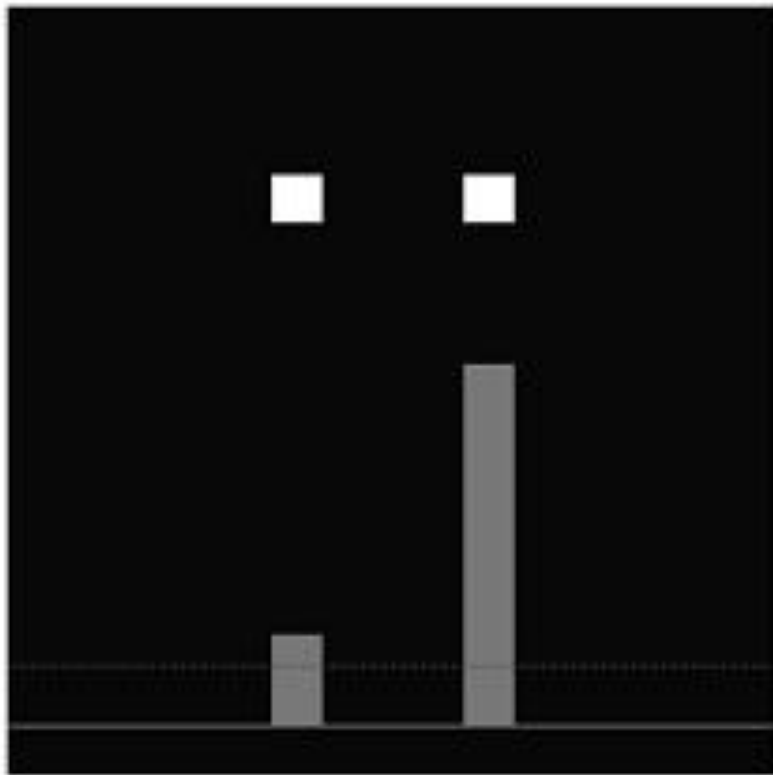
- Зачем нам нужны изображения широкого диапазона (HDR) и что это такое
- Отображение HDR
 - HDR дисплеи
 - Алгоритмы тональной компрессии (Tone mapping) HDR - > LDR
- Получение HDR-изображений
- Кодирование HDR-изображений
- Применение HDR для освещения сцены при визуализации
- Exposure Fusion

Применение HDR в визуализации

- Применение HDR-изображений для освещения
- Применяются различные виды панорам
 - Сферические
 - Цилиндрические
 - Кубические



Размытие LDR и HDR



Размытие LDR и HDR



(a)



(b)



Сравнение визуализации

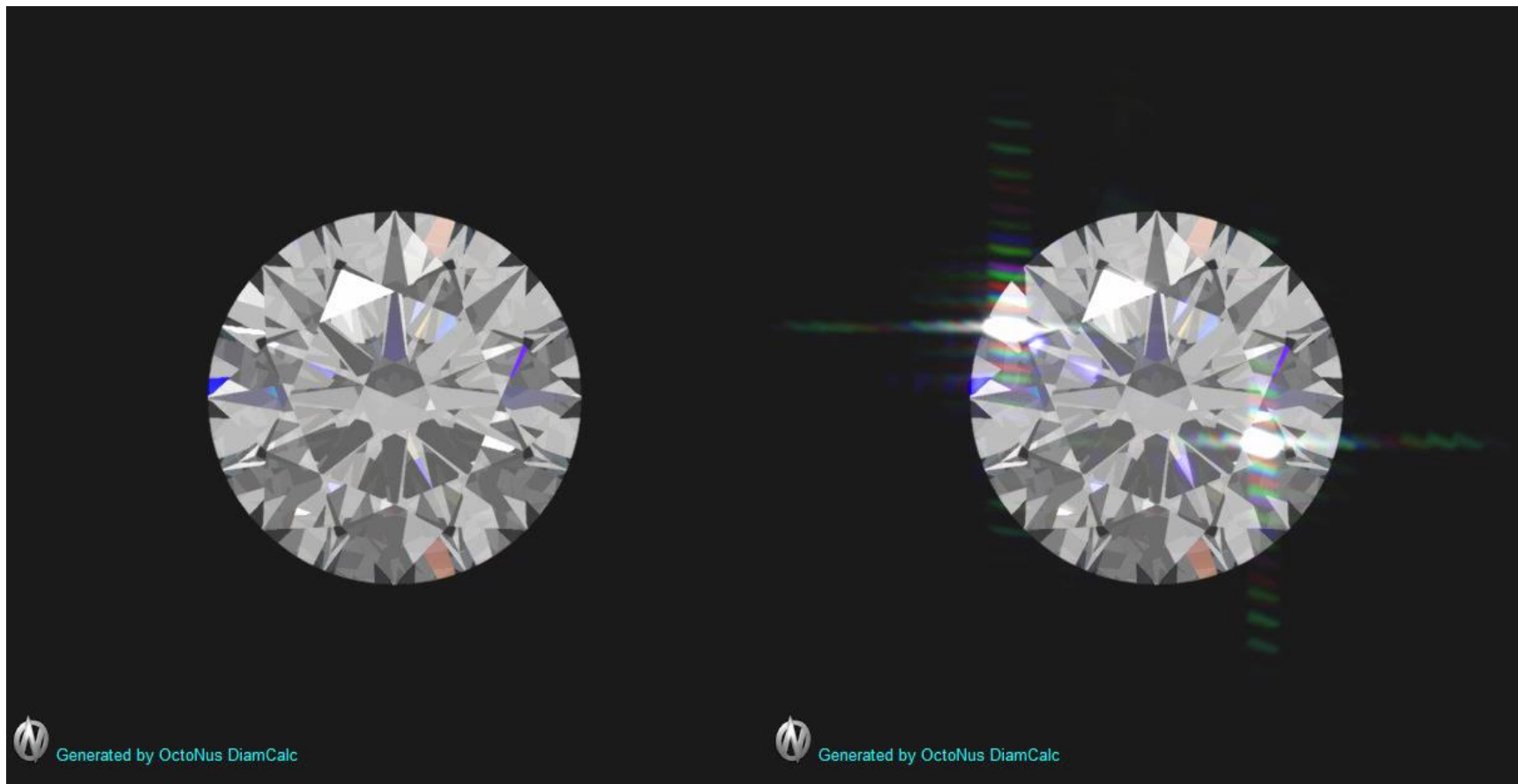
Только солнце



HDR-панорама



Сравнение визуализации



План лекции

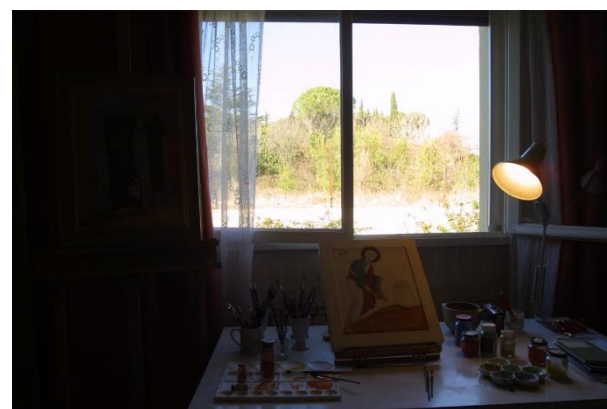
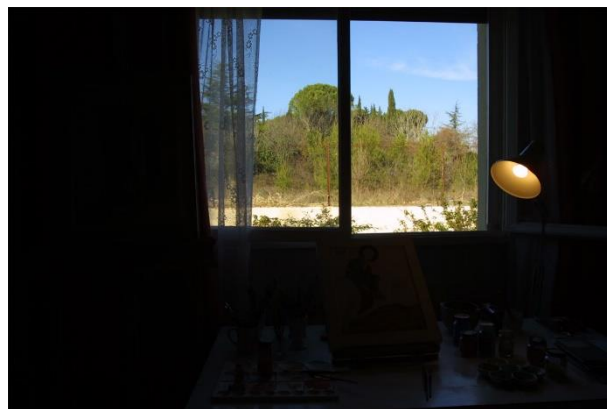
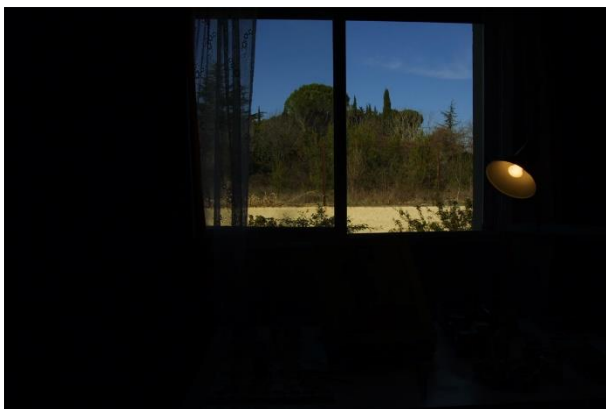
- Зачем нам нужны изображения широкого диапазона (HDR) и что это такое
- Отображение HDR
 - HDR дисплеи
 - Алгоритмы тональной компрессии (Tone mapping) HDR - > LDR
- Получение HDR-изображений
- Кодирование HDR-изображений
- Применение HDR для освещения сцены при визуализации
- Exposure Fusion

Exposure Fusion

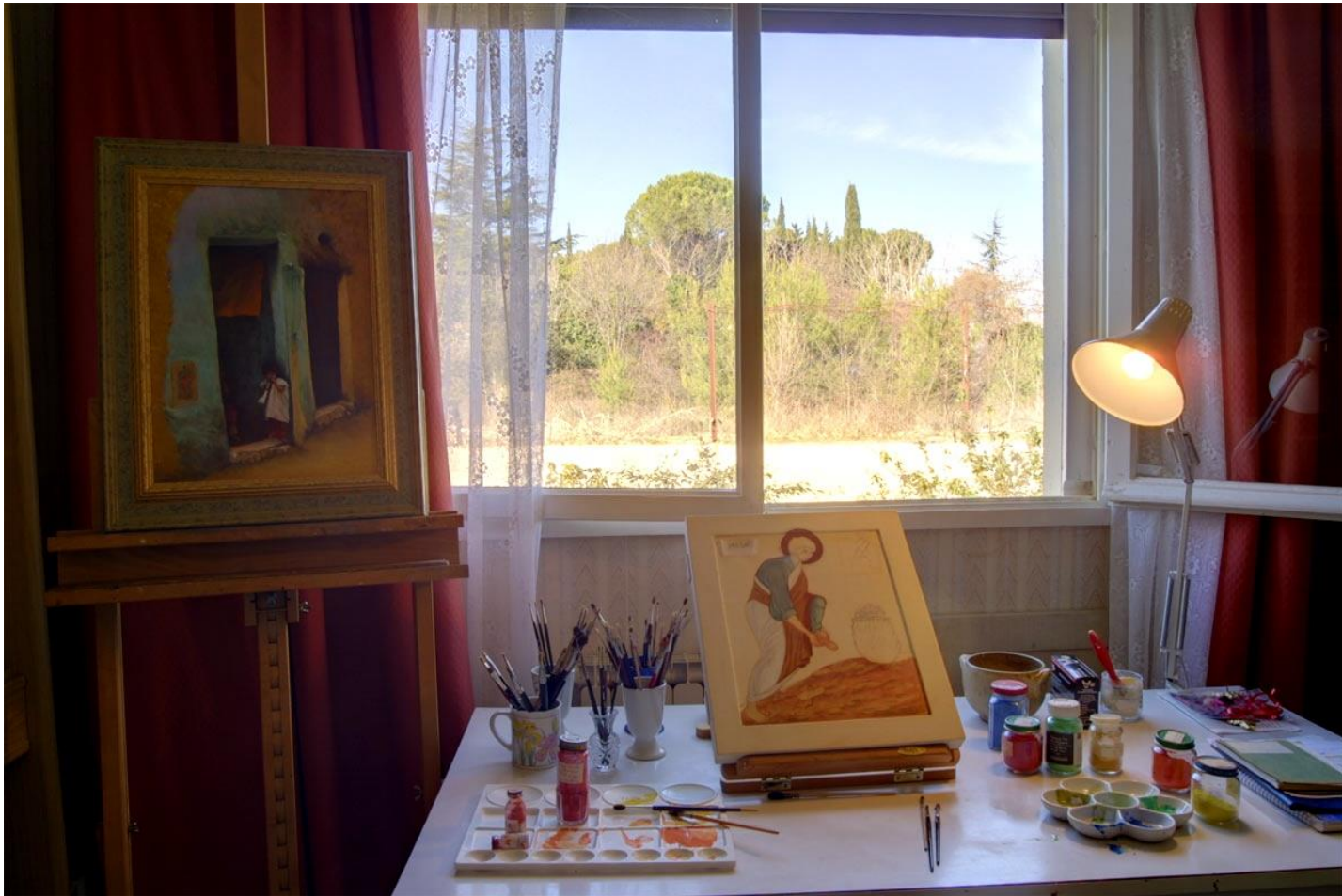
- Техника смешения фотографий с разной выдержкой без построения HDRI
- Используют фотографы в качестве альтернативы ТМ
- Выделяют признаки (насыщенность, четкость, ...)
- Получают веса
- Смешивают изображения

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

Тестовое изображение



Exposure Fusion Result



Exposure Fusion vs Tone Mapping

Tone Mapping Result



Exposure Fusion Result



Литература

- **High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting** Erik Reinhard; Greg Ward; Sumanta Pattanaik; Paul Debevec

