

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА РАССЕЯННОГО СВЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А.А. Гарбуль³, Д.Д. Жданов^{1,2,3}, И.С.Потемин^{1,2}, В.Г.Соколов²
НИУ ИТМО¹, ИПМ им. М.В. Келдыша², ГОИ им. С.И. Вавилова³

В работе предлагается использование стохастического метода двунаправленной трассировки лучей для расчета сложных осветительных систем и анализа рассеянного света в оптических системах. Рассматриваются алгоритмы двунаправленной стохастической трассировки лучей. Работа иллюстрируется примерами расчета осветительных систем и анализом рассеянного света.

1. Введение

Несмотря на то, что современные оптические устройства могут содержать специальные материалы и структуры, вызывающие эффекты поляризации, дифракции и интерференции света, моделирование и проектирование подавляющего большинства оптических устройств базируется на использовании лучевых моделей. Например, детерминированная трассировка лучей, предполагающая строгий порядок чередования поверхностей, взаимодействующих с лучом, решает большинство классических задач линзовой оптики, связанных с расчетом aberrаций, построением и оптимизацией качества изображения оптических систем. Однако применение детерминистических методов трассировки лучей затрудняет моделирование таких эффектов как блики, возникающие между отдельными поверхностями линз, или рассеивание света на элементах конструкции оптической системы. Кроме того, существует большое количество оптических устройств, где детерминистические методы трассировки лучей абсолютно неприемлемы. Например, в растровых или светорассеивающих осветительных системах порядок чередования поверхностей и направление преобразованного луча определяется стохастическим образом. Кроме того, осветительное устройство может применяться в сложной трехмерной сцене и цель проектирования может сводиться к вычислению световых характеристик, например, освещенности, на объектах сцены. Рис. 1 демонстрирует примеры ограниченности детерминистических методов трассировки лучей.

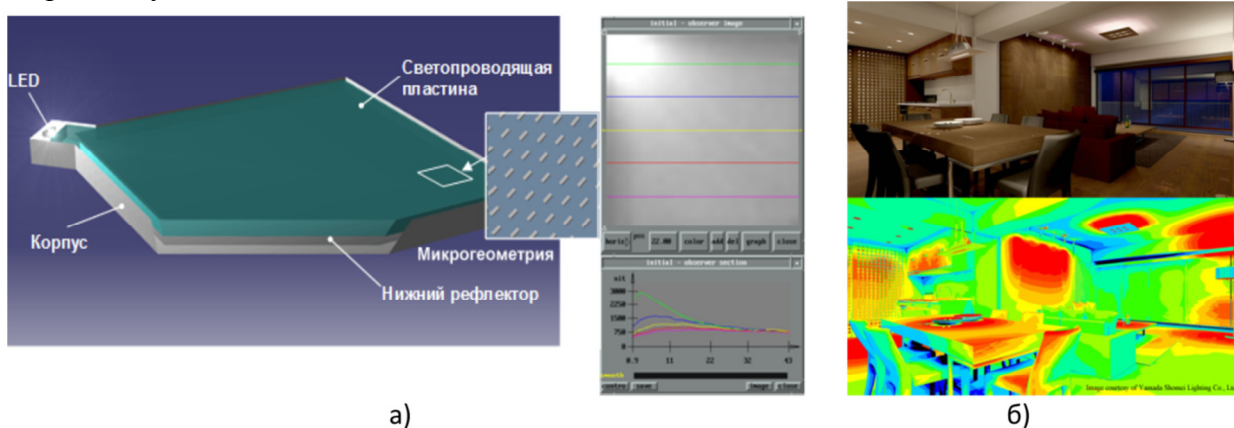


Рис. 1. Расчет распределений (а) яркости экрана дисплея, (б) освещенности помещения

Для решения задач моделирования и проектирования оптических устройств, элементы которых имеют сложные свойства отражения и пропускания, определяемые двунаправленными функциями рассеивания (ДФР), являющимися спектральными коэффициентами яркости поверхности от углов освещения и наблюдения, применяется уравнение рендеринга [1], имеющее следующий вид:

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \left(L_0(\vec{p}, \vec{v}, c) + \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) L(\vec{p}, \vec{v}', c) (\vec{n} \cdot \vec{v}') d\omega \right) \quad (1)$$

где:

$L_0(\vec{p}, \vec{v}, c)$ – собственная яркость объекта в точке наблюдения $\vec{p}$, направлении наблюдения $\vec{v}$ и для компоненты цвета c .

$\tau(\vec{p}, \vec{v}, c)$ – пропускание (прозрачность) среды между наблюдателем и точкой наблюдения, $BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c)$ – ДФР поверхности от источника освещения $\vec{v}'$ в направлении на наблюдателя,

$L(\vec{p}, \vec{v}', c)$ – яркость внешнего освещения в телесном угле $d\omega$, направленная в точку наблюдения.

$\vec{n}$ – локальная нормаль в точке наблюдения.

В оптическом устройстве, предполагающем диффузные переотражения света, уравнение (1) перерастает в бесконечную рекурсивную сумму интегралов яркости по полной сфере. Причина такого усложнения заключается в том, что яркость, стоящая в подынтегральном выражении, сама вычисляется с помощью интеграла (1). Естественно, в общем случае, детерминистические методы не позволяют решить данное уравнение с бесконечной рекурсией. Поэтому для решения задач моделирования распространения света в сложных осветительных устройствах используются методы Монте-Карло, а именно метод «русской рулетки».

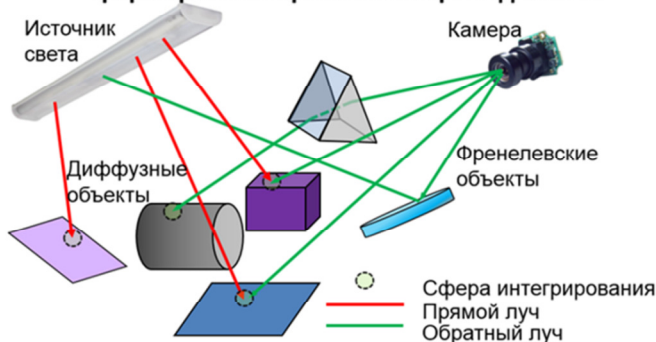
Метод Монте-Карло является лишь средством решения интегрального уравнения (1), а собственно вычисление локальных яркостей осуществляется методами стохастической трассировки лучей. Существует большое количество вариаций методов стохастической трассировки лучей от прямой [2], обеспечивающей высокую эффективность моделирования оптических устройств с высоким коэффициентом передачи энергии от источника на приемник излучения, до различных вариаций двунаправленной трассировки лучей, когда подынтегральная яркость (1) вычисляется в областях пересечения трасс лучей, распространяющихся от источников света и от наблюдателя.

2. Метод двунаправленной стохастической трассировки лучей

Методы решения уравнения (1) с помощью двунаправленной стохастической трассировки [3, 4] лучей известны достаточно давно, но их применение было ограничено недостаточной мощностью вычислительных систем (главным образом недостатком оперативной памяти). Суть этих методов сводится к последовательной трассировке прямых (от источников света) и обратных (от приемников излучения) лучей и вычислению подынтегральной яркости (1) областях пересечения трасс этих лучей. Рис. 2 иллюстрирует данный алгоритм.

Обратная трассировка лучей, расчет вторичной яркости и

формирование фотонных карт видимости



Прямая трассировка лучей и расчет вторичной яркости

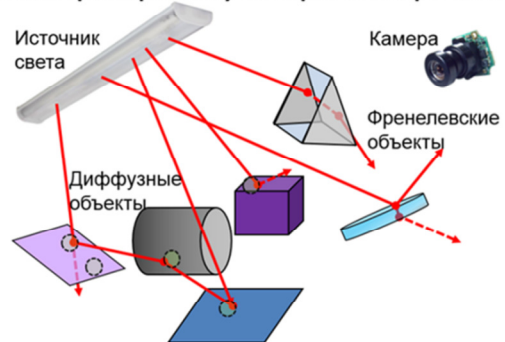


Рис. 2. Алгоритм двунаправленной стохастической трассировки лучей

В данной работе авторами был изменен классический порядок трассировки лучей. В целях экономии оперативной памяти сперва выполняется стохастическая трассировка лучей

от наблюдателя (приемников излучения), а затем от источников света. Стохастическая трассировка лучей предполагает случайный характер преобразования луча на элементе оптического устройства [2]. То есть, при попадании луча на элемент оптического устройства случайным образом выбирается характер взаимодействия луча с поверхностью (отражение, пропускание, рассеивание), а затем для выбранного характера взаимодействия случайным образом выбирается направление его распространения. Событие поглощения луча приводит к прекращению его трассировки.

Обратная стохастическая трассировка лучей формирует так называемые фотонные карты видимости сцены (или оптического устройства) и в точках взаимодействия луча с рассеивающими объектами сцены вычисляет яркость, формируемую первичными источниками света. Вычисление первичной яркости выполняется стохастическим интегрированием уравнения (1), где $L(\vec{p}, \vec{v}', c)$ будет ограничена яркостью первичных источников света и поэтому интегрирование не требует никаких рекурсивных вычислений и ограничивается как правило несколькими лучами. Глубина обратной трассы лучей (сколько актов взаимодействия луча с элементами оптического устройства допускается лучу) может быть произвольной (начиная от первого источника вторичной яркости и даже неограниченной). В последнем случае двунаправленная трассировка лучей сводится к обратной трассировке лучей методом Монте-Карло. Глубина обратной трассировки лучей не влияет на результат моделирования, однако она влияет на процесс сходимости (преобладание высокочастотного или низкочастотного шума в результирующем изображении) и выбирается из условий моделирования и параметров оптического устройства. В процессе трассировки обратных лучей их параметры (координаты, направление, спектральный состав) сохраняются на элементах оптической системы в виде так называемых фотонных карт. Также фотонная карта сохраняет основные параметры элемента оптического устройства в точке падения луча, необходимые для вычисления локальной вторичной яркости (локальная нормаль и радиус сферы интегрирования вторичной яркости). Радиус сферы интегрирования выбирается исходя из разрешения приемника излучения, то есть радиус сферы интегрирования должен быть соизмерим с размером проекции ячейки приемника излучения на поверхность наблюдения. Естественно, чем меньше радиус сферы интегрирования, тем точнее вычисляется вторичная яркость.

На втором этапе выполняется прямая стохастическая трассировка лучей. Каждый луч (фотон), распространяющийся от источника света, переносит долю светового потока источника света и, при попадании луча в соответствующую сферу интегрирования, энергия фотона пересчитывается в яркость на приемнике излучения. Для расчета вторичной яркости с использованием фотонных карт уравнение рендеринга (1) более удобно записать в виде суммы яркостей, создаваемых всеми фотонами, попадающими в сферу интегрирования луча, выпущенного из камеры:

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \frac{1}{\pi} \sum_i^{all\ photons} BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) E_i(\vec{p}, \vec{v}', c) \quad (2)$$

$$E_i(\vec{p}, \vec{v}', c) = \frac{F_i(\vec{p}, c)}{\pi R^2}$$

где:

$E_i(\vec{p}, \vec{v}, c)$ – освещенность сферы интегрирования радиуса R , создаваемая потоком i -ого прямого луча $F_i(\vec{p}, c)$ в точке $\vec{p}$.

Уравнение (2) справедливо для расчета яркости на поверхностях объектов оптического устройства. Однако источником яркости может служить рассеивающая среда. В этом случае формирование фотонных карт видимости происходит на эффективных рассеивающих частицах, когда трасса обратного луча меняет направление, а вторичная яркость формируется как результат пересечения прямых лучей соответствующих сфер интегрирования, сформированных в объеме рассеивающей среды. Уравнение рендеринга для вторичной яркости в рассеивающей среде приобретает следующий вид.

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = \frac{\tau(\vec{p}, \vec{v}, c)}{\pi^2 R^2} \frac{\sum_c \tau(\vec{p}, \vec{v}, c)}{\sum_c \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \varepsilon(\vec{p}, \vec{v}, c)} \sum_i^{all\ photons} P(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) F_i(c) \quad (3)$$

где:

$P(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c)$ – спектральная фазовая функция рассеивающей среды для цветовой компоненты c в точке $\vec{p}$ и направлениях наблюдения и освещения $\vec{v}$ и $\vec{v}'$ соответственно,

$\varepsilon(\vec{p}, \vec{v}, c)$ – спектральное сечение экстинкции рассеивающей среды.

В результате последовательных фаз прямой и обратной трассировок лучей на приемнике излучения формируется изображение в виде распределения яркости. Интегрирование яркости в ячейке приемника по всем направлениям наблюдения позволяет получить значение освещенности в ячейке приемника, а интегрирование по поверхности приемника в заданном направлении наблюдения – интенсивность излучения, приходящего на приемник в данном направлении.

Принимая во внимание ограничение физической памяти компьютера, количество фотонов в карте видимости также ограничено (как правило не более 10 000 000 сфер интегрирования). Такое количество фотонов недостаточно для формирования распределения яркости с приемлемым уровнем шума. Поэтому процесс обратной и прямой трассировок лучей с соответствующими дополнительными расчетами первичной и вторичной яркостей итерационно повторяется до тех пор, пока качество распределения не достигнет требуемого уровня. Рис. 3 демонстрирует процесс сходимости расчета освещенности помещения (3а – после первой итерации, 3б – после второй итерации и 3в – после 62-ой итерации).



Рис. 3. Сходимость метода двунаправленной стохастической трассировки лучей

3. Примеры использования метода двунаправленной трассировки лучей для моделирования оптических устройств

Метод двунаправленной стохастической трассировки лучей был реализован в программном комплексе Lumiscept [5]. Основное преимущество данного метода над прямой стохастической трассировкой лучей это высокая эффективность. Для достижения заданной точности распределения яркости на поверхности приемника излучения данный метод требует в сотни раз меньшее время вычислений и может быть использован для эффективного моделирования рассеянного света или проектирования сложных осветительных систем. На рис. 4 приводится результат моделирования блика фотографического объектива, возникающего от источника света, расположенного вне поля зрения. Рис. 4в – это фотографируемый объект, 4б – это модель фотографического изображения с бликом, а 4а – это чистое изображение блика.

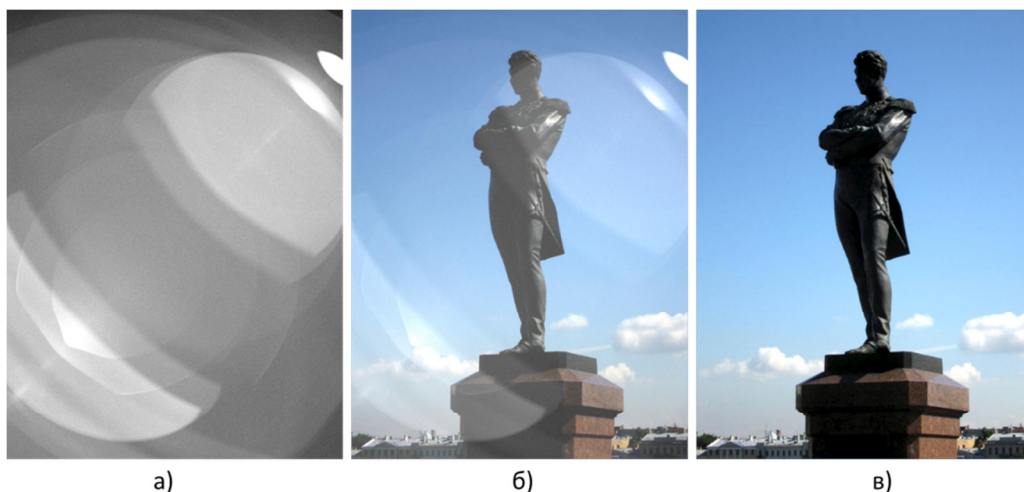
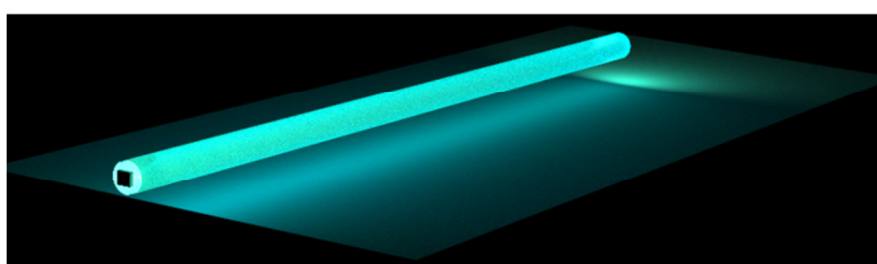


Рис. 4. Расчет фотографического изображения с бликом, формируемым внеполевым источником света

Двунаправленная стохастическая трассировка лучей может быть также использована для проектирования различного класса осветительных систем. Рис. 5а демонстрирует возможность использования данного метода для моделирования гибких осветителей, имеющих торцевую подсветку и создающих излучение за счет рассеивания света внутри материала световода, а рис. 5б – для моделирования осветительных огней автомобиля.



а)

Рис. 5. Расчет яркости: а) световода с объемным рассеиванием, б) заднего фонаря автомобиля



б)

4. Литература

- [1] Kajiya, J. T. The rendering equation / Siggraph 1986: 143.
- [2] Д.Д. Жданов, А.А. Гарбуль, В.А. Майоров, И.С. Потемин, В.Г. Соколов Недетерминированная трассировка лучей в задачах анализа светорассеивания и проектирования осветительных систем // Оптический журнал, Т. 81, № 6, 2014.
- [3] Henrik Wann Jensen, Per Christensen. High quality rendering using ray tracing and photon mapping /SIGGRAPH '07.
- [4] Toshiya Hachisuka and Henrik Wann Jensen. Stochastic progressive photon mapping. ACM Trans. Graph., 28(5):1–8, 2009.
- [5] Lumicept – Integra Inc. <http://www.integra.jp/en/products/lumicept>