

Формирование High-Dynamic Range Image по цифровым фотографиям*

Ying Wang¹, И.С. Потемин², Д.Д. Жданов², Xu-Yang Wang¹
 1334772745@qq.com | ipotemin@yandex.ru | ddzhdanov@mail.ru | 294880557@qq.com
 China, ¹Changchun University of Science and Technology;
 Санкт-Петербург, Россия, ²Университет ИТМО

В ряде современных приложений, таких как фотореалистичная визуализация, виртуальное прототипирование, игровые и тренажерные компьютерные системы и т.п., используются изображения с повышенным динамическим диапазоном – так называемые High Dynamic Range Images (HDRI), содержащие реальные значения яркостей фотографируемых объектов. Для получения HDRI из обычных цифровых фотографий камера должна быть откалибрована. В статье предлагается способ калибровки камеры, основанный на использовании ясного неба как стандартного источника света и применении модели неба МКО для вычисления его яркости в заданное время и в заданном географическом положении. Рассматриваются алгоритмы и программная реализация методов калибровки и восстановления HDRI. Статья иллюстрируется примерами HDRI, восстановленными по цифровым фотографиям.

Ключевые слова: Изображения с повышенным динамическим диапазоном, модель неба МКО, цифровая фотография, калибровка камеры, восстановление яркости.

Generation of High-Dynamic Range Image from digital photo*

Ying Wang¹, I.S. Potyemin², D.D. Zhdanov², Xu-Yang Wang¹
¹Changchun University of Science and Technology;
²ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Many modern applications, such as photorealistic rendering, virtual prototyping, game and exercise computer systems and the like, use the High Dynamic Range Images (HDRI), containing the actual values of brightness of objects photographed. To get HDRI from conventional digital photo the camera should be calibrated. The paper proposes a method for the camera calibration, based on the use of the clear sky as a standard light source and application of CIE sky model for calculating the brightness at a desired time and in a given geographical location. Also the article considers the algorithms and software implementation of the calibration method and the method of reconstruction of real luminance values. A number of HDRI examples reconstructed from ordinary digital photo illustrate the article.

Keywords: High-Dynamic Range Imaging, CIE sky model, HDRI, digital photo, camera calibration, luminance reconstruction.

Введение

Обычные цифровые фотокамеры, как любительские, так и профессиональные позволяют формировать изображение с динамическим диапазоном ограниченным 256-ю уровнями яркости. Очевидно, что такой динамический диапазон не в состоянии отразить на порядок более широкий диапазон яркостей реальных сцен. Поэтому задача формирования изображений с повышенным диапазоном яркостей или, иначе говоря, High-Dynamic Range Images (HDRI) является весьма актуальной. HDRI воспроизводит яркость реальной сцены. Такие изображения могут быть использованы во многих современных приложениях, таких как фотореалистичная визуализация, специальные эффекты в кино-

съемке [3], игровые и тренажерные компьютерные системы, виртуальное прототипирование и т.д.

Задача преобразования обычного цифрового изображения с 256-ю уровнями яркости в HDRI имеет разные решения. Например, Mann и Picard [6] использовали линейную функцию для имитации кривой отклика; Debevec и Malik [1] использовали ряд изображений с точной экспозицией; Mistsunaga и Naugar [5] применили полиномиальное приближение для построения кривой отклика. В любом случае, кривая отклика должна быть приведена к единичному времени экспозиции при постоянном значении относительного отверстия, а затем откалибрована для стандартного источника света.

В данной статье предлагается способ калибровки камеры, основанный на использовании ясного неба в качестве стандартного источника света и применении модели неба МКО [7] для вычисления его яркости в заданное время и в заданном географическом положении. Предлагаемый способ может быть применен к любой обычной цифровой камере, чтобы преобразовать обычное изображение в изоб-

Работа выполнена при частичной государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), грантом РФФИ № 16-01-00552. Работа опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 16-07-20482.

ражение с расширенным динамическим диапазоном. Единственным требованием к камере является обеспечение возможности сохранения значений относительного отверстия и времени экспозиции. В статье рассматриваются базовые алгоритмы получения значений реальной яркости и соответствующая программная реализация алгоритмов. Приведены примеры изображений с широким динамическим диапазоном, реконструированным из обычных цифровых фотографий.

Связь обычного цифрового изображения и реальной яркости объекта съемки

Типичная ПЗС матрица, используемая в цифровых фотокамерах, представлена на рис. 1. Каждая ячейка матрицы включает в себя светочувствительный элемент (фотодиод), цветной фильтр и микролинзу. Микролинза собирает падающий на нее свет и фокусирует его на поверхность фотодиода. Для разделения падающего света по цветам между микролинзой и поверхностью фотодиода устанавливается цветной светофильтр: красный (R), зеленый (G) или синий (B).

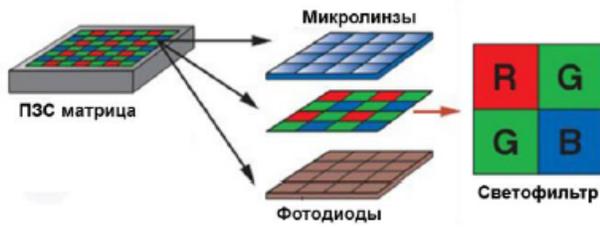


Рис. 1: Структура типичной ПЗС матрицы

Свет, прошедший через цветной светофильтр, преобразуется фотодиодом в электрический сигнал, который после соответствующей обработки участвует в формировании пикселя изображения в виде трех чисел, определяющих уровень яркости трех составляющих цвета в диапазоне от 0 до 255.

Связь между реальной освещенностью отдельного элемента матрицы и значением соответствующего пикселя изображения, как правило, не линейна и определяется функцией отклика конкретной ПЗС матрицы.

$$Z(ix, iy) = f(X), \quad (1)$$

где: (ix, iy) – индексы (координаты) пикселя; X – экспозиция. Значение экспозиции определяется следующим выражением

$$X = E(ix, iy) \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где Δt – время экспозиции; $E(ix, iy)$ – освещенность ячейки матрицы (пикселя) с индексом (ix, iy) .

Поскольку фотодиоды имеют разную чувствительность для разных спектральных диапазонов, то

функция отклика для светофильтров различных цветов также будет разной:

$$\begin{aligned} Z_R(ix, iy) &= f_r(X), \\ Z_G(ix, iy) &= f_g(X), \\ Z_B(ix, iy) &= f_b(X), \end{aligned} \quad (3)$$

где $f_r(X)$, $f_g(X)$, $f_b(X)$ – функции отклика фотодиода ПЗС матрицы для красного, зеленого и синего светофильтра соответственно.

Зная функции отклика, яркость можно определить следующим образом

$$L = f_r(R)CIE_R + f_g(G)CIE_G + f_b(B)CIE_B, \quad (4)$$

где: CIE_R , CIE_G и CIE_B – коэффициенты определяющие зависимость между радиометрическим и фотометрическим значениями. Реальная яркость R , G и B каналов определяется выражениями 5, 6 и 7 соответственно:

$$R_{HDRI} = \frac{L \cdot R}{R \cdot CIE_R + G \cdot CIE_G + B \cdot CIE_B}, \quad (5)$$

$$G_{HDRI} = \frac{L \cdot G}{R \cdot CIE_R + G \cdot CIE_G + B \cdot CIE_B}, \quad (6)$$

$$B_{HDRI} = \frac{L \cdot B}{R \cdot CIE_R + G \cdot CIE_G + B \cdot CIE_B}. \quad (7)$$

Для определения кривой отклика необходимо провести калибровку цифровой камеры по какому-либо стандартному источнику света с известной яркостью. Поиск стабильного источника света, и его калибровка по яркости создают отдельную и довольно непростую задачу. Поэтому, в нашем случае в качестве такого источника мы берем яркость модели неба МКО [7]. Для проведения такой калибровки нам необходимо сделать несколько снимков с разным временем экспозиции. Кроме того, должны быть известны географические координаты положения камеры и объекта съемки, а также конкретное время суток в которое проводится съемка.

Эксперимент

В данном случае фотокамера была расположена на набережной Невы, а в качестве объекта съемки был выбран шпиль собора Петропавловской крепости, так как его высота и географические координаты точно известны. Относительное положение камеры и объекта съемки представлены на рис. 2.

Устанавливаем камеру на штатив и регулируем высоту положения камеры таким образом, чтобы она находилась в одной горизонтальной плоскости с основанием собора. Для определения географических координат камеры и расстояния между камерой и объектом съемки используем google карты. В нашем случае расстояние от камеры до основания

башни составило 208.6 метра. Высота шпиля башни – 123.2 метра. Съемку проводим в безоблачную погоду первого января 2016 года.

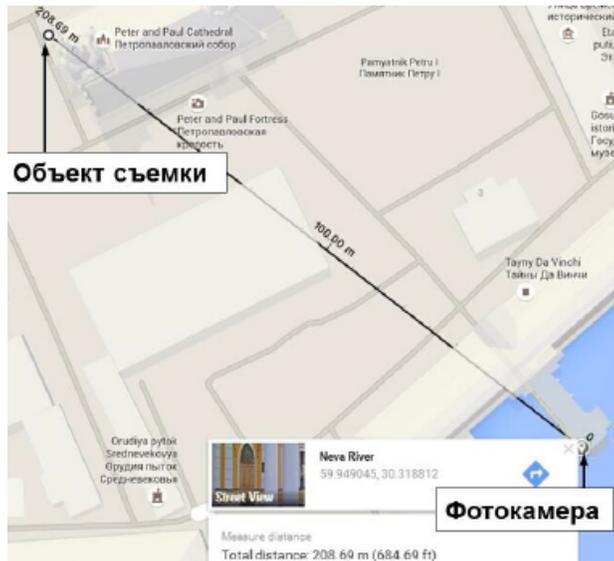


Рис. 2: Место проведения съемки

Для съемки использовалась фотокамера Canon EOS 600D. Были сделаны три серии снимков в разное время дня: 12:36, 14:00 и 15:10. Все три серии снимков были сделаны при постоянном фокусном расстоянии $f^* = 18\text{мм}$, с относительным отверстия $1:5.6$ и с фиксированной чувствительностью ISO 200. Разрешение матрицы: 5184 x 3456 пикселей. Каждая серия снимков делалась для фиксированного набора времени экспозиции: 1/4000, 1/2500, 1/1000, 1/800, 1/640 секунды. Рис. 3а, 3б и 3в демонстрирует фотографии, сделанные в 12:36 с временами экспозиции 1/4000, 1/2500 и 1/1000 соответственно.

На рис. 3в стрелкой указана анализируемая область, обозначенная красным кружком. Цифрами указано относительное распределение яркости в данной области.

На рис. 4 показана та же самая область, но уже в компьютерной модели воспроизводящей условия освещения согласно модели неба МКО для соответствующих географических координат, времени года и времени суток.

После того как сделаны снимки с разным временем экспозиции и получены соответствующие HDR изображения, синтезированные с использованием модели неба МКО строится функция отклика. Из снимков сделанных цифровой фотокамерой берутся попиксельно значения R , G и B в диапазоне от 0 до 255, а из синтезированных изображений, для того же набора пикселей, берутся значения яркости, рассчитанные в абсолютных единицах.

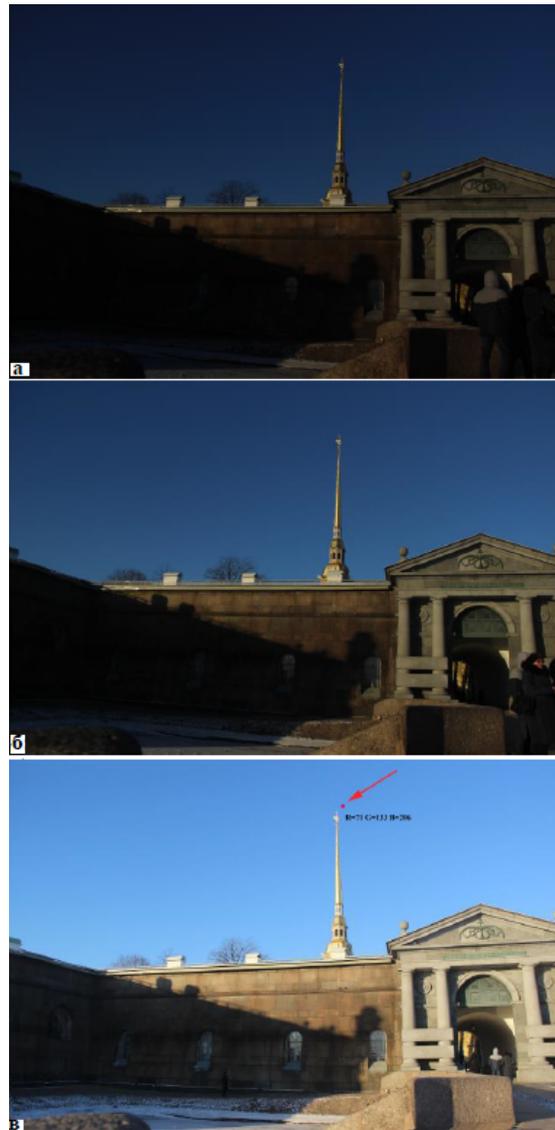


Рис. 3: а) Снимок с экспозицией 1/4000 сек. б) Снимок с экспозицией 1/2500 сек. в) Снимок с экспозицией 1/1000 сек.

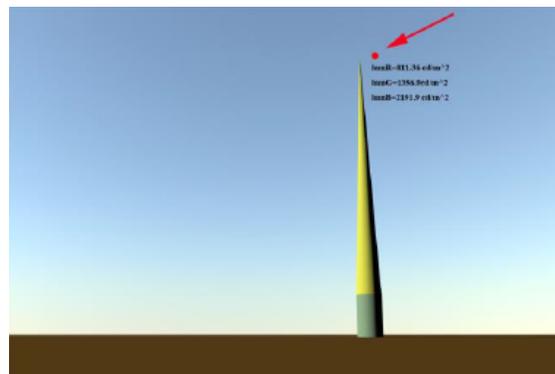


Рис. 4: Синтезированное изображение с использованием модели неба МКО

На графике, показанном на рис. 5, представлены функции отклика для R , G и B каналов. По оси абсцисс отложены значения относительных яркостей в диапазоне от 0 до 255, а по оси ординат – экспозиции, рассчитанные по формуле (2). Массив точек для построения графика выбирается в области ясного неба произвольно для разного времени суток и времени экспозиции.

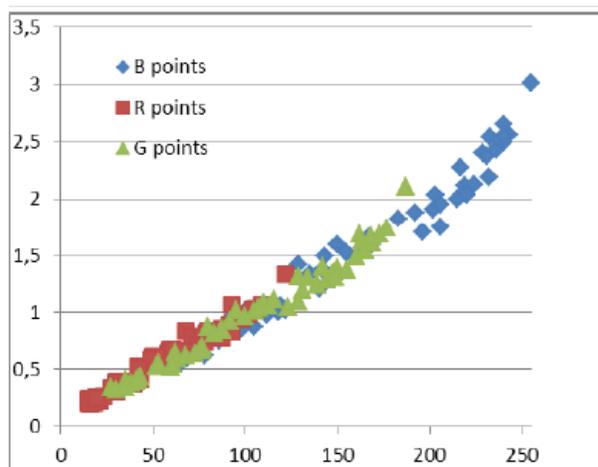


Рис. 5: Функция отклика

Как видно из рис. 5, для данной фотокамеры, функции отклика R , G и B каналов примерно совпадают. В этом случае мы можем усреднить значения для трех каналов, чтобы построить одну кривую отклика используя метод наименьших квадратов.

Сравнение результатов

В таблице 1 представлены результаты сравнения усредненной по трем каналам яркости произвольных пикселей, восстановленного по цифровой фотографии HDRI с соответствующими значениями яркости, полученными из компьютерной модели неба МКО.

Из таблицы видно, что средняя ошибка метода составляет 12%. Используя полученную ранее (при ясном небе) функцию отклика можно рассчитать реальные значения яркости для произвольного снимка, сделанного той же самой камерой. На рис. 6 представлена цифровая фотография, сделанная такой же камерой, на том же месте, но в другое время и при наличии облачности. HDRI, восстановленное по этой фотографии, и по определенной ранее функции отклика, представлено на рис. 7.

Очевидно, что ошибка 12% не влияет существенным образом на визуальное восприятие синтезированного изображения и исходной фотографии.

Координаты пикселя	Тип изображения	Средняя яркость, кд/м ²	Относительная ошибка
(3096, 504)	HDRI	1196	9%
	Модель	1323	
(2096,304)	HDRI	1061	14%
	Модель	1242	
(3384,270)	HDRI	1115	12%
	Модель	1269	
(2894,199)	HDRI	1075	11%
	Модель	1212	
(2596,600)	HDRI	1159	12%
	Модель	1330	
(2196,400)	HDRI	1085	14%
	Модель	1266	
(3452,200)	HDRI	1103	12%
	Модель	1254	
(3560,250)	HDRI	1124	12%
	Модель	1281	
(1899,432)	HDRI	1085	16%
	Модель	1292	
(4001,445)	HDRI	1198	15%
	Модель	1412	

Таблица 1. Сравнение яркости в полученном HDRI и компьютерной модели неба МКО

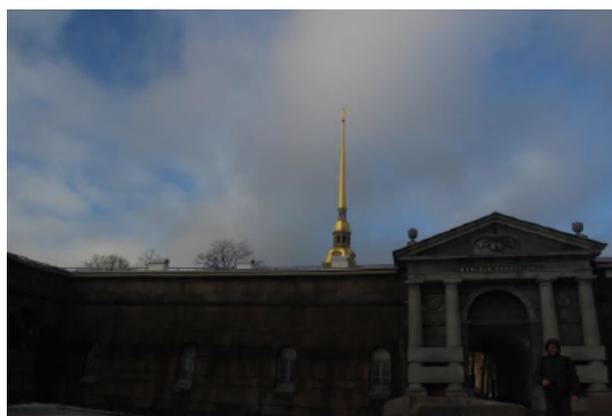


Рис. 6: Исходное изображение (снимок)



Рис. 7: Синтезированное HDR изображение

Заключение

Разработан метод калибровки цифровой фотокамеры и восстановления изображения с расширенным динамическим диапазоном (HDRI) из изображений, полученных с помощью обычной цифровой фотокамеры. Разработанные программные решения позволяют получать изображения в реальных яркостях фотографируемого объекта с относительной ошибкой порядка 12%, что позволяет использовать данный метод в таких приложениях как фото-

реалистичная визуализация, виртуальное прототипирование, игровые и тренажерные компьютерные системы и т.п.

Литература

- [1] Debevec P.E., Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH97, Los Angeles, 1997, 369-378.
- [2] Aggarwal M., Ahuja N. Split aperture imaging for high dynamic range. In: Proceedings of IEEE ICCV, Vancouver, Canada, 2001, II:10-17.
- [3] P. Debevec Image-based lighting [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2002, 22 (2) :26-34.
- [4] Larson G. W., Shakespeare R. Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [5] Mitsunaga T., Nayar S.K.. Radiometric self calibration. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, 1999, 374-380.
- [6] Mann S., Picard R. Being 'undigital' with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed pictures. In: Proceedings of IST's 48th Annual Conference, Washington, 1995, 422-428.
- [7] CIE S011/E:2003 ISO 15469:2003(E)