

**Физически корректная модель солнечного освещения, задаваемая
изображением с большим динамическим диапазоном**

Валиев И.В.; Волобой А.Г., к.ф.-м.н.; Галактионов В.А., д.ф.-м.н.

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва

1. Введение

Человек легко воспринимает большой диапазон яркостей, когда соотношение самой яркой части области в поле зрения к самой темной составляет миллионы раз. Чувствительность зрительной системы человека охватывает диапазон от 10^{-6} до 10^8 cd/m² (кандел на квадратный метр). Однако диапазон таких яркостей не может быть воспроизведен на обычных графических дисплеях, чей динамический диапазон не превышает 10^3 . Современные исследования и разработки в области компьютерной графики все чаще обращаются к изображениям с большим диапазоном яркостей (HDRI – High Dynamic Range Image в англоязычной литературе). Изображение с большим диапазоном яркости содержит для каждого пиксела реальное физическое значение яркости в формате значения с плавающей точкой, который позволяет записывать реальные значения в более широком диапазоне, чем чувствительность зрения человека. Впервые использование изображения с большим динамическим диапазоном было предложено Грегори Вардом в 1991 году [1]. Он же разработал первый и до сих пор наиболее распространенный формат для хранения таких изображений (RGBE формат файла со стандартным расширением hdr), а также свободно распространяемую программу для работы с ними [2].

Первоначально изображения с большим динамическим диапазоном являлись результатом генерации изображения с помощью систем физически аккуратного моделирования распространения света. Однако в наше время они могут быть получены путем обработки набора фотографий реального мира, сделанных с различными выдержками и диафрагмами, или как результат панорамного

сканирования окружающей реальной сцены. Именно эта возможность запечатлеть реальный мир с помощью панорамных карт окружения, содержащих реальные физические величины яркостей, и дала толчок бурному развитию этого направления компьютерной графики. Она позволяет существенно упростить процесс создания окружающей среды и фона для генерации реалистичных изображений. С ее помощью моделируемый объект может быть легко помещен в существующую реальную сцену. Также такая карта окружения передает реальные значения яркостей существующих в сцене источников света. Это привело к развитию технологии компьютерной графики, называемой «освещение, задаваемое изображением» (IBL – Image Based Lighting в англоязычной литературе) [3]. Такие панорамные карты окружения, содержащие реальный, большой диапазон яркостей, можно назвать картами освещения.

Большинство технологий генерации реалистичных изображений основываются на моделировании распространения света в различных средах. Такое моделирование требует задания источников света. При использовании IBL технологии источником света является изображение с большим динамическим диапазоном. Становится возможным назначать в качестве источников света фотографии неба или выставочного зала и моделировать освещение объекта в этих условиях. Задание источников света и условий освещения другим способом (например, набором точечных, площадных, линейных и др. источников света с правильным расположением их в трехмерной виртуальной сцене) является сложным и дорогим процессом, который не всегда приводит к желаемому результату.

Многие системы визуализации и моделирования такие, как 3dMax (Mental ray, V-Ray), Softimage, Maya и др. используют изображения с большим динамическим диапазоном для задания фона, что позволяет существенно улучшить реализм генерируемых картинок. Некоторые из этих систем используют карты освещения в

качестве источников света. Однако используемые алгоритмы моделирования хорошо работают, если карты освещения задают протяженные источники света без резких изменений яркости (например, облачное небо). В результате моделирования на картинках можно увидеть размытые тени, и направление на источник света не сильно выражено. Так происходит, например, в системе LightWave 3D, где в основе расчета глобальной освещенности лежит метод излучательности. В ситуации, когда карта освещения содержит ярко-выраженный мощный источник света, такой как солнце, система не может воспроизвести четкие тени автоматически. В качестве решения проблемы пользователю LightWave 3D предлагается вручную установить дополнительный источник света по направлению солнца с соответствующим масштабированием (уменьшением) яркостей карты освещения.

Такой подход, когда пользователь должен сам устанавливать дополнительный источник света для солнца, предлагается и в некоторых других системах визуализации. Фирмы, занимающиеся коммерческим производством и поставкой библиотек карт освещения на рынок, стараются не изменять положения солнца на небосводе во всей серии изображений. Для таких систем визуализации это обеспечивает взаимозаменяемость карт освещения при компоновке сцены и задании свойств материалов без изменения ручных настроек.

Возможность автоматически использовать карты освещения предоставляет алгоритм распознавания и выделения ярких источников света, предлагаемый авторами в данной статье. Распознавание ярких источников света перекликается с новым направлением компьютерной графики, позволяющим воспроизводить обычные (LDR – Low Dynamic Range) изображения на устройствах с высоким динамическим диапазоном (HDR display). Известно несколько решений этой проблемы, в которых предлагается увеличить динамический диапазон участков блика и отражения солнца [4], применить обратный оператор отображения яркостей

сцены на экране дисплея [5] или улучшить динамический диапазон для видео последовательности [6]. Однако нам необходимо физически корректное восстановление яркости солнца, а не просто улучшение визуального восприятия картинки. Поэтому эти алгоритмы не подходят для нашего случая.

В данной работе описывается разработанный авторами метод освещения изображением, который позволяет автоматически корректно строить изображения для карт освещения с таким мощным источником света, каким является солнце. Обсуждается анализ качества существующих карт освещения, полученных методом множественного фотографирования с различными экспозициями, предложены модификации методов генерации реалистичных изображений, компенсирующие недостатки карт освещения.

2. Расчет освещенности

Одной из наших задач была генерация реалистичных изображений виртуальных моделей автомобилей, окрашенных красками типа «металлик», использующимися в автомобильной индустрии. Такие краски могут иметь довольно сложный внешний вид. В общем случае оптические свойства таких поверхностей описываются *двухнаправленной функцией отражения* (ДФО или BRDF – Bidirectional Reflection Distribution Function в англоязычной литературе). ДФО может быть получена либо прямым измерением образца в спектрофотометре [7], либо путем оптического моделирования внутренней структуры материала [8]. Такие реальные ДФО имеют сложную форму и часто не могут быть аппроксимированы какой-либо существующей моделью ДФО. Поэтому мы вынуждены использовать ДФО, заданные в виде таблицы. Обычно ДФО краски имеет большой градиент в районе направления зеркального отражения. Поэтому была выбрана следующая координатная система ДФО (рис. 1): σ – угол между направлением падения света и нормалью поверхности; ϑ – угол между направлением зеркального отражения и

направлением на наблюдателя; φ – угол вращения направления на наблюдателя вокруг направления зеркального отражения, отсчитываемый от плоскости падения света. Такая координатная система позволяет указать значение ДФО для любого направления и адаптивно использовать более плотную сетку значений в районе направления зеркального отражения.

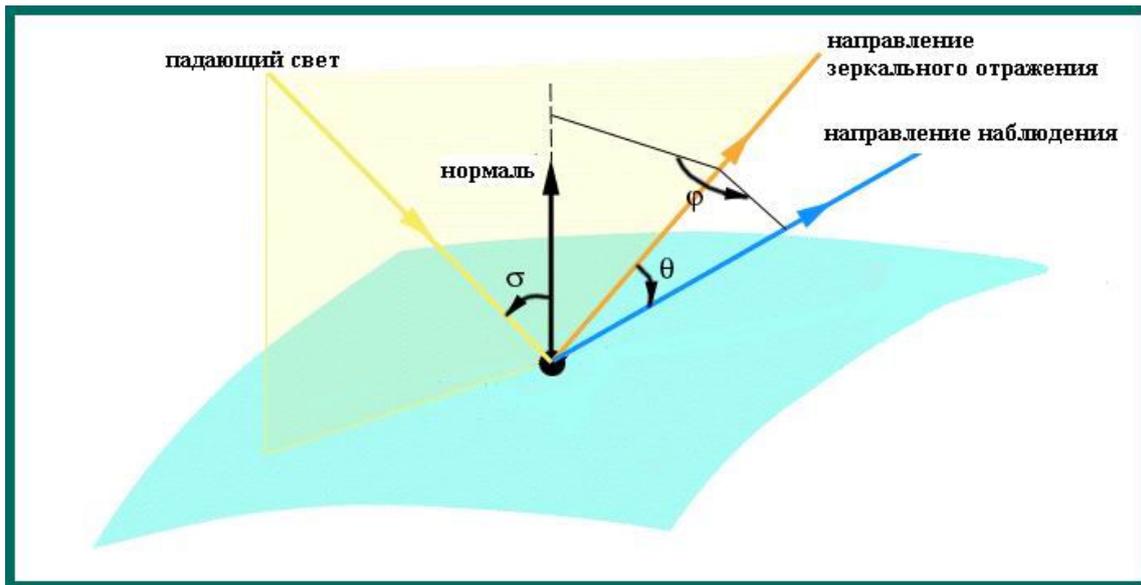


Рис. 1. Координатная система двунаправленной функции отражения света (ДФО).

Яркость точки поверхности, заданной с помощью ДФО (BRDF), вычисляется с помощью следующего интеграла:

$$L = \frac{1}{\pi} \int_{(\vec{n} \cdot \vec{\omega}) \geq 0} \text{BRDF}(\sigma(\vec{n}, \vec{\omega}, \vec{v}), \mathcal{G}(\vec{n}, \vec{\omega}, \vec{v}), \varphi(\vec{n}, \vec{\omega}, \vec{v})) (\vec{n} \cdot \vec{\omega}) I(\vec{\omega}) d^2 \omega,$$

где $\vec{\omega}$ – направление освещения точки,

\vec{v} – направление наблюдения,

\vec{n} – вектор нормали к поверхности в рассматриваемой точке,

I – интенсивность освещения,

$I(\vec{\omega})d^2\omega$ – интенсивность освещения, испускаемая всеми точками карты освещения, принадлежащими телесному углу $d^2\omega$.

Каждое направление освещения $\vec{\omega}$ освещает поверхность только с одной стороны. Обратная сторона поверхности находится в затенении по отношению к данному направлению, что отражено в условии интегрирования $(\vec{n} \cdot \vec{\omega}) \geq 0$.

Метод Монте-Карло обратной трассировки лучей позволяет вычислить такой интеграл достаточно эффективно. Однако это верно, если карта освещения задает достаточно равномерное освещение сцены, например, для освещения от облачного неба. В случае же, если карта освещения содержит яркий источник света (например, прямо видимое солнце), то вычислительные затраты будут значительные. Эта проблема может быть решена, если выделить яркие источники света из карты освещения. Так как карта освещения задает источник света, расположенный на бесконечно удаленной сфере, то и выделенные яркие источники разумно заменить параллельными источниками света. В итоге карта освещения будет задавать равномерный источник света без ярких особенностей, которые будут заданы параллельными источниками света.

Выделение ярких источников света из карты освещения позволит также решить задачу генерации четких, резких теней от солнца. Большинство существующих систем визуализации не могут автоматически генерировать резкие тени от солнца, присутствующего в карте освещенности. Обычно они предлагают пользователю добавить искусственные источники света. Распознавание и выделение ярких областей позволяет более корректно моделировать освещенность от карт освещения, содержащих солнце, не добавляя в сцену искусственных источников света.

Для выделения источников света были введены три коэффициента, регулирующих процесс распознавания областей с большой яркостью и расчета мощности источника. Первый коэффициент используется для определения направления на источник света и задает порог яркости точки карты освещения, определяющий является ли она источником света. Второй и третий коэффициенты используются для определения всей области с большой яркостью и в конечном итоге для вычисления яркости источника света. Второй коэффициент задает максимальный радиус яркой области. Точки, яркость которых превышают заданный порог, но найденные за пределами этого радиуса будут рассматриваться как другие источники света. Третий коэффициент задает минимальную яркость точки, которая будет рассматриваться как составляющая источника света. Таким образом, при выделении источника света используются все точки, лежащие не далее, чем указанный радиус от наиболее яркой точки, с яркостью выше минимальной яркости.

Значения яркостей всех точек карты освещения, использованных при выделении источника света и задании его мощности, обрезаются. В результате для дальнейших расчетов освещенности мы имеем достаточно гладкую функцию освещения, задаваемую обрезанной картой освещения, и набор ярких параллельных источников света.

Для автоматического выделения источников света все изображение с большим динамическим диапазоном делится на сегменты, соответствующие пирамиде видимости $45^0 \times 45^0$. Сегменты рассматриваются только для верхней полусферы, как это показано на рис. 2.



Рис.2. Разбиение карты освещения для автоматического выделения источника света. Красным кружком показан найденный источник света.

Значения коэффициентов для порога яркости, определяющего направление на источник света, и минимальной яркости, определяющей составляющие источника света, рассчитываются по эмпирической формуле и зависят от средней яркости сегмента изображения. Оптимальное значение максимального радиуса яркой области также определялось на основе экспериментов.

3. Анализ доступных карт освещения

Однако применение описанного механизма использования карт освещения в качестве источника света еще не гарантирует получение реалистичных изображений фотографического качества. Попытки получить реалистичные изображения показали, что основные проблемы связаны с отсутствием четких теней и некорректной освещенностью поверхностей для карт освещения с видимым солнцем. Все это приводит к потере реалистичности итогового изображения.

Алгоритмы, разработанные авторами для построения изображения, являются физически обоснованными, и ожидалось, что они должны генерировать корректное изображение. Однако это оказалось верным только, если входные данные, т.е. сами

карты освещения, являются физически корректными. Поэтому мы постарались проанализировать используемые нами карты освещения. Для нас наиболее важными являются две характеристики:

- динамический диапазон,
- правильность представления солнца.

Все исследованные карты освещения были сделаны на устройствах компании SpheronVR [9] как самой компанией, так и фирмой Dosch Design [10], использующей приборы Spheron.

Для получения правильного, реалистичного изображения панорамные карты освещения должны максимально правильно передавать условия реальности, существовавшие во время процесса фотографирования. Это означает, что если в реальности диапазон яркостей (например, соотношение яркости солнца к яркости черного предмета внутри помещения) был достаточно велик, то и карта освещения должна содержать динамический диапазон такого же порядка.

Для анализа карт освещения за основу были взяты стандартные модели ясного полуденного неба (clear sky model) и модель частично облачного неба (partly cloudy model) Международной комиссии по освещению CIE и Северо-Американской ассоциации по освещению IESNA [11]. Для модели ясного неба соотношение максимальной яркости солнечного неба к минимальной составляет 23737.4, т.е. динамический диапазон неба должен быть порядка 10^4 . Для модели частично облачного неба соотношение максимальной яркости солнечного неба к минимальной составляет 4722.4, т.е. динамический диапазон неба должен быть порядка 10^3 . Выделение всех точек карты освещения, принадлежащих небу, является в общем случае непростой задачей. Гораздо легче вычислить полный динамический диапазон всей карты, включающий также точки, принадлежащие нижней полусфере панорамы с изображением домов, почвы и т.д. Мы изучили несколько десятков

различных карт освещения, произведенных компанией Spheron. Для всех них нижняя полусфера добавляет в среднем пару порядков к диапазону. Поэтому приблизительная оценка динамического диапазона всей карты освещения с солнцем должна быть не менее 10^6 , а частично облачной – 10^5 . Если карта освещения не содержит такого диапазона величин, то оно не отражает реальность, и это приводит к неправильным результатам моделирования освещенности.

Также была решена следующая проблема. Нижняя граница яркости может принимать очень маленькие, ненулевые значения (например, 10^{-15} , 10^{-8} или 10^{-3}). Для человеческого восприятия эти величины представляют собой темные области, неразличимые глазом. Они являются просто «шумом» элементов цифровой камеры в процессе фотографирования. Однако при вычислении динамического диапазона эта разница существенна. Для того чтобы иметь возможность отбросить такие малые величины, все значения яркостей были переведены в единицы измерения nit или кандела на метр квадратный (cd/m^2). Представление яркостей в nit единицах используется в частности для замера яркостей мониторов. При этом известно, что максимальные яркости ЭЛТ-монитора имеют значения 250-300 nit. Поэтому можно заменить значения менее 1 nit на единицу, так как для человеческого глаза эти величины неразличимы.

Анализ десятков карт окружения, производимых фирмой Dosch, показал, что ни одна из них не содержит приемлемого динамического диапазона. Максимальный динамический диапазон был 3961, т.е. $4.0 \cdot 10^3$. Это на два-три порядка меньше, чем ожидалось. Некоторые карты освещения фирмы Dosch имели диапазон 10^2 , что соответствует обычным фотографиям или изображениям. Очевидно, что попытка моделировать освещение сцены от таких карт освещения неминуемо приведет к неправильным итоговым изображениям.

Анализ карт окружения, произведенных фирмой Spheron, показал существенно лучший результат. Две карты освещения содержали приемлемый динамический диапазон (порядка $6 \cdot 10^5$), диапазон еще двух был близок к приемлемому (порядка $6 \cdot 10^4$). Рис. 3 показывает результат генерации реалистичного изображения автомобиля, освещенного картой освещения с приемлемым динамическим диапазоном «SpheronVR direct sun roof 003.hdr». Видно, что тени достаточно резкие, и благодаря достаточному освещению краска автомобиля имеет правильный цвет.



Рис. 3. Модель автомобиля освещена картой освещения с приемлемым динамическим диапазоном.

Однако даже при восприятии изображения, приведенного на рис. 3, создается впечатление, что солнце недостаточно яркое. Это видно по тени, которая выглядит светлее, чем ожидается. Солнечный блик на корпусе автомобиля размыт, что

характерно для слабых источников света. Поэтому дальнейший анализ карт освещения касался правильности представления солнца.

Как и в предыдущем случае, для проверки правильности задания солнца были также использованы стандарты CIE и IESNA. Освещенность горизонтальной поверхности для модели ясного неба складывается из освещения, порождаемого солнцем, и освещения, созданного небесной полусферой за исключением солнца. Согласно стандарту CIE соотношение освещенностей, порождаемых этими частями, приблизительно равно 4:1, т.е. солнце создает в четыре раза большее освещение горизонтальной поверхности, чем вся остальная небесная полусфера.

Было вычислено соотношение освещения горизонтальной поверхности зоной солнца и всего остального неба для двух карт освещения, показавших приемлемые динамические диапазоны значений. Соотношение освещения, задаваемого одной картой, оказалось 1:1, т.е. освещение, порождаемое солнцем, равно освещению, создаваемому небом. Соотношение освещения, задаваемого другой картой, оказалось 1:5, т.е. освещение, создаваемое солнцем, оказалось в пять раз меньше, чем освещение, создаваемое небом. При этом обе карты освещения представляют ясное небо с хорошо видимым солнцем, находящимся достаточно высоко над горизонтом. Это показывает, что яркость солнца является сильно недооцененной.

Более детально результаты анализа карт освещения описаны в [12].

4. Пути компенсации некорректностей карт освещения

После анализа доступных карт освещения стало понятно, что алгоритмы моделирования освещенности и генерации реалистичных изображений должны быть модифицированы таким образом, чтобы скомпенсировать их недостатки. Наиболее существенным является компенсация недостатков, связанных с недооценкой яркости солнца. Было бы некорректно изменять яркость неба, так как именно яркость солнца является недооцененной. Производители аппаратуры для съемки карт освещения

утверждают, что именно съемка солнца, как особенно яркого объекта, представляет реальную сложность. Все остальное окружение может быть получено с высокой точностью.

Компенсировать недооценку солнца можно, взяв за основу стандартные модели неба, принятые Международной комиссией по освещению (CIE). При выделении источника света производится расчет освещенности горизонтальной поверхности от выделенного источника (т.е. солнца) и от модифицированной верхней полусферы карты освещения (т.е. неба за исключением солнца). Далее яркость выделенного источника света масштабируется таким образом, чтобы освещенность от него была в 4 раза выше, чем от остального неба. При этом проблемой является анализ карты освещения с целью автоматического определения, когда необходимо применить операцию масштабирования источников света. Базируясь на автоматическом анализе, мы не можем быть точно уверены, является ли выделенный источник света солнцем или это яркий искусственный источник. Естественным решением в этом случае является предоставление возможности пользователю самому устанавливать режим компенсации неправильности яркости солнца в зависимости от визуальной оценки конкретной карты освещения.

На рис. 4 представлен результат работы этого алгоритма. На рис. 4а приведено изображение автомобиля, помещенного в карту освещения с видимым солнцем `a52_Lagerschuppen.hdr` (динамический диапазон – $5.6 \cdot 10^4$, соотношение освещенности горизонтальной поверхности от солнца/неба – 1:5, т.е. небо в пять раз ярче солнца). Видно, что автомобиль недостаточно освещен для солнечного дня, тени от солнца очень бледные. На рис. 4б представлено изображение, полученное с компенсацией неправильности задания солнца. Освещенность автомобиля стала удовлетворительной, под автомобилем видна четкая тень, соответствующая яркому, солнечному дню.



Рис. 4а. Применение компенсации некорректности задания солнца. Изображение было построено без применения алгоритма компенсации.



Рис. 4б. Применение компенсации некорректности задания солнца. Хорошо видны четкие тени, соответствующие солнечному дню, которые появились в результате включения режима компенсации.

Однако часто расчет освещенности от небесной полусферы невозможен потому, что небо на карте освещения частично закрыто деревьями или зданиями. Поэтому для таких карт освещения применение алгоритма, описанного выше, некорректно. Был разработан другой подход, позволяющий рассчитать яркость параллельного источника, представляющего солнце, исходя из стандартной модели неба, принятой Международной комиссией по освещению.

Для задания параметров стандартной модели неба пользователь должен задать географическое местоположение (например, «Брянск, Россия»), где была снята карта освещения, и дату и время, когда это было сделано. Также должна быть задана ориентация (азимутальное направление) карты освещения. Время (но не дата) съемки и азимутальное направление может быть вычислено автоматически. Время устанавливается по высоте выделенного солнца над линией горизонта, а азимутальное направление по азимуту на него. После того, как параметры стандартной модели неба заданы, пользователь должен указать («кликнуть») на любую точку, принадлежащую небу. Значения всего неба и солнца будут скорректированы в соответствии со стандартной моделью неба. Рис. 5. иллюстрирует процесс реконструкции солнца, итоговое значение освещенности от которого получилось 70059,72 люкс, а начальное, полученное из карты освещения, – 8916,03 люкс.

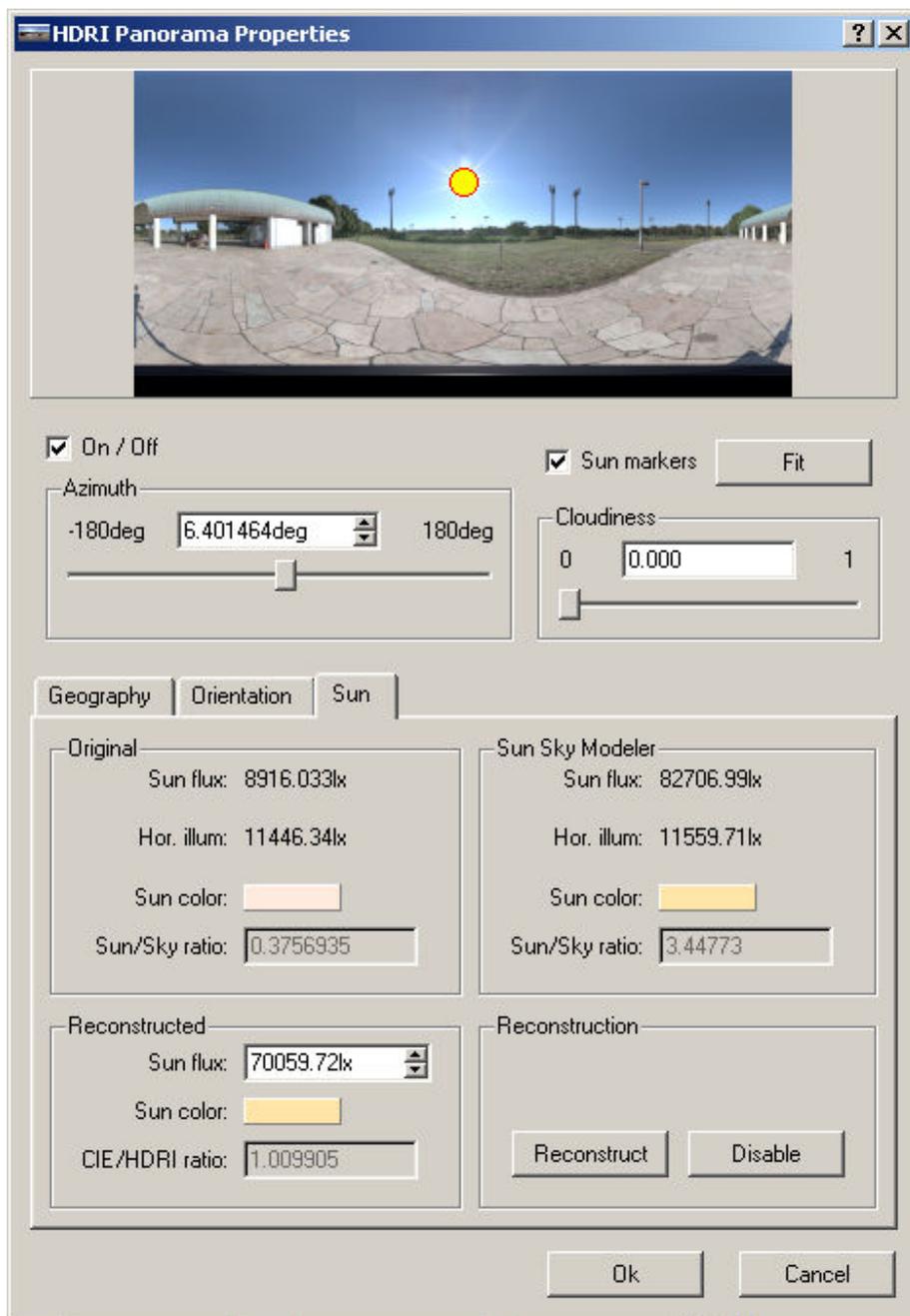


Рис. 5. Реконструкция яркости солнца.

На рис. 6 представлен результат работы алгоритма реконструкции яркости солнца. На рис. 6а приведено изображение автомобиля, помещенного в карту освещения с видимым солнцем, освещенность от которого вычислена из самой карты (и равной 8916,03 люкс). Видно, что освещение автомобиля не соответствует яркому солнечному свету. На рис. 6б приведено изображение, полученное с

помощью алгоритма реконструкции солнца (освещенность от которого равна 70059,03 люкс). Освещение автомобиля и тени выглядят правдоподобно.



Рис. 6а. Изображение получено без применения алгоритма реконструкции солнца.



Рис.6б. Изображение получено с применением алгоритма реконструкции солнца. Видно корректное освещение автомобиля и резкие тени от солнца.

5. Заключение

Описанные алгоритмы были разработаны и реализованы в системе реалистической визуализации Inspirer2 (описанной как Fly в [13]). Рисунки 3-6 были получены с ее помощью.

Отметим, что генерация изображений диффузных поверхностей или поверхностей, свойства которых заданы ДФО, требует больших вычислительных ресурсов. Построение изображения с помощью Монте Карло обратной трассировки лучей требует минуты, а иногда и десятки минут на современном компьютере. Например, время генерации рис. 6 с разрешением 640x480 на Pentium IV 2.66 GHz и 1 Gb RAM было около 3-х минут. В то же время расчет освещения от карты освещения и выделение ярких источников света не зависят от размера карты. Поэтому карты освещения с большим разрешением могут быть использованы без дополнительных вычислительных затрат.

Вычисление физически корректной освещенности было одним из требований при разработке системы реалистической визуализации. Поэтому корректное задание солнца было для нас очень важно. Описанные алгоритмы являются физически обоснованными. Реализованная возможность вычислять яркости точки поверхности, заданной двунаправленной функцией отражения (ДФО), позволяет визуализировать при естественном дневном освещении материалы со сложными оптическими свойствами, такие как ткани, многослойные автомобильные краски.

Анализ нескольких десятков изображений с большим динамическим диапазоном (карт освещения), содержащих небо, показал, что физически корректных карт практически не существует. Все они имеют недостатки в области представления солнца. Это связано с невозможностью напрямую измерить его яркость. Видимо в большинстве случаев производители карт освещения минимизируют время их создания, что приводит к неточностям в задании окружения.

Кроме этого, как видно из анализа, иногда карты освещения не содержат реального диапазона яркостей, а являются просто обычными фотографиями. Очевидно, что они не могут корректно задать освещение сцены и быть использованы при синтезе реалистичных изображений.

Разработанные модификации алгоритмов генерации реалистичных изображений учитывают существующие недостатки карт освещения. Оба описанных метода, реконструкция солнца и компенсации его недооценки, улучшают качество получаемых изображений. В итоге реализованные алгоритмы позволяют получить более корректный результат, являются достаточно автоматическими и устойчивыми к различным ошибкам карт освещения.

Работа поддержана РФФИ, гранты № 07-01-00450, а также компанией INTEGRA Inc. (Япония).

Электронная версия статьи с цветными иллюстрациями размещена по адресу http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/publications/cgd_publ.htm.

Список литературы

- [1] Ward G. Real Pixels. Graphics Gems II. J. Arvo, ed., 1991, pp.80-83.
- [2] HDRshop. <http://www.hdrshop.com>
- [3] Debevec P. Image-Based Lighting. Siggraph 2002 Tutorial. pp. 26-34.
- [4] Meylan L., Daly S., Susstrunk S. The reproduction of specular highlights on high dynamic range displays. In Proc. of the 14th Color Imaging Conference, 2006.
- [5] Banterle F., Ledda P., Debattista K., Chalmers A. Inverse tone mapping. GRAPHITE 2006, Kuala Lumpur, Malaysia, 2006, pp. 349-356.
- [6] Rempel A., Trentacoste M., Seetzen H., Young H., Heidrich W., Whitehead L., Ward G. Ldr2Hdr: On-the-fly reverse tone mapping of legacy video and photographs. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), 26(3), 2007, Article No. 39

[7] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, С.В. Ершов, А.А. Летунов, И.С. Потемин, Аппаратно-программный комплекс для измерения светорассеивающих свойств поверхностей. «Информационные технологии и вычислительные системы» № 4, 2006, стр. 24-39.

[8] Ershov S., Durikovich R., Kolchin K., Myszkowski K. Reverse engineering approach to appearance-based design of metallic and pearlescent paints, The Visual Computer, 2004, Vol. 8-9, No. 20, pp. 586-599.

[9] SpheronVR AG. <http://www.spheron.com>

[10] Dosch Design GmbH. <http://www.doschdesign.com>

[11] IESNA Lighting Handbook by Mark S. Rea. Reference & Application. 8th ed., New York, 1993.

[12] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов, Л.З. Шапиро, Моделирование естественного дневного освещения, задаваемого изображением с большим динамическим диапазоном. "Программирование", № 5, 2006, стр. 62-80.

[13] Ignatenko A., Barladian B., Dmitriev K., Ershov S., Galaktionov V., Valiev I., Voloboy A., A Real-Time 3D Rendering System with BRDF Materials and Natural Lighting. The 14-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2004, Moscow, September 6-11, 2004. Conference Proceedings, pp. 159-162.