

УДК 681.3.06

СПЕКТРАЛЬНАЯ ТРАССИРОВКА ЛУЧЕЙ В ЗАДАЧАХ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОРЕАЛИСТИЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2011 г. Д.Д. Жданов¹, И.С. Потемин², В.А. Галактионов², Б.Х. Барладян²,
К.А. Востряков², Л.З. Шапиро²

(1) *Государственный Оптический Институт им. С.И. Вавилова*
199034 Санкт-Петербург, Биржевая линия, 12

(2) *Институт Прикладной Математики им. М.В.Келдыша РАН*
125047 Москва, Миусская пл., 4

E-mail: ddzhdanov@mail.ru, ipotemin@yandex.ru, vlgal@gin.keldysh.ru, k.vostryakov@gmail.com

Поступила в редакцию 03.03.2011 г.

Данная статья посвящена анализу ошибок цветопередачи, возникающих при компьютерном построении изображений сцен со сложными оптическими свойствами. В работе произведен анализ причин возникновения ошибок цветопередачи при построении изображений в RGB пространстве, и предложен эффективный и аккуратный алгоритм решения задач построения спектрального изображения. Предложенные решения были реализованы для программ прямой стохастической и обратной детерминистической трассировки лучей. Кроме того, для сложных сцен, содержащих смесь оптических свойств, определенных в различных моделях, включая RGB, было предложено эффективное и аккуратное решение для приведения всех оптических свойств к единой спектральной модели.

1. ВВЕДЕНИЕ

Построение фотореалистичных изображений сложных сцен, содержащих объекты со специальными свойствами пропускания, отражения и рассеивания, требует применения физически аккуратных моделей расчета яркости, формируемой данными объектами. Как правило, программы компьютерного построения изображений используют RGB представление для описания оптических свойств геометрических объектов сцены и источников света. Такое приближение используется не только в „аппаратных“ системах [1], основанных на OpenGL, но и в большинстве программ, декларирующих физическую аккуратность и фотореалистичность формируемого изображения [2, 3].

Как известно, RGB пространство ограничено, и представление положительных цветов не охватывает весь видимый спектральный диапазон. В данном контексте необходимо

различать два момента, связанных с клипированием и искажением представления цвета.

Во-первых, это искажение цвета, возникающее при расчете видимой яркости объектов сцены. Яркость в RGB представлении пропорциональна произведению компонент R, G и B освещенности объекта на соответствующие компоненты коэффициента яркости объекта в направлении наблюдения. Данное соотношение не вызывает искажения цвета только в том случае, если коэффициент яркости был изначально определен для цвета заданного источника света. Очевидно, что для сцен, в которых наблюдение осуществляется сквозь цветные стекла или зеркала, или для сцен, содержащих разноцветные источники излучения, исключить искажения цвета практически невозможно [4].

Во-вторых, это клипирование цвета на приемниках излучения. Большинство современных приемников излучения не могут воспроизвести видимую яркость или

освещенность без искажения цвета. Такие приемники излучения как ССД матрицы трансформируют спектральное распределение освещенности в RGB изображение. Естественно, такая трансформация теряет отрицательную составляющую цвета, и это невозможно исправить. Поэтому, когда мы говорим о формировании фотореалистичного изображения, мы должны понимать, что „фотореалистичность“ может уже содержать искажение цвета, и задача построения фотореалистичного изображения должна включать соответствующую модель приемника излучения [5].

Очевидно, задача построения фотореалистичных изображений содержит две независимые модели. Во-первых, построение истинного распределения освещенности или яркости на приемнике излучения, и, во-вторых, преобразование входного излучения в RGB представление. Данная работа посвящена исключительно первому аспекту, а именно, формированию распределения освещенности и яркости без искажения цвета. Единственная модель, которая гарантирует правильную цветопередачу, – спектральная модель, а единственный метод расчета освещенности и яркости – это спектральная трассировка лучей. Поэтому основной акцент данной работы – это физически точная трассировка спектральных лучей в сценах, содержащих объекты со сложными оптическими свойствами.

2. БАЗОВЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ RGB МОДЕЛИ И ОШИБКИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЦВЕТА

Преобладающее большинство компьютерных систем построения изображений используют аддитивное RGB представление цвета в описаниях оптических свойств объектов сцены. Объекты сцены, обладающие цветными свойствами, можно разделить на две основные группы. Во-первых, это первичные источники, излучающие свет, и, во-вторых, это вторичные источники, отражающие, преломляющие и рассеивающие свет.

В случае первичного источника света RGB цвет вычисляется в соответствии с известными CIE формулами [6]:

$$\left. \begin{aligned} x &= \int_{380}^{780} \bar{x}_{\lambda} \varphi d\lambda \\ y &= \int_{380}^{780} \bar{y}_{\lambda} \varphi d\lambda \\ z &= \int_{380}^{780} \bar{z}_{\lambda} \varphi d\lambda \end{aligned} \right\} \Rightarrow rgb = M \cdot xyz \quad (1)$$

где:

- \bar{x}_{λ} , \bar{y}_{λ} , \bar{z}_{λ} , – функции чувствительности XYZ для стандартного наблюдателя,
- $\varphi(\lambda)$ – функция плотности распределения яркости (или другой фотометрической величины),
- x , y , z – координаты цвета в XYZ пространстве,
- M – матрица преобразования координат цвета из XYZ в RGB пространство [12].

Известно, что хотя представление цвета в виде RGB каналов охватывает весь видимый спектральный диапазон, составляющие цвета могут быть отрицательными числами. Рис. 1 демонстрирует так называемый цветовой треугольник, показывающий координаты всех положительных R, G и B цветов в системе координат x и y цветности, а также область спектра, которая содержит отрицательные значения R, G или B каналов.

В компьютерных вычислениях, как и в системах отображения цифрового изображения, используются положительные значения для отображения RGB цвета. Очевидно, что такое ограничение цветового представления приводит к ошибкам отображения цвета. Для оценки ошибки цветоощущения, как правило, используется выражение цвета в Lab пространстве. Международным комитетом CIE был определен ряд стандартов цветового различия: CIE76 [7], CIE94 и CIEDE2000 [8]. Используя формулы цветового различия, можно оценить ошибку цветоощущения (ΔE_{ab}^*), вызванную клиппированием отрицательных значений RGB пространства.

В случае вторичного источника света более корректно говорить о цвете поверхности как о реакции поверхности на падающий

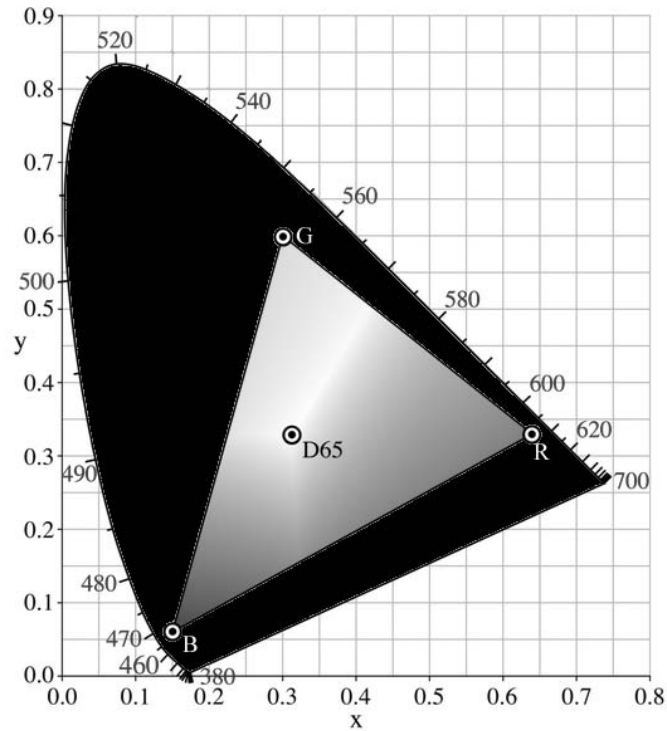


Рис. 1. Область положительных RGB цветов в видимом спектральном диапазоне.

свет. Поскольку поверхность не обладает собственным цветом, то в RGB пространстве под цветом поверхности, как правило, понимают нормированный отраженный (преломленный или рассеянный) цвет от стандартного белого источника света, например, D65. Общий алгоритм вычисления RGB цвета поверхности выглядит следующим образом:

$$\left| \begin{array}{l} x_{D65} = \int_{380}^{780} \bar{x}_{\lambda} D65(\lambda) d\lambda \\ y_{D65} = \int_{380}^{780} \bar{y}_{\lambda} D65(\lambda) d\lambda \\ z_{D65} = \int_{380}^{780} \bar{z}_{\lambda} D65(\lambda) d\lambda \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} x_{\rho} = \int_{380}^{780} \bar{x}_{\lambda} \rho(\lambda) D65(\lambda) d\lambda \\ y_{\rho} = \int_{380}^{780} \bar{y}_{\lambda} \rho(\lambda) D65(\lambda) d\lambda \\ z_{\rho} = \int_{380}^{780} \bar{z}_{\lambda} \rho(\lambda) D65(\lambda) d\lambda \end{array} \right|$$

$$rgb_{D65} = M \cdot xyz_{D65} \quad rgb_{\rho} = M \cdot xyz_{\rho}$$

$$r = \frac{r_{\rho}}{r_{D65}}; \quad g = \frac{g_{\rho}}{g_{D65}}; \quad b = \frac{b_{\rho}}{b_{D65}} \quad (2)$$

где:

$\rho(\lambda)$ – спектральные свойства отражения (пропускания) поверхности.

В реальных сценах, как правило, используется сложное освещение, в котором присутствуют источники света различного цвета, и, кроме того,

зеркальные и преломляющие цветные объекты добавляют виртуальные цветные источники освещения. В результате в реальной сцене не существует такого источника света, чей цвет можно было бы использовать как базовый цвет для расчета цветов объектов сцены. Поэтому для расчета цветов объектов сцены, в качестве базового цвета, как правило, используется белый цвет, например, источник D65. Очевидно, что такое решение может привести к искажению цвета объекта в реальной сцене.

3. ПРОБЛЕМЫ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ РЕНДЕРИНГА В RGB ПРОСТРАНСТВЕ

В предыдущей главе рассматривались основные проблемы цветопередачи при выполнении компьютерного моделирования в RGB пространстве. В данной главе будут рассмотрены проблемы решения уравнения рендеринга в RGB пространстве. Уравнение рендеринга определяет яркость в направлении наблюдения как сумму собственной яркости наблюдаемого объекта и яркости, рассеянной данным объектом в направлении наблюдения

[3, 9]. Для статических сцен уравнение рендеринга, определяющее яркость объекта в точке \vec{p} , направлении \vec{v} и для цветовой компоненты c , можно записать следующим образом:

$$L = (\vec{p}, \vec{v}, c) = \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \frac{n_O^2}{n_S^2} (L_0(\vec{p}, \vec{v}, c) + \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) E_\omega(\vec{p}, \vec{v}', c) d\omega) \quad (3)$$

где:

$L_0(\vec{p}, \vec{v}, c)$ – собственная яркость объекта в точке наблюдения;

$\tau(\vec{p}, \vec{v}, c)$ – пропускание (прозрачность) среды между наблюдателем и точкой наблюдения;

$BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c)$ – функция двунаправленного рассеивания от источника освещения в направлении на наблюдателя;

$E_\omega(\vec{p}, \vec{v}', c)$ – локальная освещенность объекта в точке наблюдения, созданная по направлению \vec{v}' от источника света в телесном угле $d\omega$;

n_O, n_S – показатели преломления сред наблюдателя и наблюдаемой поверхности соответственно.

Основным и аккуратным методом решения уравнения рендеринга является метод трассировки лучей. В лучевом подходе интегрирование по сфере выполняется посредством трассировки лучей в направлении всех возможных источников излучения, и уравнение рендеринга принимает следующий вид:

$$L = (\vec{p}, \vec{v}, c) = \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \frac{n_O^2}{n_S^2} (L_0(\vec{p}, \vec{v}, c) + \frac{1}{\pi} \sum_{for\ all\ rays} BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) E_i(\vec{p}, \vec{v}', c)) \quad (4)$$

где:

$E_i(\vec{p}, \vec{v}', c)$ – локальная освещенность объекта в точке наблюдения, созданная i -м лучом по направлению \vec{v}' , созданная i -м лучом.

В случае моделирования в RGB пространстве цвета поверхностей $BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', RGB)$ и $\tau(\vec{p}, \vec{v}, RGB)$ приводятся к одним условиям освещения, как правило, к белому источнику D65. Данное упрощение приводит к ошибке светопередачи, вызванной неоднозначной зависимостью спектрального состава излучения от RGB цвета. На примере яркости света, рассеянного поверхностью, неоднозначность выглядит следующим образом:

$$BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', RGB) E_i(\vec{p}, \vec{v}', RGB) \neq RGB[BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', \lambda) E_i(\vec{p}, \vec{v}', \lambda)] \quad (5)$$

То есть использование RGB пространства для моделирования не гарантирует правильной цветопередачи. Следующие два примера визуально демонстрируют искажение цвета, вызванное вычислениями в RGB пространстве. На данных простых примерах результаты рендеринга в RGB пространстве сравниваются с результатами спектрального рендеринга.

В первом примере красный источник света, заданный в видимой области спектра (спектрограмма источника света показана на рисунке 2(a)), освещает сферическую зеленую поверхность (спектральный коэффициент отражения показан на рисунке 2(b)). RGB цвет зеленой поверхности рассчитан при условии освещения поверхности белым источником D65.

Изображение сферы, освещенной красным источником света, показано на рисунке 3. Поскольку изображение зеркально симметрично, то для удобства сравнения результатов левая половина изображения была рассчитана в RGB пространстве, а правая половина – в спектральном пространстве.

В данном примере разница цветов обусловлена тем, что цвет источника света в сцене отличается от опорного цвета, используемого для вычисления цвета поверхности. Однако разница цветов может возникнуть при освещении источником света того же цвета. На следующем примере белый свет (спектрограмма источника света показана на рисунке 4(a)) освещает зеленую сферическую поверхность (спектральный коэффициент отражения показан на рисунке 4(b)).

Поскольку спектрограмма белого света отличается от базового источника D65, хотя их RGB практически совпадают, результирующие цвета в RGB и спектральной модели отличаются друг от друга. Аналогично рисунку 3 левая половина изображения на рисунке 5 была рассчитана в RGB пространстве, а правая половина – в спектральном пространстве.

Решение уравнения рендеринга в RGB пространстве имеет принципиальное ограничение. Этим ограничением является невозможность моделирования дисперсионных эффектов, то есть зависимости направления распространения света от длины волны света. В случае дисперсионного рассеивания яркость в

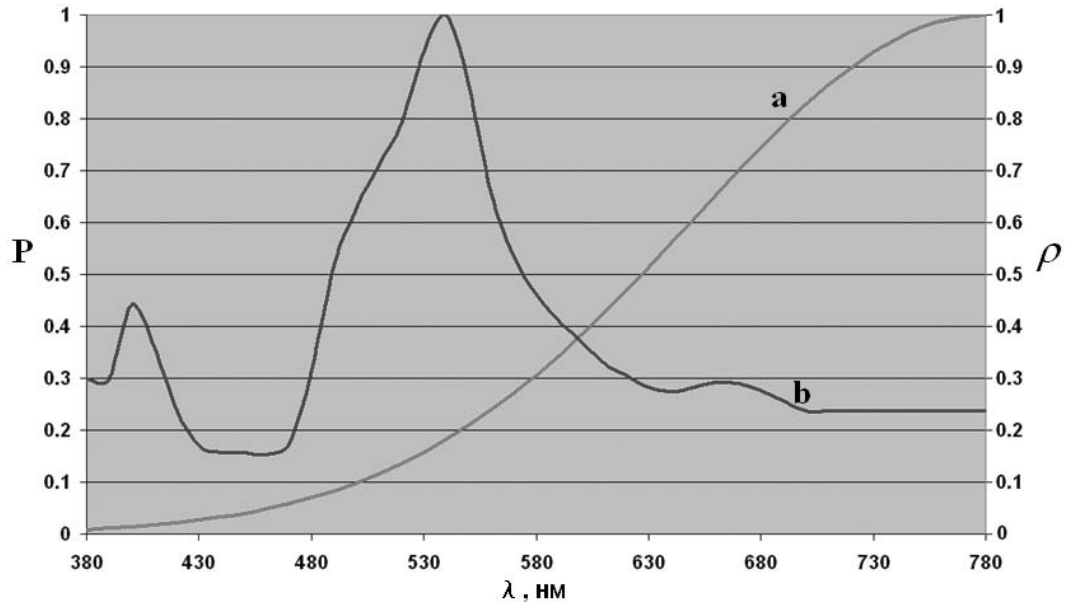


Рис. 2. (а) Спектрограмма источника света, (b) спектральный коэффициент отражения поверхности.

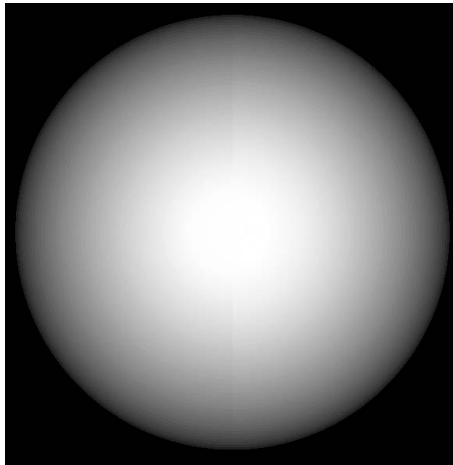


Рис. 3. Изображения сферы. Левая половина в RGB пространстве, правая половина в спектральном пространстве.

выбранном направлении равна нулю, поскольку рассеивание осуществляется в бесконечно узком спектральном интервале. Поэтому в случае дисперсии имеет смысл говорить о спектральном коэффициенте пропускания (отражения) для заданной длины волны $\tau(\vec{p}; \vec{\nu}, \lambda)$, то есть об отношении плотности потока прошедшего (отраженного) излучения к плотности потока падающего излучения.

Физически аккуратное построение изображений сцен, содержащих диспергирующие элементы, возможно, если при моделировании спектральная область разбивается на большое количество узких спектральных областей.

Рисунок 6 демонстрирует изображение дисперсионного пятна рассеивания, созданного стеклянной призмой, освещенной белым коническим источником D65.

Аналогичный подход мог бы быть применен и в RGB пространстве, например, каждому цветному каналу сопоставить свою длину волны ($R \approx 620$ нм, $G \approx 540$ нм, $B \approx 460$ нм). Однако малое количество цветных каналов (R, G и B) приводит к дискретности изображения, в результате чего оно выглядит неестественным. Рисунок 7 демонстрирует аналогичную модель дисперсионного рассеивания стеклянной призмы, выполненную в RGB пространстве.

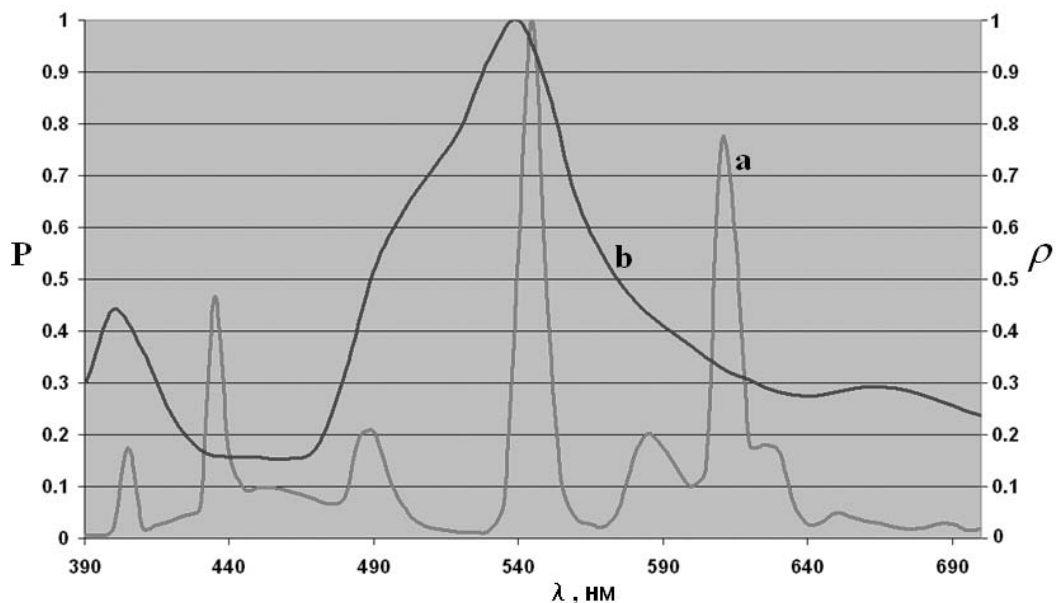


Рис. 4. (а) Спектрограмма источника света, (b) спектральный коэффициент отражения поверхности.

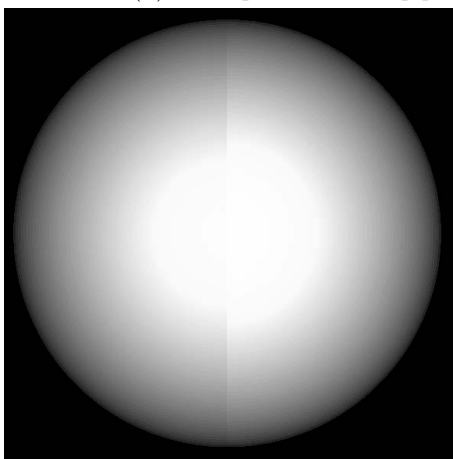


Рис. 5. Изображения сферы. Левая половина в RGB пространстве, правая половина в спектральном пространстве.

4. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ РЕНДЕРИНГА В СПЕКТРАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Физически аккуратное решение уравнения рендеринга может быть найдено только в спектральном пространстве. Технически возможны три основных способа решения уравнения рендеринга (3). Во-первых, трассировка лучей может быть выполнена для ряда „монохроматических“ сцен, оптические свойства каждой из которых определены для одной длины волны. Финальный результат – это сумма отдельных „монохроматических“ расчетов. Во-вторых, для сцены, оптические свойства которой определены в широкой области

спектра, можно трассировать отдельные „монохроматические“ лучи, то есть лучи, чьи свойства определены для одной длины волны. Естественно, „монохроматические“ лучи должны покрывать весь спектральный интервал и вносить соответствующую часть спектральной энергии в финальный результат. В-третьих, для сцены, определенной в широкой области спектра, возможна трассировка „полихроматических“ лучей, то есть лучей, чьи спектральные свойства определены во всем спектральном интервале. Финальный результат в данном случае – это есть собственно результат „полихроматического“ расчета.

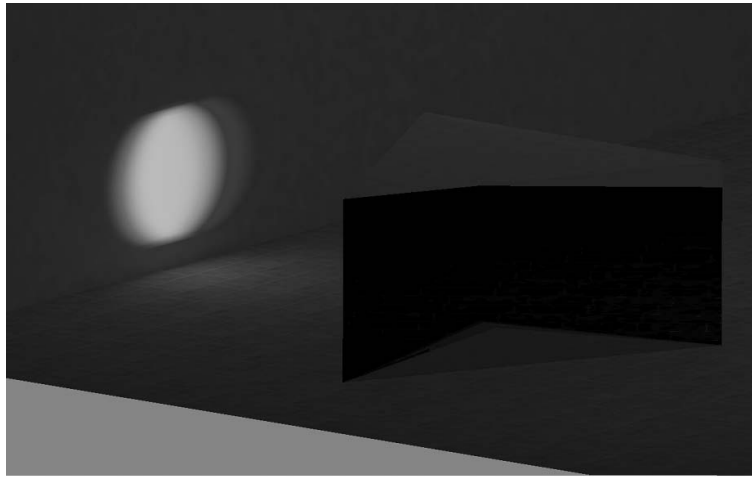


Рис. 6. Изображение дисперсионного пятна, сформированного стеклянной призмой. Моделирование производилось в видимом диапазоне на 81 длине волны.

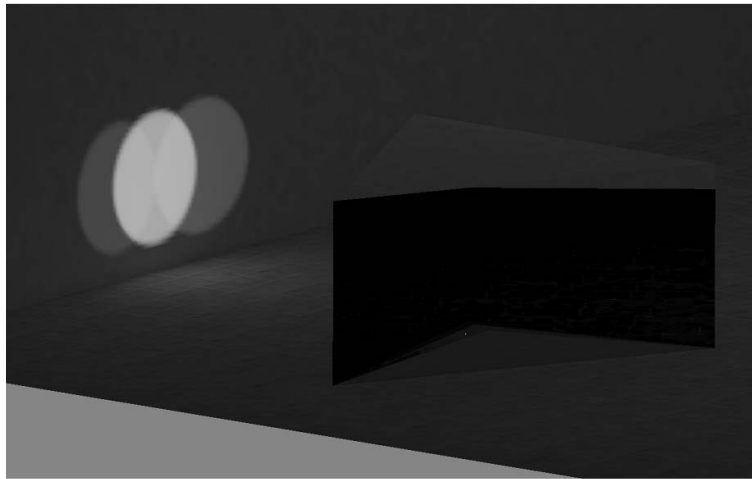


Рис. 7. Изображение дисперсионного пятна, сформированного стеклянной призмой. Моделирование производилось в RGB пространстве.

Рассмотрим более подробно преимущества и недостатки каждого из решений. Схематически первое решение, представленное на рисунке 8, выглядит наиболее простым.

Формируется N независимых сцен (по числу длин волн, используемых в вычислениях) с оптическими свойствами, определенными для выбранных длин волн. Оптические свойства источников (LS) света задаются в виде спектрального распределения плотности потока излучения. Такой вид задания наиболее удобен для любого из видов спектрального моделирования, поскольку исключает ширину спектрального интервала, и спектральные данные могут быть применены к любому

набору длин волн. В результате моделирования формируются N „монохроматических“ изображений, которые могут быть объединены в изображение, содержащее спектральную плотность яркости для данного набора длин волн. Применяя выражения (1), формируется изображение в RGB пространстве, которое не содержит ошибок преобразования цвета в процессе трассировки лучей. Данное („монохроматическое“) решение было реализовано как расширение программного комплекса SPECTER [10], работавшего до сих пор исключительно в RGB пространстве. Для автоматического формирования спектральных сцен был разработан генератор сцен,

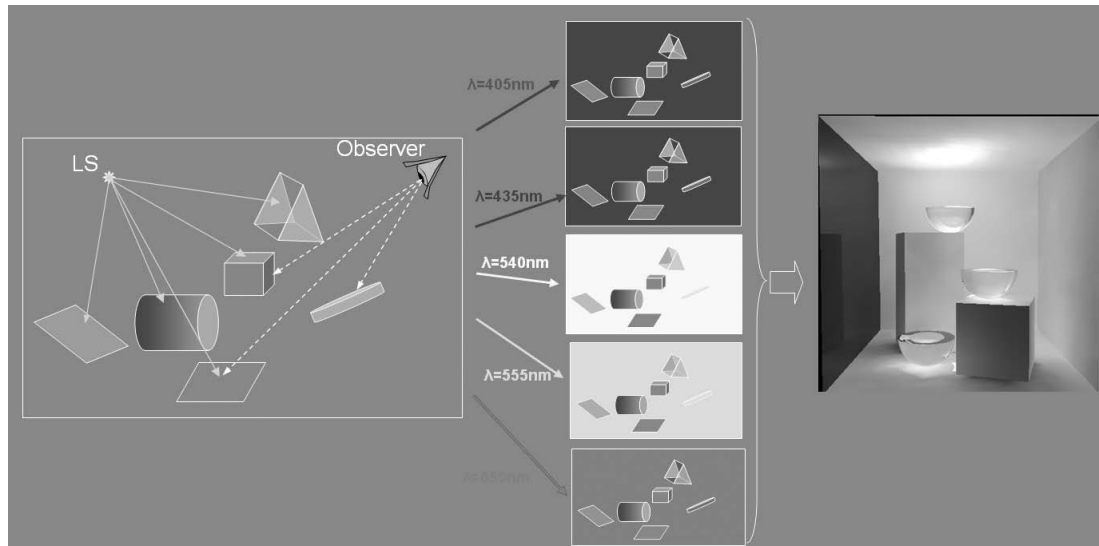


Рис. 8. Схематическое представление первого способа решения уравнения рендеринга в спектральном пространстве.

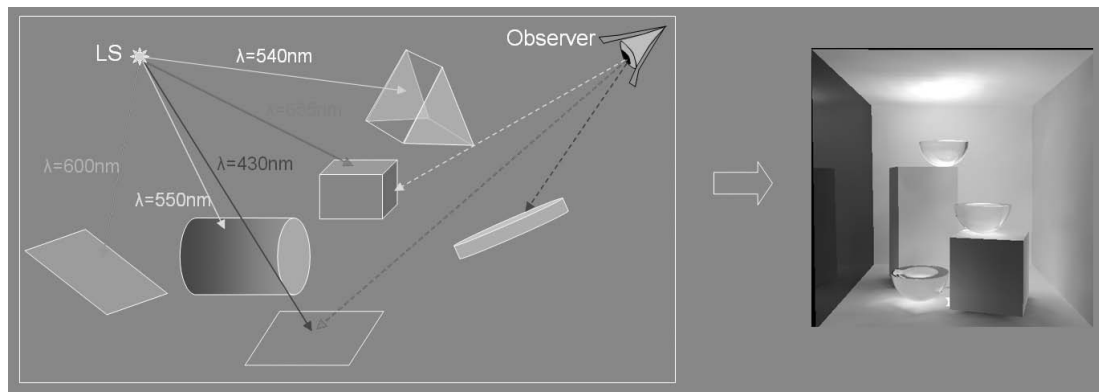


Рис. 9. Схематическое представление второго способа решения уравнения рендеринга в спектральном пространстве.

преобразующий набор спектральных данных в соответствующий набор независимых сцен. По окончании расчета отдельные изображения складывались в единое RGB изображение.

Данное решение оказалось недостаточно эффективным, поэтому единственным его преимуществом являлась простота реализации (оно может быть применено практически к любому рендереру). Следующее возможное решение задачи спектрального моделирования – это трассировка „монохроматических“ лучей в спектральной сцене. Схематически данное решение изображено на рисунке 9.

„Монохроматические“ лучи испускаются для всего набора длин волн, определенных в сцене, однако в отличие от предыдущего

способа спектрального моделирования, энергия лучей определяется не спектральной плотностью потока, а собственно спектральным потоком. Необходимость денормализации от плотности потока к собственно величине потока объясняется возможной непостоянностью спектрального интервала. Выражение (6) демонстрирует простейший способ денормализации спектральной плотности потока.

$$P(\lambda_i) = \phi(\lambda_i) \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}{2} \quad (6)$$

где:

$\phi(\lambda_i)$ – спектральная плотность потока $P(\lambda_i)$.

По окончании расчета поток, переносимый лучом, обратно нормируется, что позволяет

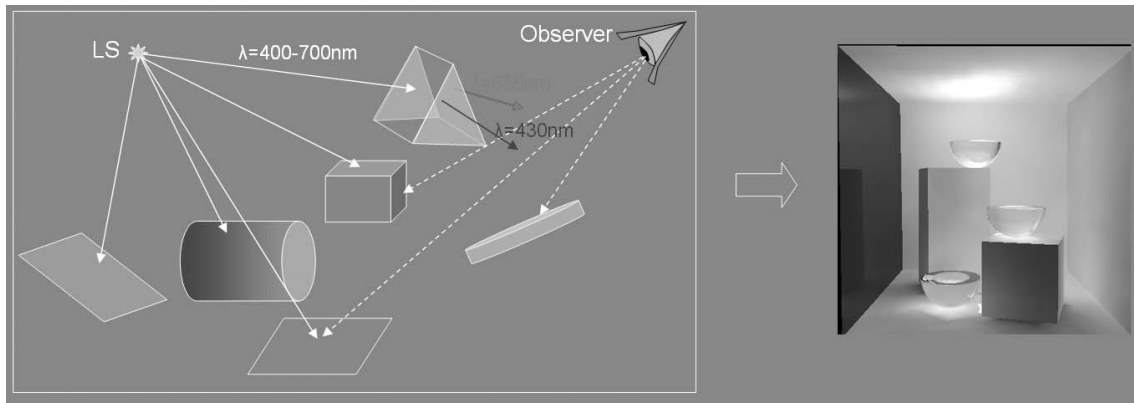


Рис. 10. Схематическое представление третьего способа решения уравнения рендеринга в спектральном пространстве.

получить результат в виде спектральной плотности заданной световой величины и применить выражения (1) для представления результата в RGB пространстве. В зависимости от способа спектрального моделирования (детерминистический или стохастический, прямой или обратный) луч может переносить как собственно спектральную энергию, так и единичную энергию, при этом вероятность его испускания будет пропорциональна энергии в спектральном интервале.

Очевидно, единственное преимущество данного решения – это удобство работы. Все спектральные данные инкапсулированы в одной сцене, и изображение строится в течение одного спектрального расчета. Однако эффективность спектральных вычислений не превышает эффективности предыдущего решения. В данной работе было предложено эффективное решение для спектральной трассировки лучей в сценах, определенных во всей спектральной области. Это решение предполагает трассировку „полихроматического“ луча. Схематически алгоритм трассировки луча представлен на рисунке 10.

Идея метода заключается в следующем. Источник света или камера испускает луч, который определен во всем спектральном интервале. Данный луч распространяется в сцене, и на всех не диспергирующих поверхностях преобразование луча осуществляется для всего спектрального диапазона. Данное преобразование аналогично цветному преобразованию в RGB пространстве, когда

вместо R, G и B компонент выступает денормализованная спектральная плотность. В случае детерминистического преобразования лучей (расчет видимой яркости, например) – это простое произведение денормализованных спектральных световых характеристик луча на соответствующие значения спектральных коэффициентов поверхности.

В случае стохастической прямой трассировки луча ситуация сложнее. Во-первых, вероятностным образом, в соответствии со спектральными мощностями K источников света, выбирается источник i , который испускает луч:

$$\frac{\sum_{j=1}^{i-1} \sum_{\lambda} P_j(\lambda)}{\sum_{j=0}^K \sum_{\lambda} P_j(\lambda)} \leq \xi < \frac{\sum_{j=1}^i \sum_{\lambda} P_j(\lambda)}{\sum_{j=0}^K \sum_{\lambda} P_j(\lambda)} \quad (7)$$

где: ξ – случайное число, равномерно распределенное между 0 и 1.

Аналогичным вероятностным образом выбираются точка начала, направление и спектральный состав луча. Затем спектральная энергия луча нормируется к единичной энергии:

$$p(\lambda_n) = \frac{P_i(\lambda_n)}{\sum_{l=1}^N P_i(\lambda_l)} \quad (8)$$

При отсутствии дисперсии, луч сохраняет весь спектральный диапазон длин волн при любой трансформации на объекте. В этом случае спектральное преобразование аналогично преобразованию луча в RGB пространстве. То есть в соответствии со спектральными характеристиками рассеивающего объекта и спектрограммой луча выбирается направление

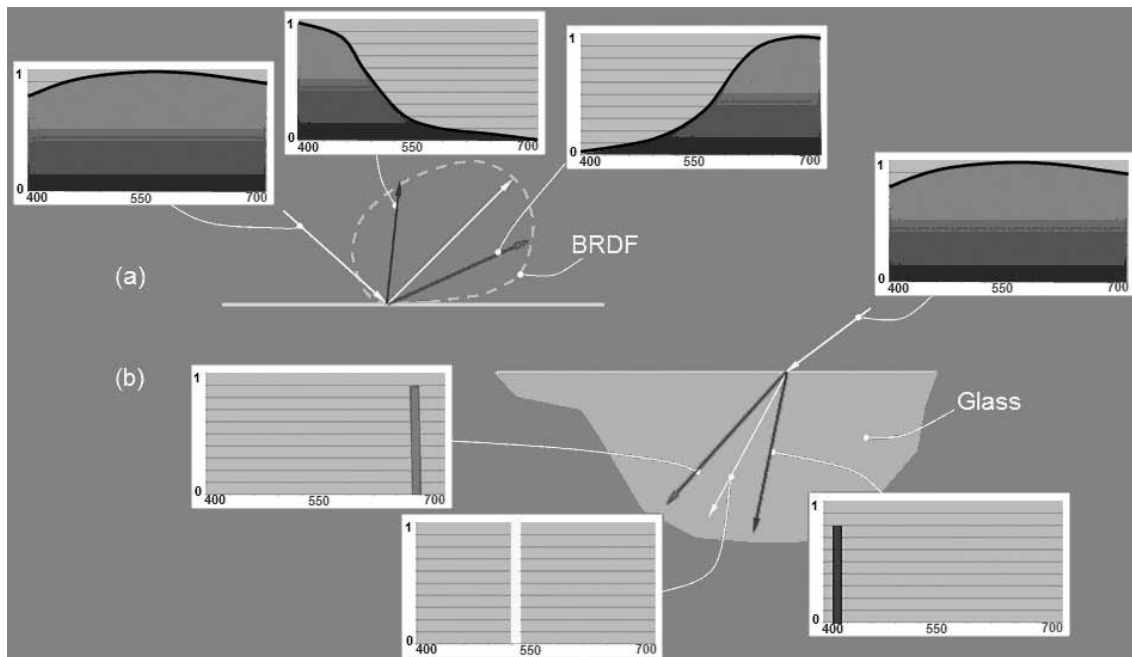


Рис. 11. Два способа преобразования спектральных лучей на поверхности: (а) случай диффузного рассеивания, (б) случай дисперсионного рассеивания.

нового луча и его спектральный состав. Спектральная мощность луча нормируется к единичной мощности (8). Схематически процесс спектрального рассеивания на диффузной поверхности показан на рисунке 11(а).

Более интересен случай спектральной трансформации луча на диспергирующей поверхности. Для данных поверхностей не существует направления рассеивания, в котором представлен весь спектральный состав луча. Поэтому единственное решение – это преобразование „полихроматического“ луча в „монохроматические“ лучи. Схематически данный процесс изображен на рисунке 11(б). В случае детерминистической трассировки в точке дисперсии формируется пучок „монохроматических“ лучей, количество которых равно количеству длин волн в спектральном составе луча. Каждый луч имеет собственное направление и рекурсивно трассируется из данной точки. По окончании рекурсивной трассировки последнего луча в точке дисперсии собирается полный спектральный состав луча.

Дисперсия в случае стохастической трассировки обрабатывается вероятностным образом. При использовании алгоритма „русской рулетки“ трассируется только один луч и

не допускается никакой рекурсии. Поэтому из „полихроматического“ луча, представляющего широкий спектр, с вероятностью, пропорциональной денормализованной энергии луча на длинах волн, выбирается один n -ый „монохроматический“ луч, который продолжает стохастическое распространение в сцене:

$$\sum_{l=1}^{n-1} p(\lambda_l) \leq \xi < \sum_{l=1}^n p(\lambda_l) \quad (9)$$

В случае использования метода „русской рулетки“ энергия луча (как „полихроматического“, так и „монохроматического“) нормируется к единице. Поэтому энергия, переносимая единичным лучом, не несет достоверной информации о спектральном составе излучения. Истинный спектральный состав формируется на приемниках излучения как вероятность выбора луча определенной длины волны. Нормализация спектральных характеристик к плотности этих характеристик (6) производится на приемниках излучения.

Эффективность приведенного решения для сцен со сложной геометрией очевидна. В сложных сценах основная часть времени (до 90%) расходуется на трассировку луча, а

именно, на поиск точки пересечения луча с геометрическими объектами сцены. Поэтому, хотя преобразования в широкой области спектра значительно замедляют эффективность рендеринга, общая эффективность остается значительно выше, чем эффективность рендеринга, основанная на независимой трассировке лучей, определенных на одной длине волны. Дисперсионные эффекты, разбивающие луч, определенный в широкой области спектра, на индивидуальные „монохроматические“ лучи, как правило, незначительно снижают общую эффективность работы программы. Во-первых, для большинства сцен доля диспергирующих элементов незначительна в общем объеме сцены, а, во-вторых, вероятность возникновения дисперсии на первом же элементе трассы луча тоже недостаточно велика.

Данное решение было реализовано в программном комплексе INSPIRER2 для режимов прямой стохастической и обратной детерминистической трассировки лучей. Это позволило осуществлять физически аккуратный и эффективный рендеринг спектральных сцен с учетом непрямого освещения.

В рамках данной работы был реализован метод спектрального моделирования, основанный на трассировке „полихроматического“ луча в спектральной сцене (расширение программного комплекса INSPIRER2). Было произведено сравнение разработанного метода с методом, основанным на расчете набора независимых „монохроматических“ сцен (используемым в программном комплексе SPECTER).

Изображения, формируемые этими методами, неотличимы, однако эффективность их вычислений различна. Ниже показаны два типичных изображения спектральных сцен. Рисунок 12 демонстрирует сцену, в которой отсутствуют дисперсионные элементы, а рисунок 13 – сцену, содержащую дисперсионные элементы (как правило, дисперсионные элементы занимают меньшую часть объема сцены). Спектральные расчеты проводились на 41 длине волны.

Таблица 1 содержит значения времени рендеринга, включающего как прямую, так и

обратную трассировку лучей, выполненного на компьютере Intel Core2 Duo T9400 2.53 GHz.

Видно, что решение, используемое для „полихроматической“ трассировки лучей, значительно эффективнее, чем выполнение расчетов на отдельных длинах волн. Кроме того, замедление, вызванное эффектом дисперсии, незначительно влияет на общее время рендеринга.

5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ЛУЧА С RGB ОБЪЕКТАМИ СЦЕНЫ

В большинстве случаев при работе со сценами, содержащими сложные объекты окружения, такие как обычные или HDR1 текстуры, не удается полностью определить оптические свойства сцены в спектральном представлении. В данной ситуации возникает вопрос об оптимальном решении для аккуратного рендеринга, хотя говорить о полной физической аккуратности невозможно.

Существуют два основных решения. Во-первых, одновременная трассировка в двух пространствах (спектральном и RGB). То есть, все, что можно трассировать в спектральном пространстве, трассируется в спектральном пространстве. Все остальное трассируется в RGB пространстве. В результате формируются два изображения – спектральное и RGB. Финальное изображение в RGB пространстве – это сумма двух изображений. Второе решение – это перевод всех оптических свойств, определенных в RGB пространстве, в спектральное представление и выполнение трассировки лучей исключительно в однородном спектральном пространстве.

В данной задаче нами было выбрано второе решение. Основные причины: во-первых, оно технически проще, а во-вторых, оно несколько точнее, поскольку исключает промежуточное клипирование цвета, которое может возникнуть при переходе от спектрального к RGB пространству.

Очевидно (1) обратное преобразование из RGB в спектр неоднозначно, и существует бесконечное количество спектральных кривых, которые могут сформировать один и тот же RGB цвет. Поэтому основными критериями трансформации RGB данных в спектральное представление являются максимальная



Рис. 12. Изображение сцены со спектральными свойствами в отсутствии дисперсии.

равномерность спектральных данных и, для оптических свойств поверхностей, не превышение единичного коэффициента спектрального отражения (пропускания).

Для преобразования RGB данных в спектральное представление предлагалось большое количество решений. Например, [11] предлагает формировать спектральную кривую как сумму спектральных кривых основных цветов (красного, зеленого, голубого, желтого, цианового и магенты). Хотя спектральная кривая получается достаточно равномерной, недостатком этого и ряда других методов являлась неточность преобразования цвета поверхностей, связанная с выполнением условия максимально допустимого спектрального коэффициента отражения (пропускания).

В данной работе было предложено эффективное и аккуратное решение, позволяющее формировать спектральные кривые по RGB данным. Поскольку преобразование спектральных данных в RGB представление линейно, то спектральное распределение можно выразить следующим образом:

$$P(\lambda_l) = w_l^R \cdot r + w_l^G \cdot g + w_l^B \cdot b \quad (10)$$

где коэффициенты w_l^R , w_l^G , w_l^B определяются из условий минимальной вариации спектральной кривой и обратимости.

При преобразовании RGB данных в спектральное представление используются два основных решения. Для простых данных, как то коэффициенты отражения или пропускания, конвертация выполняется в процессе загрузки сцены. Поэтому рендеринг работает исключительно со спектральными данными. Для сложных объектов, как то текстура или HDRi источник излучения, преобразование в спектральное представление откладывается на момент трассировки луча. Поэтому при попадании луча на такой объект RGB данные конвертируются в спектральное представление. Поскольку выражение (10) не является трудоемким, никакого замедления практически не происходит. Кроме того, отложенная конвертация цвета позволяет существенно уменьшить требования к объему оперативной памяти, что важно для сцен, содержащих высококачественные текстуры или HDRi источники.

В качестве примера рендеринга, выполненного в пространстве, содержащем смесь RGB и спектральных данных, рисунок 14 демонстри-



Рис. 13. Изображение сцены, содержащей диспергирующие оптические элементы.

Таблица 1: Время рендеринга для различных типов сцен и моделей спектрального расчета.

Модель спектрального расчета	Сцена, рисунок 12	Сцена, рисунок 13
„Монохроматическая“ трассировка отдельных сцен	52 .3мин.	19.4 мин.
„Полихроматическая“ трассировка лучей в единой спектральной сцене	16.9 мин.	6.8 мин.

рует изображение автомобиля, вычисленное в спектральном пространстве на 41 длине волны. Автомобиль покрыт краской, для которой была определена двунаправленная спектральная функция отражения. Автомобиль освещался источником света, определенным в виде HDRI в RGB пространстве.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Искажение цветопередачи делает, в большинстве случаев, невозможным использование RGB пространства для задач построения фотореалистичных изображений.

Поэтому единственное возможное решение для обеспечения физически аккуратного рендеринга – это спектральная трассировка лучей.

В рамках программного комплекса INSPIRER2 был реализован эффективный и физически аккуратный алгоритм спектральной трассировки обратного детерминистического и прямого стохастического лучей, что позволило выполнять спектральный рендеринг в сценах с многократным диффузным рассеиванием и дисперсией. Кроме того, были реализованы алгоритмы эффективного и аккуратного



Рис. 14. Пример рендеринга, выполненного в пространстве, содержащем смесь RGB и спектральных данных.

преобразования оптических свойств сцены, определенных в RGB пространстве, в однородное спектральное представление. Это позволило осуществлять спектральный рендеринг в сценах со сложным окружением, например, освещенных HDRI источником света.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантами Президента РФ НШ-8129.2010.9, РФФИ № 10-01-00302, а также компанией Integra Inc.

Авторы выражают свою признательность В.Г. Соколову и А.А. Гарбулю за предоставленные примеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kilgard M.J., Akeley K.* Modern OpenGL: its design and evolution / SIGGRAPH Asia'08.
2. *Jensen H.W., Christensen P.* High quality rendering using ray tracing and photon mapping / SIGGRAPH'07.
3. *Pharr M., Humphreys G.* Physically Based Rendering – From Theory to Implementation // Morgan Kaufmann, 2004.
4. *Reinhard E., Ward G., Johnson G.* Color imaging / August 2009, SIGGRAPH'09.
5. *Reinhard E., Stark M., Shirley P., Ferwerda J.* Photographic Tone Reproduction for Digital Images / SIGGRAPH 2002.
6. *Волосов Д.С., Цибкин М.В.* Теория и расчет светоптических систем. // „Искусство“, Москва – 1960.
7. *Sharma G.* Digital Color Imaging Handbook // CRC Press, 2003.
8. *Sharma G., Wu W., Dalal E.N.* The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations / ECE Dept, Univ. of Rochester, Rochester, NY 14627-0126, USA; Xerox Corporation, 800 Phillips Road, Webster, NY 14580.
9. *Kajiya J.T.* The rendering equation / Siggraph 1986: 143.
10. <http://www.integra.jp/en/index.html>
11. *Smits B.* An RGB to Spectrum Conversion for Reflectances / University of Utah, January 21, 2000.
12. *Hoffmann G.* (2000), CIE Color Space [Online]: www.fho-enden.de/hoffmann/ciexyz29082000.pdf