

# ФОТОРЕАЛИСТИЧНАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕМНОГО РАССЕИВАНИЯ В ЗАДАЧЕ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ

Д. Жданов

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург

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

Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

А. Гарбуль

Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

А. Волобой, В. Галактионов, С. Ершов, И. Потемин, В. Соколов

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

## Аннотация

Данная статья посвящена разработке физически корректной модели рендеринга сцен, содержащих объекты с объемным рассеиванием и объекты, находящиеся в рассеивающей среде. В качестве базового подхода решения уравнения рендеринга использовался метод двунаправленной стохастической трассировки лучей. Было разработано два подхода, отличающихся эффективностью решения для различных параметров рассеивающей среды, как правило, концентрации рассеивающих частиц. Приведенные примеры иллюстрируют возможность применения разработанных моделей, как для фотореалистичной визуализации сцен с объектами и в объектах объемного рассеивания, так и для моделирования осветительных устройств, построенных на основе эффектов объемного рассеивания.

*Ключевые слова:* Сцена, объемное рассеивание, рендеринг, двунаправленная трассировка лучей, стохастическая трассировка лучей, фотореалистичное изображение.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На настоящий момент наиболее эффективным решением уравнения рендеринга для задачи построения фотореалистичного изображения является двунаправленная стохастическая трассировка лучей. Метод двунаправленной трассировки лучей имеет большое количество алгоритмических модификаций [1 – 3]. Основная вариация алгоритмов сводится к порядку расчета трасс лучей (сначала трассируются прямые лучи, а потом обратные или наоборот), типам фотонных карт, которые сохраняются в результате расчета (сохраняются карты только прямых лучей, только обратных лучей или карты всех лучей) и способу хранения и обработки фотонных карт. Алгоритмы также варьируются по глубине интегрирования первичной и каустической яркости вдоль трассы луча и учету физических явлений, возникающих в процессе взаимодействия луча с объектами сцены (учет спектральных и поляризационных характеристик излучения и оптических свойств объектов сцены). При этом первичная яркость вычисляется случайным «сканированием» источников света в точке наблюдения, а вторичная яркость – интегрированием световых фотонов, попавших в область видения лучей, испущенных из камеры, или интегрированием обратных лучей, попавших в область фотонов, испущенных источниками света. Приведенные модели хорошо адаптированы для вычисления яркости поверхностей объектов сцены. Однако в случае рассеивания света внутри

материалов сцены задача вычисления яркости сильно усложняется. Во-первых, физически аккуратное моделирование эффекта объемного рассеивания требует применения спектральных методов трассировки лучей и, соответственно, создания, хранения и использования спектральных фотонных карт. Хранение фотонных карт в RGB пространстве (для экономии оперативной памяти) приводит к потере точности спектрального моделирования и, следовательно, непригодно. Вторая серьезная проблема моделирования эффекта объемного рассеивания – это «разреженность» фотонных карт. Если в случае поверхностного рассеивания фотоны концентрируются на поверхностях сцены и их плотность высока, то в случае объемного рассеивания, например, тумана, фотоны рассеиваются в объеме и их плотность становится на порядок ниже. В результате, вероятность того, что события экстинкции прямого и обратного луча произойдут в пределах одной небольшой сферической области (источника формирования вторичной яркости рассеивающей среды) крайне мала, и большая часть лучей трассируется вхолостую. Все это приводит к появлению значительного случайного шума на изображении сцены. Поэтому для уменьшения шума изображения сцены, необходимо повысить количество независимых локальных «источников» формирования вторичной яркости, приходящихся на одну трассу луча.

В рамках данной работы рассматриваются общие принципы построения модели фотореалистичной визуализации объектов объемного рассеивания и решения, позволяющие значительно снизить шум изображения, возникающий на объектах объемного рассеивания. В рамках разработанной модели возможна, как визуализация собственно материалов с объемным рассеиванием, так и визуализация объектов, находящихся в среде объемного рассеивания, например, в тумане.

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ РЕНДЕРИНГА

Двунаправленная стохастическая трассировка лучей является одним из способов решения уравнения рендеринга [4], которое определяет яркость цветовой компоненты объекта  $c$  в точке поверхности  $\vec{p}$  с локальной нормалью  $\vec{n}$  и в направлении  $\vec{v}$ . Для статических сцен уравнение рендеринга можно записать следующим образом:

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

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

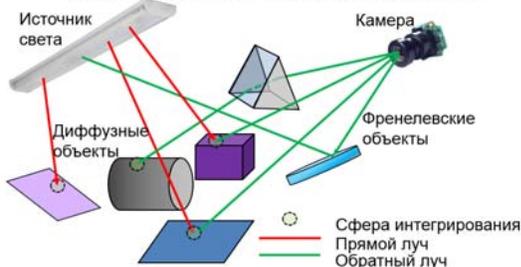
$\tau(\vec{p}, \vec{v}, c)$  – пропускание (прозрачность) среды между наблюдателем и точкой наблюдения;

$BPDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c)$  – коэффициент яркости поверхности (или двунаправленная функция рассеяния (ДФР)) от источника освещения  $\vec{v}'$  в направлении  $\vec{v}'$  на наблюдателя;

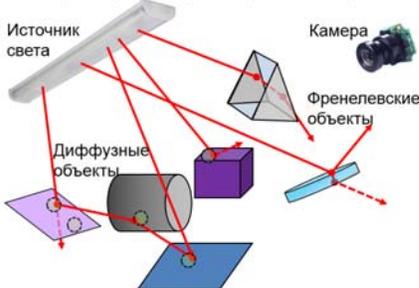
$L(\vec{p}, \vec{v}', c)$  – яркость внешнего освещения в телесном угле  $d\omega$  по направлению  $\vec{v}'$  на точку наблюдения  $\vec{p}$ .

Уравнение рендеринга (1) – это уравнение с бесконечной рекурсией, а двунаправленная стохастическая трассировка луча позволяет физически корректно выполнить бесконечное интегрирование наиболее эффективным образом. Для решения уравнения рендеринга авторами был разработан алгоритм двунаправленной стохастической трассировки лучей, в котором на первой стадии трассируются обратные лучи, вычисляется прямая яркость и сохраняются фотонные карты видимости сцены. При этом глубина диффузной трассировки лучей и, соответственно, глубина сохранения фотонных карт видимости сцены может быть переменной, что в предельном случае (бесконечная глубина трассировки обратного луча) может свести данный алгоритм к методу обратной стохастической трассировки лучей. На второй стадии трассируются прямые лучи, и в местах пересечения прямых лучей с фотонными картами (сферами, в пределах которых происходит интегрирование вторичной яркости) видимости сцены вычисляются вторичные и каустические яркости. Рис. 1 схематично иллюстрирует разработанный алгоритм двунаправленной трассировки лучей.

**Обратная трассировка лучей, расчет вторичной яркости и формирование фотонных карт видимости**



**Прямая трассировка лучей и расчет вторичной яркости**



**Рис. 1. Двунаправленная стохастическая трассировка лучей**

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:

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

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

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

Очевидно, что в данном виде решение применимо только к объектам поверхностного рассеяния. Случай объемного рассеяния отличается тем, что как таковая поверхность объемного рассеяния отсутствует и рассеивание света (и, следовательно, источник вторичной яркости) формируется на виртуальной частице. При этом размеры, форма, относительный показатель преломления частицы и концентрация частиц в объеме сводятся к фазовой функции (аналог ДФР поверхности) и сечениям рассеяния и поглощения частиц [5]. Попадание луча (прямого и обратного) на частицу и последующее рассеивание света частицей моделируется случайным образом. Во-первых, формируется длина свободного прямолинейного распространения света в среде объемного рассеяния. Данная длина определяется случайным образом в соответствии с сечением экстинкции (сумма сечений поглощения и рассеяния). На конце пути свободного пробега происходит случайный выбор между событиями рассеяния и поглощения (в соответствии с сечениями рассеяния и поглощения). В случае рассеяния изменяется цвет луча (в соответствии со спектральными характеристиками объемлющей среды) и собственно случайное рассеивание луча (в соответствии с фазовой функцией рассеяния частицы).

Алгоритмы стохастической трассировки лучей между поверхностями сцены и между виртуальными рассеивающими частицами имеют много общего, поэтому адаптация уравнения рендеринга (1), приведенная в следующей главе, может позволить физически корректно вычислять яркость рассеивающей среды методами двунаправленной стохастической трассировки лучей.

**3. ПРИМЕНЕНИЕ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ РЕНДЕРИНГА В СРЕДЕ ОБЪЕМНОГО РАССЕИВАНИЯ**

Очевидно, что точки излома (события экстинкции) направления луча в среде объемного рассеяния являются аналогами рассеивающих поверхностей сцены и формируют яркость внутри данной среды. По аналогии с уравнением (2) можно написать уравнение вычисления вторичной яркости внутри рассеивающей среды [5]. Основные отличительные особенности данного уравнения – это то, что двунаправленная функция рассеяния поверхности заменяется фазовой функцией рассеивающей среды, а освещенность поверхности – объемной плотностью излучения.

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = \frac{3\tau(\vec{p}, \vec{v}, c)}{4\pi^2 R^3} \sum_i^{all\ photons} P(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) F_i(c) S_{C_i}(\vec{p}, \vec{v}) S_{L_i}(\vec{p}, \vec{v}),$$

$$S_{C_i}(\vec{p}, \vec{v}) = \frac{\sum_c \tau(\vec{p}, \vec{v}, c)}{\sum_c \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \epsilon(\vec{p}, \vec{v}, c)},$$

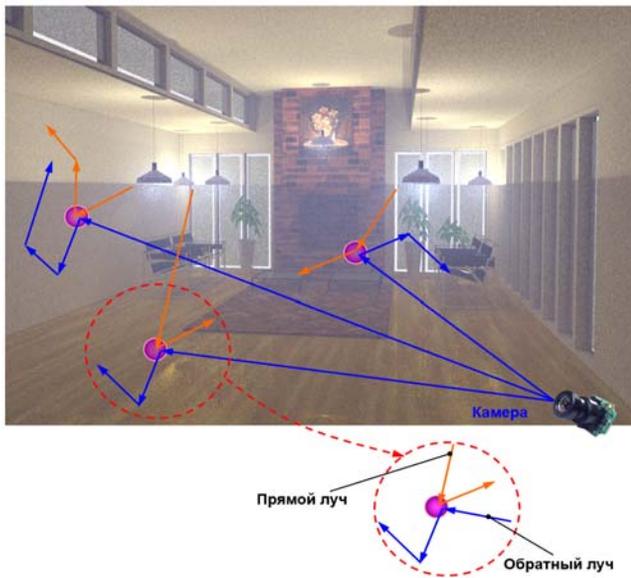
$$S_{L_i}(\vec{p}, \vec{v}) = \frac{\sum_c F_i(\vec{p}, c)}{\sum_c F_i(\vec{p}, c) \epsilon(\vec{p}, \vec{v}, c)},$$

(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;

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

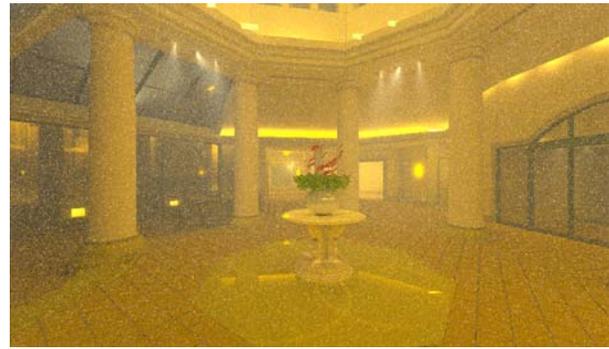
Рис. 2 иллюстрирует принцип работы алгоритма стохастической двунаправленной трассировки лучей в рассеивающей среде, когда события экстинкции прямого и обратного луча совмещены внутри одной сферы интегрирования.



**Рис. 2: Двунаправленная стохастическая трассировка лучей в среде объемного рассеивания (события экстинкции прямого и обратного лучей происходит в одной сфере интегрирования)**

Для вычисления яркости среды объемного рассеивания достаточно ограничиться моделью вторичного освещения с нулевой глубиной диффузной трассировки лучей, поскольку первичная яркость, как правило, отсутствует, а резкие тени внутри среды не возникают.

Рис. 3 демонстрирует изображение комнаты, заполненной туманом с концентрацией капель водяного пара, равной 0.01%. Время расчета составило 8 часов.



**Рис. 3. Модель изображения комнаты в тумане (концентрация капель водяного пара равна 0.01%)**

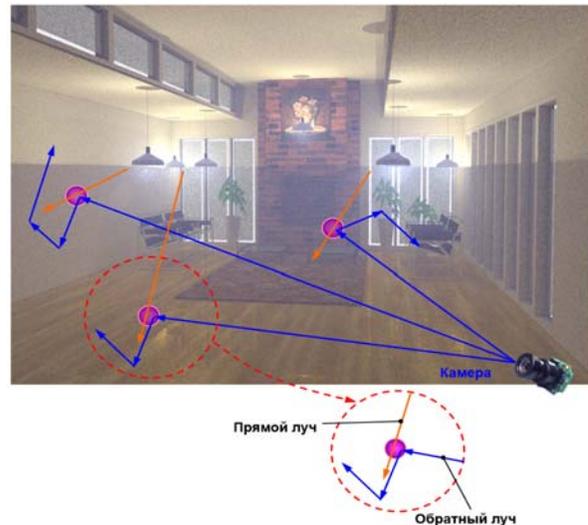
Очевидно, что основным недостатком полученного изображения – это высокий уровень шума, который обусловлен низкой вероятностью совпадения позиций экстинкций прямых и обратных лучей. Такая ситуация возникает при малом значении сечений экстинкции рассеивающей среды (например, низкой концентрации рассеивающих частиц).

Для уменьшения уровня шума изображения в средах с малыми значениями сечений экстинкции был предложен альтернативный метод вычисления вторичной яркости рассеивающей среды. Его суть сводится к накоплению яркости от лучей, которые пересекают сферы интегрирования обратных лучей. Естественно, что лучей, которые пересекают сферу интегрирования, значительно больше, чем лучей, чьи события экстинкции происходят внутри данной сферы. При этом уравнение вторичной яркости приобретает следующий вид:

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = \frac{\tau(\vec{p}, \vec{v}, c)}{\pi^2 R^2} \sum_i^{all\ photons} P(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) F_i(c) S_{C_i}(\vec{p}, \vec{v}).$$

(4)

Рис. 4 иллюстрирует принцип работы алгоритма стохастической двунаправленной трассировки лучей в рассеивающей среде, когда сфера интегрирования собирает световую энергию всех лучей, пересекающих ее.



**Рис. 4. Двунаправленная стохастическая трассировка лучей в среде объемного рассеивания (прямой луч пересекает сферу интегрирования обратного луча)**

Рис. 5 демонстрирует изображение комнаты, полученное альтернативным методом, за время расчета, равное 8 часам.



Рис. 5. Альтернативная модель изображения комнаты в тумане (концентрация капель водяного пара равна 0.01%)

#### 4. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФОТОРЕАЛИСТИЧНОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕМНОГО РАССЕИВАНИЯ

Два подхода, основанные на решениях уравнения рендеринга (3) и (4), были реализованы в программной модели стохастической двунаправленной трассировки лучей программного комплекса Lumiscept [6]. Данные решения могут быть использованы для построения фотореалистичных изображений объектов объемного рассеивания (а также объектов, находящихся в рассеивающей среде). Практическое применение разработанных решений показало, что альтернативный подход, как правило, более эффективен для сред с низкой концентрацией рассеивающих частиц.

Рис. 6 демонстрирует изображение комнаты, заполненной туманом с концентрацией капель водяного пара (PVC), варьирующейся от 0.01 до 0.1%.

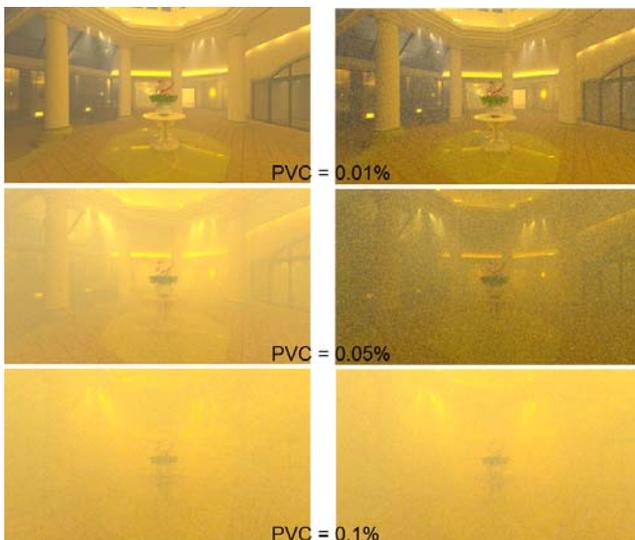


Рис. 6. Модель изображения комнаты в тумане (справа базовая модель, слева альтернативная)

Видно, что в случае высокой концентрации рассеивающих частиц эффективность обоих решений практически одинакова, однако при низкой концентрации частиц альтернативный метод выигрывает. Кроме того, при сильном уровне шума изображение кажется более темным, что объясняется наличием небольшого количества сверхярких точек.

Разработанные программные решения нашли применение для моделирования оптических устройств, например, диффузных световодов с диодной подсветкой, показанных на рис.7 и 8. В данном случае концентрация частиц в среде световода достаточно высока и базовый метод расчета обеспечивает более высокое качество изображения сцены.

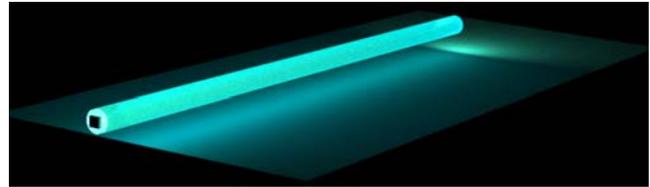


Рис. 7. Модель диффузного световода с диодной подсветкой (базовая модель)

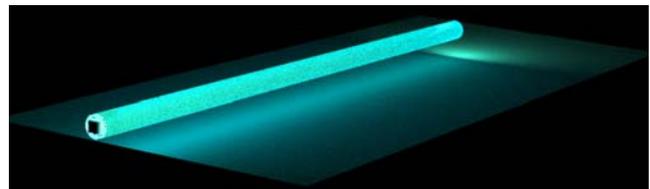


Рис. 8. Модель диффузного световода с диодной подсветкой (альтернативная модель)

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках программного комплекса Lumiscept [6] были реализованы два физически корректных программных подхода к решению уравнения рендеринга для вычисления значения яркости рассеивающей среды. Разработанные программные модели позволяют осуществлять фотореалистичную визуализацию, как собственно материалов с объемным рассеиванием, так и объектов, находящихся в среде объемного рассеивания. Кроме того, данные программные модели позволяют осуществлять анализ и проектирование осветительных устройств, основанных на использовании объектов с объемным рассеиванием.

Модель рассеивающей среды была реализована в спектральном пространстве, а поляризационные эффекты были поддержаны для прямой трассировки лучей, что обеспечивает физически корректный результат наблюдения в неполяризованном пространстве.

#### 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), грантов РФФИ № 12-01-00560 и 13-01-00454, а также компании Integra Inc.

## 7. ССЫЛКИ

- [1] Henrik Wann Jensen, Per Christensen. High quality rendering using ray tracing and photon mapping /SIGGRAPH '07.
- [2] Matt Pharr, Greg Humphreys. Physically Based Rendering - From Theory to Implementation // Morgan Kaufmann, 2004.
- [3] Toshiya Nishikubo and Henrik Wann Jensen. Stochastic progressive photon mapping. ACM Trans. Graph., 28(5): 1 – 8, 2009.
- [4] Kajiya, J.T. The rendering equation / Siggraph 1986: 143.
- [5] Борен К., Хафман Д.. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986.
- [6] <http://www.integra.jp/en>

## Abstract

The article is devoted to design of physically correct rendering model of scenes with and inside of volume scattering objects. Base solution of the rendering equation was Monte-Carlo bidirectional ray tracing. Two effective solutions of the rendering equation for different parameter of the volume scattering was developed. As an example, the article is illustrated with rendering results of the scene with different fog parameters and LCD based light guide with volume scattering.

**Keywords:** *Scene, volume scattering, rendering, bidirectional ray tracing, stochastic ray tracing, photorealistic visualization.*