

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ДНЕВНОГО ОСВЕЩЕНИЯ, ЗАДАВАЕМОГО ИЗОБРАЖЕНИЕМ С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ*

© 2006 г. А. Г. Волобой, В. А. Галактионов, Э. А. Копылов, Л. З. Шапиро

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

125047 Москва, Миусская пл., 4

E-mail: voloboy@gin.keldysh.ru

Поступила в редакцию

В работе рассматриваются вопросы использования изображений с большим динамическим диапазоном в качестве источника естественного дневного освещения и фона для виртуальных сцен, содержащих материалы со сложными оптическими свойствами (ткани, автомобильные многослойные краски). В работе описаны физически обоснованные алгоритмы расчета яркости точки, распознавания солнца, генерации теней, задания фона. Проведен и изложен анализ корректности существующих изображений с большим динамическим диапазоном, показаны их недостатки. Разработаны модификации алгоритмов, позволяющие скорректировать эти недостатки при моделировании освещенности на базе моделей неба, принятых Международной комиссией по освещенности. Модифицированные алгоритмы моделирования освещенности позволяют получить более корректный результат, являются автоматическими и устойчивыми к ошибкам в изображениях с большим динамическим диапазоном. Алгоритмы используются в нескольких системах компьютерной графики для генерации высокореалистичных изображений.

Версию статьи с цветными иллюстрациями можно найти по адресу http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/publications/cgd_publ.htm.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕХНОЛОГИИ “ИЗОБРАЖЕНИЙ С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ”

1.1. *Изображение с большим динамическим диапазоном (БДДИ)*

Большой динамический диапазон яркостей, когда соотношение самой яркой области в поле зрения с самой темной составляет миллионы и миллиарды раз, без труда воспринимается человеческим глазом. Человек обычно хорошо различает предметы и при свете луны (освещенность горизонтальной поверхности составляет около 0.2 люкс), и при прямом солнечном свете (осве-

щенность горизонтальной поверхности – сотни тысяч люкс). Чувствительность зрительной системы человека охватывает диапазон от 10^{-6} до 10^8 cd/m² (кандел на квадратный метр). Отношение этих предельных значений составляет 10^{14} . Такой высокий показатель не имеет аналогов в мире техники. Правда, глаз не может видеть свет из всего этого диапазона одновременно, и максимальный диапазон интенсивностей, доступных глазу человека одновременно, составляет около 10000 : 1. Так как человеческое зрение фиксирует по отдельности интенсивность света и его цвет, то вся доступная глазу одновременно гамма цветов составляет приблизительно 10^8 оттенков. Приспосабливание зрения к более широкому диапазону освещенности осуществляется посредством механизма, известного как адаптация, и требует времени даже для столь совершенного механизма, каким является человеческое зрение.

*Работа была поддержана грантом “Ведущие научные школы” РФ, НШ-383.2006.9, а также компанией Integra Inc. (Япония).

Таблица 1. Максимальный динамический диапазон изображений в различных форматах

Формат	Количество бит на цвет	Количество бит на точку	Динамический диапазон
JPEG	8	24	255 : 1
12-bit CCD	12	36	4096 : 1
TIFF	16	48	65536 : 1
RGBE	8	32	$\sim 10^{78} : 1$

Естественно, такой диапазон яркостей не может быть отображен на современных графических дисплеях, чей динамический диапазон мал – соотношение самой яркой области с самой темной не превышает у них сотен раз. Поэтому большинство систем компьютерной графики долгое время работали с 8-битным целочисленным представлением цветовых компонент (256 градаций цвета), прямо отображаемым на доступной графической аппаратуре. Очевидно, что эти изображения не могут претендовать на точность отображения перепадов освещенности, присущих окружающему миру.

Современное развитие компьютерной графики все больше внимания уделяет изображениям с большим динамическим диапазоном. В англоязычной литературе они носят название HDR – High Dynamic Range Images. В изображениях с большим динамическим диапазоном (назовем их для краткости “БДДИ”) значения яркости для каждой точки выражаются реальными физическими величинами, т.е. числами с плавающей точкой, и их диапазон превышает диапазон чувствительности зрительной системы человека. Они позволяют передать реальные интенсивности окружающей среды, даже за пределами чувствительности человеческого глаза.

Изображение с большим динамическим диапазоном и наиболее общепотребимый формат RGBE для его записи были предложены Греггом Вардом [1] (стандартное расширение RGBE файла – .hdr). В таблице 1 приведены количества бит, необходимых для представления изображений в различных форматах.

Первоначально изображения с большим динамическим диапазоном являлись результатом исключительно физически корректного моделирования сцен. В настоящее время изображения ре-

альных сцен с большим динамическим диапазоном яркостей могут быть получены путем обработки последовательности фотографий с различной экспозицией [2] или специальным панорамным сканированием [3, 4]. Более того, в ближайшем будущем фотоаппараты и видеокамеры будут позволять получать изображения и видео с большим динамическим диапазоном непосредственно. Именно получение фотографических изображений объектов и пейзажей с сохранением яркости и цвета реального мира и открыло широкие возможности для использования БДДИ в компьютерной графике.

1.2. Освещение, задаваемое изображением

Наиболее интенсивно развивающимся применением БДДИ является технология освещения, задаваемого изображением. В англоязычной литературе эта технология носит название IBL – Image-Based Lighting [5]. Моделирование распространения света в различных средах лежит в основе большинства алгоритмов генерации реалистичных изображений. При этом для моделирования должны быть заданы источники света. Технология освещения изображением (IBL) использует в качестве источника света изображение. Можно задать в качестве источника света сфотографированное небо или выставочный зал и смоделировать, как будет освещен тот или другой объект в этих условиях. Надо отметить, что задание таких условий освещения другими способами (например, набором специальным образом размещенных источников искусственного света) может оказаться весьма трудоемким и дорогостоящим процессом.

Одновременно с заданием освещения БДДИ решает также проблему задания окружения (фона) моделируемой сцены. На рис. 1 показана ком-



Рис. 1. Изображение автомобиля, созданное с помощью технологии освещения изображением.

пьютерная модель автомобиля, освещенная с помощью БДДИ и помещенная в заданный им реальный ландшафт. В англоязычной литературе такая технология носит название IBR – Image-Based Rendering.

Технология освещения изображением исключительно привлекательна и легка в применении. Она состоит из двух основных процессов:

- создания (фотографирования) БДДИ,
- правильного и эффективного расчета освещения, заданного БДДИ, при моделировании распространения света.

БДДИ, используемое для освещения изображением, должно обладать двумя свойствами. Во-первых, оно должно содержать точки для всех направлений фотографируемого окружающего мира, то есть фактически изображение с большим динамическим диапазоном должно быть сферической панорамой. Во-вторых, значение яркости каждой точки должно быть линейно пропорционально количеству света, приходящему с данного направления в реальном мире.

1.3. Технология построения БДДИ

Существует несколько технологий для получения полной сферической панорамы реального мира (иногда также называемой полноохватной панорамой):

- фотографирование металлической сферы, отражающей окружение [6],
- фотографирование всех направлений обычной цифровой камерой с последующей сшивкой этих изображений [7],
- фотографирование через объектив “рыбий глаз” [8].

Каждая из этих технологий имеет свои минусы:

- С помощью металлической сферы невозможно получить высококачественные изображения, так как отражения будут нечеткими и размытыми.
- Фотографирование обычной камерой с последующей сшивкой является очень трудоемким процессом. Направления всех камер должны исходить из одной точки, иначе сшитое изображение будет иметь заметные ошибки на границе кадров. Фотографирование должно проводиться достаточно быстро, в противном случае условия освещения могут измениться (например, солнце будет закрыто облаком в процессе съемки), и одна часть панорамы не будет соответствовать другой.

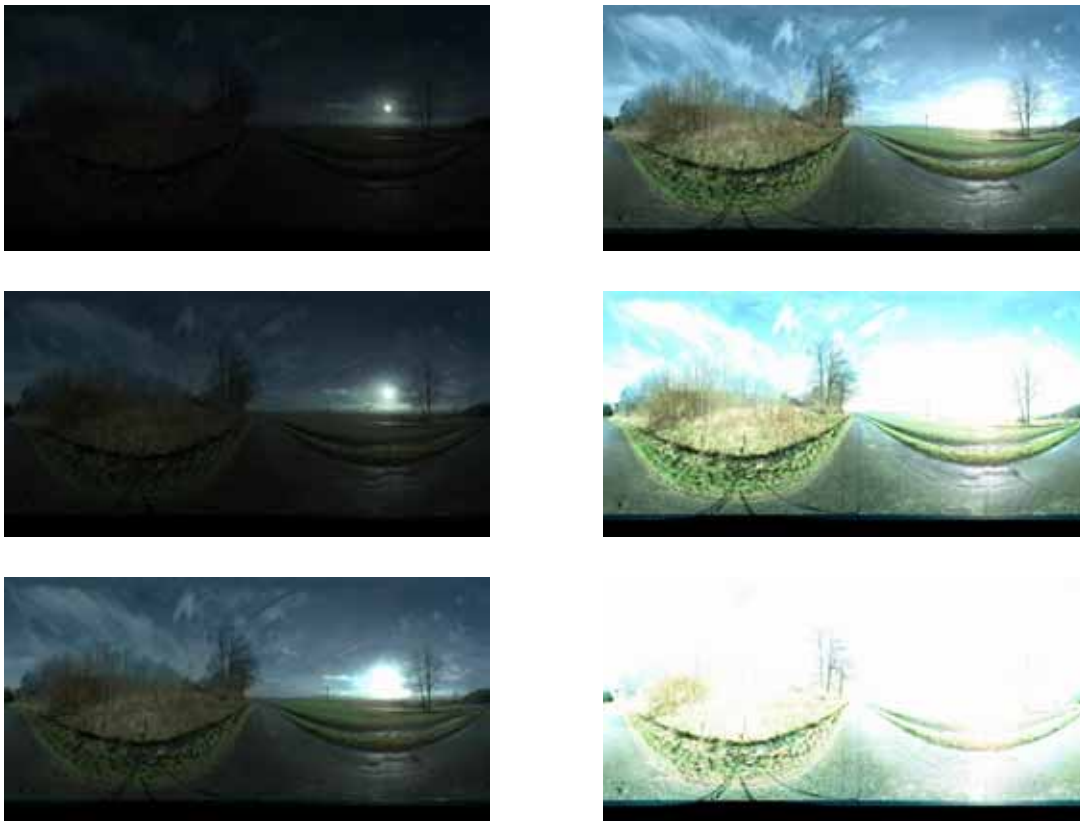


Рис. 2. Изображение с большим динамическим диапазоном (6 различных экспозиций). Рисунки разверток получены с помощью программы HDRshop.

- Использование “рыбьего глаза” оставляет заметные артефакты на итоговом изображении.

Получение значения каждой точки БДДИ производится с помощью фотографирования одного и того же изображения с различными экспозициями. Теоретические основы процесса получения БДДИ из обычных фотографий были впервые рассмотрены Дибевеком и Маликом [6] и основываются на принципе обратимости для регистрирующего устройства, согласно которому увеличение времени экспозиции для меньших освещенностей дает то же значение экспозиции, что и большее освещение при соответственно уменьшенном времени экспозиции. Другими словами, устройство с ограниченным динамическим диапазоном может зарегистрировать сколь угодно малую или большую величину освещенности, если соответствующим образом увеличить или уменьшить время экспози-

ции. Алгоритм обработки набора кадров был реализован в программе HDRshop, распространяемой свободно [9]. Эта программа позволяет получить большой динамический диапазон яркостей из набора фотографий с различной экспозицией. Также программа показывает полноохватные панорамы БДДИ в виде птолемеевых разверток, которые являются наиболее распространенным классом представления панорам. Птолемева развертка – это панорамное изображение с 360-градусным охватом по горизонтали и 180-градусным по вертикали. Стандартное соотношение сторон таких разверток – 2 : 1. С помощью HDRshop можно также посмотреть БДДИ при различных экспозициях (пример показан на рис. 2), получить значения яркостей в каждой точке.

Создание собственных качественных изображений с большим динамическим диапазоном является трудоемким процессом, требующим соот-

ветствующей аппаратуры, программного обеспечения и аккуратного исполнения. Поэтому появились фирмы, специализирующиеся на их производстве [7, 10, 11] и поставляющие готовые наборы БДДИ. Анализ качества некоторых типичных изображений будет приведен далее в статье. Также существуют БДДИ, свободно распространяемые в Интернете (часто их можно найти на университетских сайтах), но их количество весьма ограничено.

1.4. Использование БДДИ в системах визуализации

Многие существующие системы моделирования и визуализации, такие, как 3dMax (Mental ray, V-Ray, brazil r/s), Softimage, Maya и другие, используют БДДИ в качестве фоновых панорам, что существенно увеличивает правдоподобность получаемых итоговых изображений. Однако, не все системы пытаются рассчитывать освещение сцены, анализируя изображение с большим динамическим диапазоном. Используемые алгоритмы и методы расчета освещенности, как правило, хорошо применимы только для случая протяженных и площадных источников света, таких, как, например, облачное небо. Подобные источники дают размытые, мягкие тени с неявным направлением на источник света. Ни одна из известных нам систем не умеет правильно моделировать освещенность, задаваемую БДДИ с безоблачным небом и прямо видимым солнцем.

LightWave 3D [12] является примером программной системы реалистичной визуализации, использующей БДДИ и в качестве фонового изображения, и для расчета освещения сцены. Для расчета глобального освещения сцены в LightWave 3D применяется метод излучательности (radiosity). Этот метод хорошо работает с распределенным источником света, которым в большинстве случаев является БДДИ, и позволяет получить качественные мягкие тени. Однако при работе с БДДИ, содержащими ярко-выраженный мощный источник света, такой, как солнце, система не может воспроизвести четкие тени автоматически. В качестве реше-

ния проблемы пользователю LightWave 3D предлагается вручную установить дополнительный источник света по направлению солнца с соответствующим масштабированием (уменьшением) яркостей БДДИ.

Этот же прием – установку дополнительного точечного источника света для получения резких теней – используют и ряд других систем визуализации. Фирмы, занимающиеся коммерческим производством и поставкой библиотек БДДИ на рынок, стараются не изменять положения солнца на небосводе во всей серии изображений. Для таких систем визуализации это обеспечивает взаимозаменяемость панорам БДДИ при компоновке сцены и задании свойств материалов без изменения ручных настроек.

В данной работе описывается разработанный авторами метод освещения изображением, который позволяет автоматически корректно строить освещение даже для БДДИ с таким мощным источником света, каким является солнце. Приводится анализ некоторых существующих БДДИ, полученных методом множественного фотографирования с различными экспозициями, предложены модификации методов расчета освещенности сцены и генерации реалистичных изображений, которые принимают во внимание недостатки доступных БДДИ.

2. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ СЦЕНЫ, ОСВЕЩЕННОЙ БДДИ

Для генерации изображения сцены необходимо промоделировать распространение света в сцене и рассчитать интенсивности точек экрана, которые определяются интенсивностью луча света, проходящего через плоскость экрана к наблюдателю. Нашей задачей было смоделировать объекты с достаточно сложными свойствами поверхности, такие, как одежда, ткани, многослойные краски и др. В общем случае оптические свойства таких поверхностей описываются *двухнаправленной функцией отражения* (ДФО или BRDF – Bidirectional Reflection Distribution Function в англоязычной литературе) [13]. ДФО,

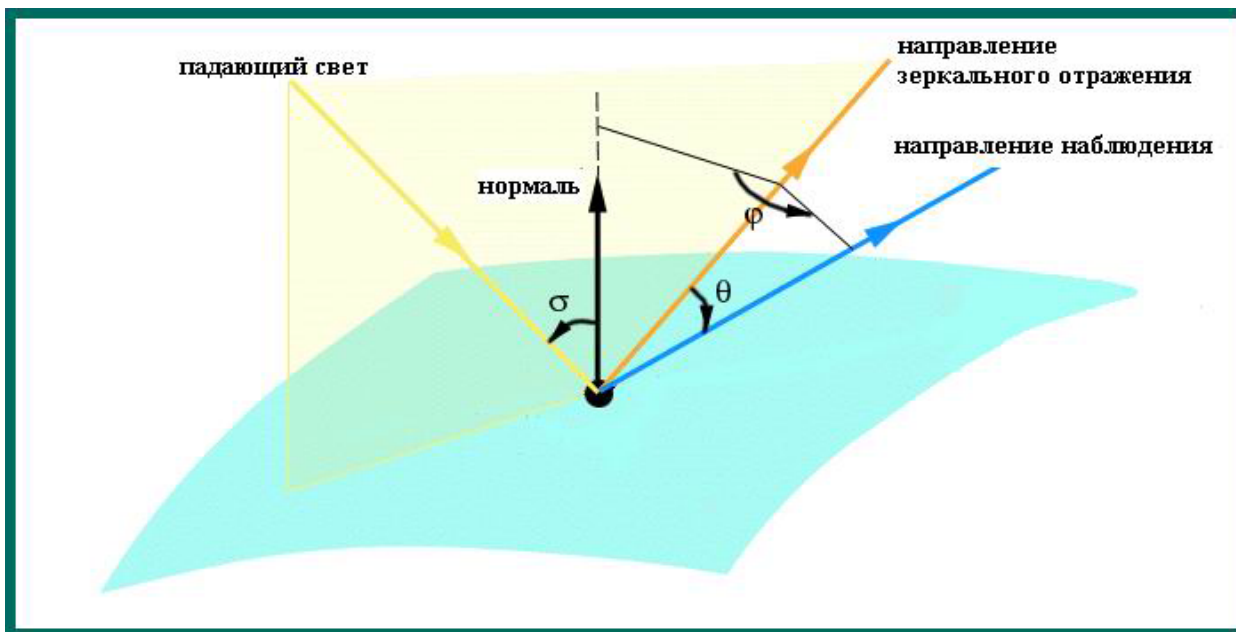


Рис. 3. Сферическая система координат для направлений отраженного света.

заданная в некоторой точке поверхности, определяет, какая часть энергии, принятая с направления w_{in} , будет рассеяна поверхностью в направлении w_{out} .

2.1. Определение яркости точки поверхности

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

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

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 БДДИ, принадлежащими телесному углу $d^2\omega$,

σ, θ, φ – угловые координаты двунаправленной функции отражения ДФО, заданные, как показано на рис. 3.

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

Метод Монте-Карло обратной трассировки лучей позволяет вычислить такой интеграл достаточно эффективно для большинства видов ДФО. Трассировка лучей в данном случае называется *обратной* потому, что лучи трассируются в направлении от наблюдателя к источнику света, то есть обратно направлению распространения света в действительности.

Для расчета глобальной освещенности необходимо также учитывать свет, отраженный от других диффузных поверхностей сцены. В описываемом алгоритме для расчета этой компоненты использовался метод Монте-Карло *прямой* (т.е. по направлению распространения света в действительности) трассировки лучей. Непосредственное применение этого метода является неэффективным для источника света, которым

является БДДИ. Поэтому для учета глобальной освещенности из сферической панорамы БДДИ выделяются источники света (области с большими яркостями) и заменяются соответствующими параллельными источниками. Расчет компоненты глобальной освещенности производится для этих более традиционных источников света.

Подробно методы Монте-Карло прямой и обратной трассировки лучей, вопросы их сходимости и точности вычислений рассмотрены в работе [14].

2.2. Получение теней при технологии освещения изображением

Многие системы реалистичной визуализации, использующие БДДИ для задания освещения, строят тени, отбрасываемые от одних объектов сцены на другие объекты (например, предмет находится на столе и отбрасывает тень на поверхность стола). Однако нашей задачей было помещение виртуального объекта (например, цифровой модели автомобиля) непосредственно в окружение, задаваемое БДДИ. В этом случае автомобиль должен отбрасывать тень на дорогу (как это показано на рис. 1), которая присутствует в изображении, но которой нет в описании сцены.

Для решения этой задачи в сцену вводится полностью прозрачная виртуальная плоскость, расположенная перпендикулярно к направлению зенита. На этой плоскости как бы стоит модель автомобиля. Условие перпендикулярности плоскости к зениту существенно упрощает вычисления, и общее время генерации изображения практически не увеличивается. Необходимость использования негоризонтальной виртуальной плоскости может возникать в достаточно редких случаях (зависит от БДДИ). И даже для этих случаев замена негоризонтальной плоскости на горизонтальную даст приближенное, но, скорее всего, приемлемое решение.

Тени от объектов сцены на виртуальной плоскости вычисляются с помощью метода Монте-Карло обратной трассировки лучей. Если луч, проходящий через точку экрана, пересекает вир-

туальную плоскость и попадает на фон, заданный БДДИ, то для вычисления теней можно использовать фактор затенения, определяемый для диффузной модели отражения:

$$L_S(\vec{v}) = \frac{E_S(x)}{E(x)} \cdot L(\vec{v}),$$

где

\vec{v} – направление наблюдения,

x – точка пересечения с виртуальной плоскостью в направлении наблюдения,

$L_S(\vec{v})$ – видимая яркость поверхности с учетом тени,

$L(\vec{v})$ – видимая яркость фона (БДДИ),

$E_S(x)$ – освещенность диффузной поверхности в точке x , совпадающей с виртуальной плоскостью, с учетом возможного затенения,

- $E(x)$ – освещенность в той же точке диффузной поверхности на виртуальной плоскости без учета затенения.

Значения освещенности в обоих случаях вычисляются с помощью метода Монте-Карло:

$$E(x) = \sum_{(\vec{n} \cdot \vec{\theta}) \geq 0} L(\vec{\theta}),$$

$$E_S(x) = \sum_{(\vec{n} \cdot \vec{\theta}) \geq 0} L(\vec{\theta})h(\vec{\theta}, x),$$

где

$h(\vec{\theta}, x)$ – функция видимости в заданном направлении из данной точки, принимающая значения 0 (есть затенение) или 1 (нет затенения),

$\vec{\theta}$ – произвольное направление из точки x . Число лучей, которые используются в определении освещенности точки на виртуальной плоскости, зависит от установленной точности вычисления. При более высокой точности из точки выпускается большее число лучей, и вычисление теней требует больше времени. Лучи для вычисления тени генерируются с равномерным распределением в точке пересечения луча зрения с виртуальной плоскостью.

Для уменьшения погрешности при вычислении степени затененности важно, чтобы одни и те же сгенерированные лучи использовались как при первом вычислении освещенности, когда объекты сцены учитываются, так и при втором, когда объекты не учитываются. Поэтому при первом вычислении создается список лучей, использующихся и во второй раз.

При интегрировании освещения, создаваемого БДДИ на виртуальной плоскости для получения теней, исходное разрешение панорамы является избыточным. Наряду с оригинальным БДДИ, заданным в сферической системе координат с разрешением $n \times m$, для вычисления освещенности на виртуальной плоскости рассматривается более гладкое БДДИ, усредненное с разрешением $\frac{n}{16} \times \frac{m}{16}$.

2.3. Распознавание солнца и ярких источников света

Как уже упоминалось, для эффективного расчета глобальной освещенности необходимо выделить из изображения с большим динамическим диапазоном области с большими яркостями и заменить их традиционными источниками света. панорама БДДИ считается расположенной на бесконечно удаленной сфере. Поэтому логично заменить выделенные области параллельными источниками света.

Скорость сходимости методов Монте-Карло, использующихся для расчета яркости точки поверхности, зависит от гладкости условий освещения. Они достаточно хорошо работают для равномерного освещения, создаваемого облачным небом, но требуют долгих вычислений, если имеется такой яркий и сильный источник освещения, как солнце. Исключение ярких источников из БДДИ позволяет решить эту проблему.

Выделение областей с большой яркостью и замена их на параллельные источники света решает также задачу построения четких теней от солнца или другого яркого источника освещения. Как уже упоминалось ранее, существующие программные системы предлагают пользователю вручную устанавливать дополнительный источник света, отбрасывающий четкую тень. Распознавание и выделение источ-

ников света позволило впервые правильно моделировать освещенность для БДДИ с видимым солнцем без дополнительных, искусственно установленных источников света.

Для выделения источников света были введены три коэффициента, регулирующие процессы распознавания областей с большой яркостью и расчета мощности источника. Первый коэффициент используется для определения направления на источник света и задает порог яркости точки БДДИ, определяющий, является ли она источником света. Вторым и третьим коэффициентами используются для определения всей области с большой яркостью и в конечном итоге – для вычисления яркости источника света. Вторым коэффициентом задается максимальный радиус яркой области. Точки, яркость которых превышает заданный порог, но найденные за пределами этого радиуса, будут рассматриваться как другие источники света. Третьим коэффициентом задается минимальную яркость точки БДДИ, 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 БДДИ, использованных при выделении источника света и задании его мощности, обрезаются. В результате для дальнейших расчетов освещенности мы имеем достаточно гладкую функцию освещения, задаваемую обрезанным БДДИ, и набор ярких параллельных источников света.

Для автоматического выделения источников света все изображение с большим динамическим диапазоном делится на сегменты, соответствующие пирамиде зрения $45^\circ \times 45^\circ$. Сегменты рассматриваются только для верхней полусферы, как это показано на рис. 4.

Значения коэффициентов для порога яркости, определяющего направление на источник света, и минимальной яркости, определяющей составляющие источника света, рассчитываются по эмпирической формуле и зависят от сред-

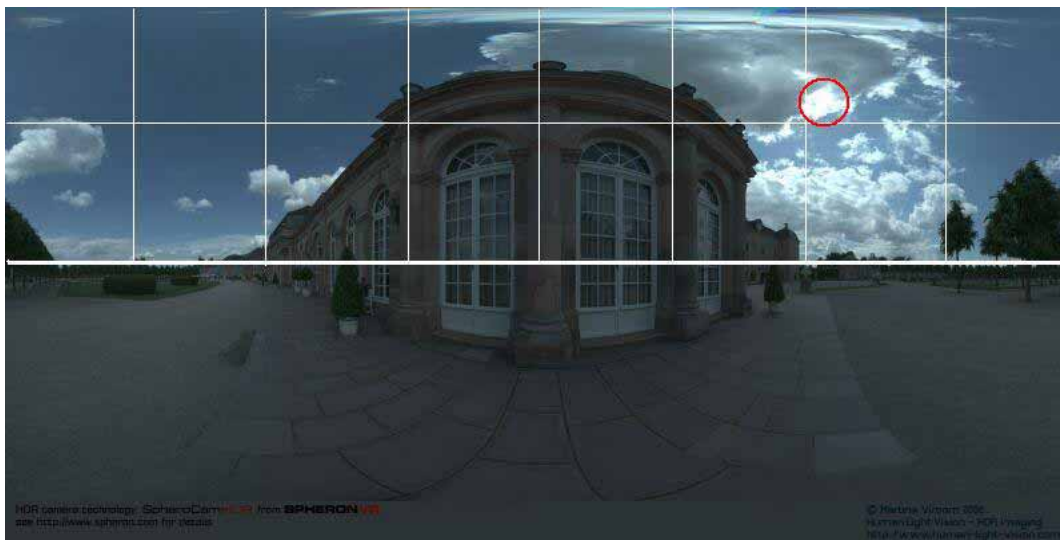


Рис. 4. Разбиение БДДИ для автоматического выделения источника света. Кружком на развертке БДДИ показан найденный источник света.

ней яркости сегмента изображения. Оптимальное значение максимального радиуса яркой области также определялось на основе экспериментов.

2.4. *Использование БДДИ в качестве фонового изображения*

При использовании изображения с большим динамическим диапазоном для построения фона считается, что направление зенита сцены совпадает с направлением на верхний полюс БДДИ. Изменение географической ориентации сцены приводит к соответствующему изменению фонового изображения.

Сферическая панорама БДДИ предполагается нанесенной на бесконечно удаленную сферу. Для того чтобы объекты сцены выглядели согласованно со сфотографированным изображением, необходимо, чтобы положение камеры при генерации реалистичного изображения совпадало с положением камеры при фотографировании БДДИ. Обычно фотографирование ведется со штатива высотой 1.0–1.5 метра. Поэтому высота камеры сцены должна быть определена в этих границах. Отклонение от этих размеров может привести к несогласованности объектов в итоговом изображении.

Бесконечно удаленная сферическая панорама БДДИ подразумевает, что все первичные и отраженные лучи, попадающие на нее, выпущены

из одной точки – из центра сферы. Поэтому построенное изображение будет выглядеть правдоподобно, только если расстояние между камерой и объектами сцены будет существенно меньше предполагаемого расстояния до сфотографированных объектов в панораме БДДИ. В случае же, когда эти расстояния сравнимы, отражения фона в объектах сцены будут неправильными, что может испортить восприятие всего изображения.

Так как чаще всего верхняя полусфера панорамы БДДИ содержит изображение неба, то для нее расстояния до объектов в панораме БДДИ действительно являются существенно большими, чем размеры сцены. Для нижней же полусферы был разработан алгоритм частичной коррекции отражений в нижней полусфере БДДИ, который позволяет получить приближенные отражения близких объектов в панораме БДДИ. Предполагается, что поверхность земли плоская и вся нижняя полусфера панорамы БДДИ проецируется на эту воображаемую плоскость. Таким образом, в объекте сцены отражается изображение воображаемой плоскости. Это отражение более корректно. Однако, так как проекция на плоскость делается из центра бесконечной сферы, корректность отражения все-таки будет не полной. Это проиллюстрировано на рис. 5.

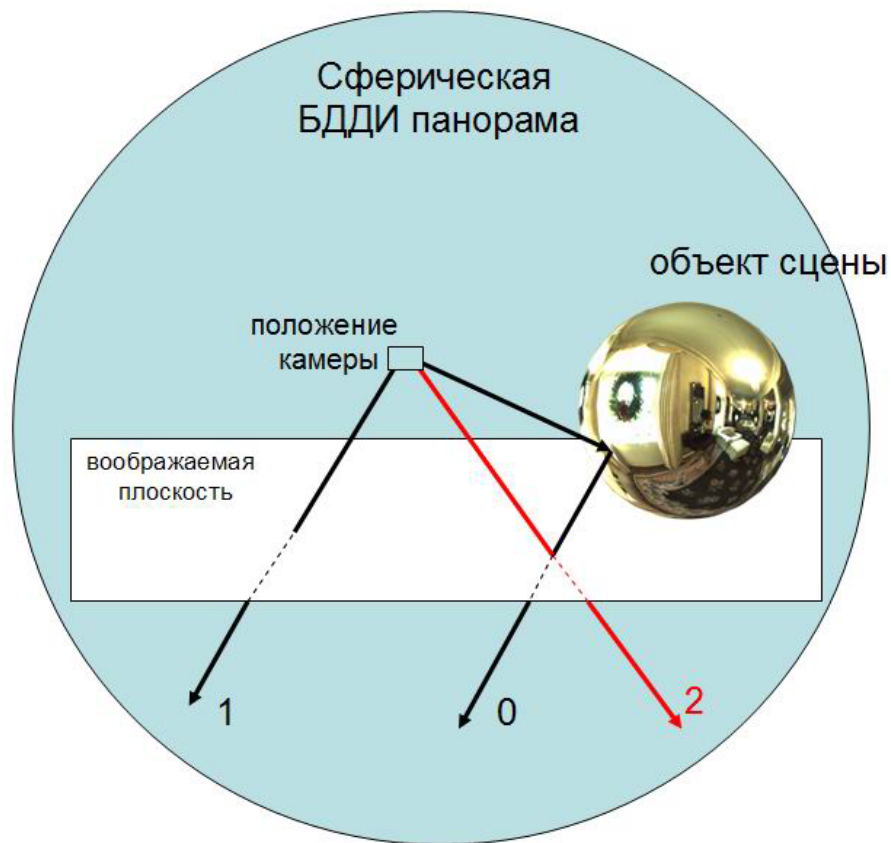


Рис. 5. Проекция нижней части БДДИ панорамы на воображаемую плоскость. Луч “0” – отражение от объекта сцены; луч “1” – параллельный отраженному лучу, выпущенный из положения камеры; луч “2” – проекция нижней полусферы на воображаемую плоскость.

Корректное отражение на объекте сцены должно соответствовать лучу “0”, который отражен в нижнюю полусферу. Луч “1”, исходящий из положения камеры, имеет то же направление, и поэтому на бесконечно удаленной сфере он попадает в ту же самую точку, что и луч “0”. Очевидно, что такое отражение будет верным для сильно удаленных “объектов” панорамы БДДИ. Однако хотелось бы получить отражения близких “объектов”, что создаст большую реалистичность размещения объекта сцены в окружении, заданном БДДИ. Луч “2” является проекцией по направлению к камере нижней полусферы на воображаемую плоскость, и точка БДДИ, ему соответствующая, является более близко расположенной к объекту сцены, чем точка лучей “0” и “1”. Именно точка панорамы БДДИ, соответствующая лучу “2”, и будет использована для отражения в объекте сцены. Подмена луча “0” лучом “2” является приемлемым

приближением для отражения протяженных объектов панорамы БДДИ, таких, как трава, асфальт, грунт и так далее.

Разрешение видимой части БДДИ может оказаться недостаточным. Поэтому, чтобы избежать зернистости фона, каждая точка изображения получается интерполяцией четырех ближайших точек БДДИ.

2.5. Сжатие динамического диапазона яркостей

Рассчитанное реалистичное изображение содержит для каждой точки экрана ее физическую яркость. Диапазон яркостей может значительно превышать диапазон, который может быть воспроизведен на экране монитора. Поэтому физические яркости должны быть преобразованы в координаты графического монитора так, чтобы итоговое изображение было представлено без потери деталей и с учетом психофизиологических факторов восприятия человеческого зрения.

Преобразование физических яркостей в изображение, выводимое на монитор, подробно описано в работе [15].

3. АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

Несмотря на описанный в предыдущей главе довольно мощный механизм использования БДДИ в качестве источника света для моделирования освещенности, его применение еще не гарантирует получение реалистичных изображений фотографического качества. Анализ нескольких десятков БДДИ, полученных нами из разных источников (см. раздел 1.3), показал, что основные проблемы связаны с отсутствием четких теней для БДДИ с видимым солнцем, а также с размытостью фона по сравнению с четким изображением объектов сцены. Все это приводит к потере реалистичности итогового изображения.

Алгоритмы, разработанные авторами для построения изображения, освещаемого БДДИ, являются физически обоснованными, и ожидалось, что они должны генерировать корректное изображение. Однако это оказалось верным, только если входные данные, т.е. сами БДДИ, являются физически корректными. Поэтому следующим этапом нашей работы стал анализ БДДИ. Наиболее важными являются три характеристики БДДИ:

- динамический диапазон,
- правильность представления солнца,
- пространственное разрешение.

Все исследованные БДДИ были сделаны на устройствах компании SpheronVR [10] как самой компанией, так и фирмой Dosch Design [11], использующей приборы Spheron.

3.1. Динамический диапазон БДДИ

Для получения правильного, реалистичного изображения входные данные, т.е. панорама БДДИ, 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 БДДИ должно содержать динамический диапазон такого же порядка.

Основные проблемы встретились при использовании БДДИ с непосредственно видимым солнцем. Для анализа этих БДДИ за основу были взяты стандартные модели ясного полуденного неба (clear sky model) и модель частично облачного неба (party cloudy model) Международной комиссии по освещению CIE и Северо-Американской ассоциации по освещению IESNA [16]. 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 БДДИ, принадлежащих небу, является в общем случае непростой задачей. Гораздо легче вычислить полный динамический диапазон БДДИ, включающий также точки, принадлежащие нижней полусфере панорамы с изображением домов, почвы и т.д. По нашей оценке нижняя полусфера добавляет пару порядков к диапазону БДДИ. Поэтому приблизительная оценка динамического диапазона всего БДДИ с солнцем должна быть не менее 10^6 , а частично облачного – 10^5 . Если БДДИ не содержит такого диапазона величин, то оно не отражает реальность, и это приводит к неправильным результатам моделирования освещенности.

При анализе БДДИ 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 очень 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 единицах nit используется, в частности, для замера яркостей мониторов. При

Таблица 2. Динамический диапазон БДДИ, созданных фирмой Dosh

Динамический диапазон	Наименование БДДИ
114.5	DH222SX.hdr
483.2	DH223SX.hdr
596.9	DH221SX.hdr
744.7	DH211SX.hdr
2047.8	DH210SX.hdr
2762.0	DH203SX.hdr
2780.8	DH216SX.hdr
2856.2	DH201SX.hdr
3241.1	DH204SX.hdr
3961.0	DH215SX.hdr



Рис. 6. Изображение, построенное на базе БДДИ DH211SX.hdr (динамический диапазон – 744.7). Хорошо видны такие недостатки, как мягкие тени от солнца, недостаточное освещение автомобиля, отсутствие бликов.

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, и они являются шумом. Это и было сделано при вычислении динамического диапазона исследуемых БДДИ.

В таблице 2 приведены значения динамического диапазона для БДДИ, содержащих небо и созданных фирмой Dosh.

Как хорошо видно из таблицы 2, ни одно из исследованных БДДИ, созданных фирмой Dosh,

не содержит достаточно большого динамического диапазона. Максимальный диапазон составил всего $4.0 \cdot 10^3$, что на два-три порядка ниже ожидаемого. Некоторые БДДИ содержат диапазон порядка 10^2 , что соответствует обыкновенным фотографиям. Просто они были записаны в формате RGBE. Моделирование освещенности, заданное такими БДДИ, не может быть корректным, и реалистичные изображения будут содержать недостатки, о которых уже говорилось ранее: мягкие тени от солнца, недостаточное освещение объектов сцены и т.д. Пример такого неправильного изображения приведен на рис. 6.

Таблица 3. Динамический диапазон БДДИ, созданных фирмой Spheron

Динамический диапазон	Наименование БДДИ
2308	Ludwigshoehe.hdr
2956	North.Circlehouse.hdr
3116	SpheronVR CarPark.hdr
8951	CarParkWFB.hdr
55727	a52.Lagerschuppen.hdr
60583	alster.hdr
627979	Hill HDR Sphere.hdr
638362	SpheronVR direct sun roof 003.hdr



Рис. 7. Изображение, построенное на базе БДДИ “SpheronVR direct sun roof 003.hdr” (динамический диапазон – $6.4 \cdot 10^5$). Видны четкие тени от солнца; благодаря достаточному освещению краска автомобиля имеет правильный цвет.

Значения динамического диапазона для БДДИ, созданных фирмой Spheron, представлены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, изображения с большим динамическим диапазоном, созданные фирмой Spheron, содержат величины яркостей с гораздо лучшим диапазоном. Два последних БДДИ имеют приемлемый диапазон яркостей ($6 \cdot 10^5$). Диапазон двух предпоследних также близок к приемлемому ($\sim 6 \cdot 10^4$). На рис. 7 представлен результат моделирования освещенности, заданной БДДИ SpheronVR direct sun roof 003.hdr, и генерации реалистичного изображения автомобиля. Хорошо видны четкие тени, созданные солнечным светом. Внешний вид краски

автомобиля показывает, что он правильно освещен (для сравнения та же краска на рис. 6 выглядит темно-синей, близкой к черной).

Однако даже при восприятии изображения, приведенного на рис. 7, 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 БДДИ касался правильности представления солнца.

3.2. Правильность представления солнца

Как и в предыдущем случае, для проверки правильности задания солнца были также ис-



Рис. 8. Дефекты изображения солнца: изображения паразитных “солнц” на БДДИ.

пользованы 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 БДДИ SpheronVR direct sun roof 003.hdr и a52.Lagerschuppen.hdr. Соотношение освещения, задаваемого первым БДДИ, оказалось 1 : 1, т.е. освещение, порождаемое солнцем, равно освещению, создаваемому небом. Соотношение освещения, задаваемого вторым БДДИ, оказалось 1 : 5, т.е. освещение, создаваемое солнцем, оказалось в пять раз меньше, чем освещение, создаваемое небом. При этом оба БДДИ представляют ясное небо с хорошо видимым солнцем, находящимся достаточно высоко над горизонтом. Это показывает, что представление солнца в БДДИ некорректно. Яркость солнца является сильно недооцененной.

Другим недостатком представления солнца в БДДИ являются дефекты изображения в виде дополнительных паразитных “солнц”, появляющихся рядом с основным и являющихся результатом паразитного света в объективе камеры при фотографировании. Эти дефекты могут привести к распознаванию паразитных солнц

как отдельных источников света, в результате чего моделирование освещенности будет неправильным. Их можно увидеть, если рассматривать БДДИ с пониженной экспозицией. Примеры дефектов приведены на рис. 8.

В действительности невозможно получить корректные значения яркости в области солнца с помощью фотографирования без специальных фильтров. Ни одна камера не способна корректно воспринять и оцифровать такие большие яркости. Работа с фильтрами существенно усложняет процесс создания БДДИ. Поэтому ошибки в изображении солнца будут присутствовать практически всегда. Алгоритмы моделирования освещенности должны учитывать и компенсировать эти дефекты и ошибки БДДИ.

3.3. Пространственное разрешение БДДИ

Важным фактором реалистичности сгенерированного изображения является согласованность изображений фона, полученного в результате фотографирования, и смоделированных объектов сцены. На рис. 9 приведен пример, когда четкие контуры смоделированного автомобиля контрастируют с размытыми изображениями автомобилей фона.

Для получения высококачественного итогового изображения разрешение фона, который является фрагментом панорамы БДДИ, должно быть приблизительно 2000 на 1500 точек. Предполагая, что горизонтальный угол зрения при гене-



Рис. 9. Четкое изображение смоделированного автомобиля слева контрастирует с фоновыми изображениями других автомобилей. Это ведет к потере реалистичности.

рации изображения равен 60° , а вертикальный – 45° , получаем размер панорамы БДДИ порядка 12000 на 6000 точек. Согласно спецификациям устройства SpheroCam (Spheron) [10], оно может создавать панорамы БДДИ с максимальным размером 10600 на 5300 точек. Этот размер близок к требуемому, однако, в действительности ни Spheron, ни Dosch не производят панорамы БДДИ с таким разрешением. Dosch предлагает БДДИ с “экстремально большим разрешением” 6248 на 3124 точек, что приблизительно в четыре раза меньше как наших требований, так и спецификаций прибора.

При этом стоит отметить, что при использовании БДДИ в качестве источника света для моделирования освещенности требование большого пространственного разрешения не является существенным. Эксперименты показали, что практически для всех БДДИ разрешение порядка 1600 на 800 точек является достаточным. Только в одном случае пространственное разрешение оказалось существенным. БДДИ содержало изображение солнца, видимого сквозь листву деревьев. Динамический диапазон этого БДДИ при разрешении 6200 на 3100 точек оказался почти на два порядка выше, чем диапазон этого же БДДИ, снятого с разрешением 3100 на 1550.

Интернет-сайт сообщества Hyperfocal Design [7] предлагает БДДИ с большим разрешением 10000 на 5000 точек. Однако здесь предлагается только верхняя, небесная полусфера панорамы БДДИ. Использование таких данных для генерации реалистичных изображений требует дополнительных усилий, так как панорама не может быть использована в качестве полного фона.

3.4. Время фотографирования БДДИ

Время фотографирования БДДИ является одним из главных факторов, влияющих на их качество. Из общих соображений время фотографирования БДДИ должно быть максимально коротким. В противном случае в процессе фотографирования будет изменяться снимаемое окружение и условия освещения: солнце опустится по отношению к линии горизонта с соответствующим изменением его яркости, оно может зайти за облако или объект окружения (здание, дерево). Все это приведет к тому, что часть БДДИ, отснятая сначала, не будет соответствовать его окончательной части.

Технологически БДДИ не может быть отснято за пренебрежимо малое время. Для получения действительно большого диапазона яркостей необходимо сделать порядка 25–30 снимков в од-

ном направлении, отличающихся только различными экспозициями. Для получения большого пространственного разрешения необходимо отснять больше десятка таких направлений. Цифровые камеры требуют существенного времени на сохранение изображений с большим разрешением во внешней памяти (непосредственно память камеры не рассматривается, потому что она имеет недостаточный объем) или для пересылки изображений в управляющий компьютер. Также камере необходимо время на позиционирование, установку очередной экспозиции, восстановление после серии кадров и т.д. По нашим оценкам, при управлении с компьютера камерой и ее позиционированием съемка качественного БДДИ требует около полутора часов. Понятно, что это значительное время, которое вряд ли можно позволить при съемке БДДИ снаружи помещений.

Создание же БДДИ с низким динамическим диапазоном и с небольшим пространственным разрешением требует нескольких минут. В то же время большинство существующих систем компьютерной графики используют БДДИ только в качестве фона и не нуждаются в правильном представлении яркостей. Для этих целей БДДИ, созданные фирмой Dosch и, как это было показано выше, имеющие очень слабые характеристики, являются вполне приемлемыми.

Таким образом, процесс создания качественного БДДИ достаточно трудоемок, требует хорошо отлаженной технологии и должен быть выполнен с особой тщательностью. При этом надо отметить, что, как уже говорилось ранее, с помощью цифровой камеры невозможно будет получить корректные значения яркостей в области солнца.

4. АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ НЕКОРРЕКТНОСТЕЙ БДДИ

После анализа БДДИ, реально имеющих на рынке, стало понятно, что алгоритмы моделирования освещенности и генерации реалистичных изображений должны быть модифицированы таким образом, чтобы скомпенсировать недостаток этих БДДИ.

Наиболее существенным является компенсация недостатков, связанных с заданием солнеч-

ного света (см. раздел 3.2). Следует отметить, что проблема “паразитных” солнц может быть преодолена с помощью параметров, используемых в алгоритме распознавания и выделения источника света (раздел 2.3). При правильном подборе параметров “паразитные” солнца будут объединены с источником света, расположенного в центре области основного солнца.

Другой проблемой является *недооценка яркости солнца*, которая всегда будет присутствовать даже в БДДИ с приемлемым динамическим диапазоном. Компенсировать недооценку солнца можно, взяв за основу стандартные модели неба, принятые Международной комиссией по освещению (СIE). При выделении источников света производится расчет освещенности горизонтальной поверхности от выделенного источника (т.е. солнца) и от модифицированной верхней полусферы панорамы БДДИ (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. Изменять яркость неба было бы некорректно, так как именно яркость солнца является недооцененной. Производители аппаратуры для создания БДДИ утверждают, что яркости, представляющие в БДДИ все окружение за исключением солнца, измеряются с высокой точностью.

При этом проблемой является анализ БДДИ 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 конкретного БДДИ.

На рис. 10 представлен результат работы этого алгоритма. На левом рисунке приведено изображение автомобиля, помещенного в БДДИ 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



Рис. 10. Применение компенсации некорректности задания солнца. Левое изображение было построено без компенсации, правое – с компенсацией. Хорошо видны четкие тени, соответствующие солнечному дню, которые появились в результате включения режима компенсации.

для солнечного дня, тени от солнца очень бледные. На правом рисунке представлено изображение, полученное с компенсацией неправильности задания солнца. Освещенность автомобиля стала удовлетворительной, под автомобилем видна четкая тень, соответствующая яркому, солнечному дню.

Проблема недостаточного пространственного разрешения БДДИ может быть решена с помощью следующей технологии. Будем разделять использования фонового изображения для представления фона в итоговом изображении и для построения отражений от объектов сцены. При построении отражений использование БДДИ увеличивает реалистичность изображения, но не требует большого пространственного разрешения. В то же время при представлении фона в итоговом изображении необходимо иметь достаточное пространственное разрешение, а большой динамический диапазон здесь не важен, так как в итоге изображение будет приведено к динамическому диапазону монитора. Поэтому в последнем случае для фона можно использовать простое изображение, полученное с помощью обычной цифровой камеры с разрешением от 4 мегапикселей и выше. Необходимо только, чтобы это изображение было сделано с той же позиции, что и все БДДИ.

Эта технология “двойного кадра” требует дополнительного пользовательского интерфейса для задания соответствия направлений БДДИ (“первый кадр”) и простого фонового изображения (“второй кадр”). Автоматизация этого про-

цесса требует изменения форматов либо файла БДДИ, либо файла с простым изображением. Так как в обоих случаях форматы файлов уже стандартизованы, нам показалось нецелесообразным вводить дополнительный формат.

На рис. 11 показано изображение, сгенерированное с использованием технологии “двойного кадра”, дающей хорошую степень реалистичности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практически каждый из аспектов моделирования освещенности дневным светом, заданным изображением с большим динамическим диапазоном, таких, как освещенность точки, построение теней, выделение солнца как источника света и другие, – потребовал разработки отдельных алгоритмов. Эти 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, одежда, многослойные автомобильные краски.

Однако надо отметить, что скорость расчета освещенности объектов сцены для диффузных поверхностей, а также для поверхностей, свойства которых задаются ДФО, невысока. Построение реалистичного изображения методом Монте-Карло обратной трассировки лучей требует десятков минут, а иногда и часов на современном



Рис. 11. Использование технологии “двойного кадра” для представления реалистичного фона для изображения компьютерной модели автомобиля (с разрешения фирм, указанных на рисунке).

персональном компьютере. В то же время эти вычисления, а также выделение ярких областей в отдельные источники света не зависят от пространственного разрешения БДДИ. Это позволяет использовать БДДИ большого размера без дополнительных вычислительных затрат.

Анализ нескольких десятков изображений с большим динамическим диапазоном, содержащих небо, показал, что физически корректных БДДИ практически не существует. Все БДДИ имеют недостатки в области представления солнца. Это связано с невозможностью напрямую измерить его яркость. Кроме этого, как видно из анализа, иногда БДДИ не содержат реального диапазона яркостей, а являются просто обычными фотографиями, сохраненными в формате БДДИ. Очевидно, что такие БДДИ не могут корректно задать освещение сцены, и они не могут быть использованы при синтезе реалистичных изображений. Количество же корректных БДДИ с достаточным динамическим диапазоном, которые задают освещение сцены, близкое к действительному, невелико.

В связи с этим были разработаны модификации алгоритмов, учитывающие и компенсирую-

щие известные недостатки БДДИ. Модификации позволили повысить реалистичность генерируемых изображений. В итоге реализованные алгоритмы позволяют получить более корректный результат, являются автоматическими и устойчивыми к различным ошибкам БДДИ. Это расширило число приемлемых БДДИ, которые можно использовать для синтеза реалистичных изображений. Описанные алгоритмы используются в нескольких разработанных системах компьютерной графики [14, 17–19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ward G.* Real Pixels // Arvo J. (ed.) Graphics Gems II. 1991. P. 80–83.
2. *Dicarlo J., Wandell B.* Rendering high dynamic range images. Proceedings of the SPIE: Image Sensors 3965. 2000. P. 392–401.
3. *Aggarwal M., Ahuja N.* High dynamic range panoramic imaging. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. 2001. V. 1. P. 2–9.
4. *Schechner Y.Y., Nayar S.K.* Generalized mosaicing. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. 2001. V. 1. P. 17–24.

5. *Debevec P.* Image-Based Lighting. Siggraph 2002 Tutorial. P. 26–34.
6. *Debevec P., Malik J.* Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. Computer Graphics (Proc. Siggraph 97). 1997. P. 369–378.
7. Hyperfocal Design community. <http://www.hyperfocaldesign.com>.
8. *Greene N.* Environment Mapping and Other Applications of World Projections // IEEE Computer Graphics and Applications. 1986. V. 6. № 11. P. 21–29.
9. HDRshop. <http://www.hdrshop.com>.
10. SpheronVR AG. <http://www.spheron.com>.
11. Dosch Design GmbH. <http://www.doschdesign.com>.
12. LightWave 3D. <http://www.newtek.com/lightwave/>. <http://www.hyperfocaldesign.com/tutorials/hdri-lightwave-tutorial.html>.
13. *Horn B.K.P.* Robot Vision. Cambridge, MA: MIT Press and McGraw-Hill, 1986. Русский перевод: *Хорн Б.К.П.* Зрение роботов. Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
14. *Волобой А.Г., Галактионов В.А., Дмитриев К.А., Копылов Э.А.* Двухнаправленная трассировка лучей для интегрирования освещенности методом квази-Монте Карло // Программирование. 2004. № 5. С. 25–34.
15. *Барладян Б.Х., Волобой А.Г., Галактионов В.А., Копылов Э.А.* Эффективный оператор сжатия динамического диапазона яркостей // Программирование. 2004. № 5. С. 35–42.
16. *Rea M.S.* IESNA Lighting Handbook. Reference & Application. 8th ed. New York, 1993.
17. *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. Proceedings of the 14th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2004. Moscow. September 6–11, 2004. P. 159–162.
18. *Барладян Б.Х., Волобой А.Г., Вьюкова Н.И., Галактионов В.А., Дерябин Н.Б.* Моделирование освещенности и синтез фотореалистичных изображений с использованием Интернет-технологий // Программирование. 2005. № 5. С. 66–80.
19. *Волобой А.Г., Галактионов В.А.* Машинная графика в задачах автоматизированного проектирования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2006. № 1. С. 64–73.