

Модель сложного источника излучения в методе двунаправленной стохастической трассировки лучей*

Д.Д. Жданов¹, А.А. Алейников¹, Е.В. Кудреватых¹, В.И. Валиев²

ddzhdanov@mail.ru | aaleinik@gmail.com | jonjawa91@gmail.com | valiev@gin.keldysh.ru

Санкт-Петербург, Россия, ¹Университет ИТМО;

Москва, Россия, ²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Данная статья посвящена разработке физически корректной модели источника света, имеющего сложный характер пространственного, углового и спектрального излучения света, и интеграции данной модели в методы стохастической трассировки лучей. Программные интерфейсы разработанной модели позволяют использовать ее в методах прямой, обратной и двунаправленной стохастической трассировки лучей. Представлены алгоритмы данных моделей, обеспечивающие расчет яркости прямого виденья источника света и яркостей первичного и вторичного освещений наблюдаемых объектов сцены, выполненные для метода двунаправленной стохастической трассировки лучей. Приведенные примеры иллюстрируют возможность применения разработанных моделей для фотореалистичной визуализации сцен с источниками света, изначально заданными в виде конечного набора лучей.

Ключевые слова: стохастическая трассировка лучей, источник света, прямая видимость источника света, первичная яркость, вторичная яркость, фотореалистичная визуализация.

The model of the complex light source constructed for the limited set of rays*

D.D. Zhdanov¹, A.A. Aleinikov¹, E.V. Kudrevatih¹, V.I. Valiev²

¹ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation;

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russian Federation

The article is devoted to the creation of a physically correct model of the light source with the complex character of spatial, angular and spectral distribution and integration of the model to method of bi-directional stochastic ray tracing. The developed program interfaces allow integration of the models to any kind of stochastic ray tracing simulator. The designed algorithms of the light emitter allows physically accurate calculation of direct vision luminance component and components of direct and indirect light illumination for the method of the bi-directional stochastic ray tracing. Examples of photorealistic images of scenes illuminated with light sources represented as a set of rays illustrate the article.

Keywords: stochastic ray tracing, a light source, direct light source visibility, primary luminance, secondary luminance, photorealistic visualization.

Введение

В настоящее время, задача физически корректного моделирования и проектирования сложных оптических устройств и их фотореалистичной визуализации в условиях реального окружения приобретает все большую актуальность. При проектировании современных осветителей используются новая элементная база, новые конструкторские и технологические решения, поэтому методы детерминистической трассировки луча становятся неприменимыми для корректного моделирования и проектирования систем данного класса. На смену детерминистическим методам приходят методы стохастического моделирования и большинство основных коммерческих систем компьютерного моделирования [1, 2] имеют в своем составе данные модели.

Работа выполнена при частичной государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), грантом РФФИ 13-01-00454, а также компанией Integra Inc. Работа опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-07-20347

Стохастические методы моделирования обеспечивают физически корректное решение уравнение рендеринга [3]. Наиболее оптимальным методом решения уравнения рендеринга является метод двунаправленной стохастической трассировки лучей, который объединяет методы прямой и обратной трассировки лучей, что позволяет оптимальным образом интегрировать вторичную яркость на диффузных поверхностях между источником и приемником излучения. Однако, для расчета яркости прямой видимости, первичной и вторичной яркостей метод двунаправленной стохастической трассировки лучей требует реализации определенных программных интерфейсов со стороны элементов сцены.

Одним из элементов сцены, обеспечивающих программные интерфейсы расчета яркости, является источник света. Как правило системы компьютерного моделирования используют модели непрерывных источников излучения, имеющих определенную форму поверхности, в которых значение

яркости излучения может быть вычислено для любой точки поверхности. Однако, современные источники излучения имеют сложный характер пространственного и углового распределения излучения и вычисление и построение корректной модели излучения является дорогостоящей задачей. Поэтому ряд компаний, таких как OSRAM и Radiant Imaging Zemax, осуществляют измерения световых характеристик источников света и простейших осветительных устройств на аппаратно-программных комплексах типа SIG-400 Radiant Vision Systems [4]. После обработки результат измерений может быть сохранен в виде модели, представляющей собой набор случайных лучей (точка начала, направление и цвет луча), испускаемых данным источником света. Если количество лучей в данной модели достаточно велико, то она может корректно описать процесс излучения света в методе прямой стохастической трассировки лучей. Для моделирования процесса излучения достаточно случайным образом выбирать луч в соответствии с плотностью распределения энергий лучей в заданном наборе. Однако для метода двунаправленной стохастической трассировки лучей данное решение непригодно, поскольку не позволяет вычислить яркость прямого виденья источника света, а компонента первичной яркости содержит постоянную составляющую шума, вызванную дискретным характером излучения источника света. Рисунок 1 иллюстрирует недостатки модели источника света, разработанные для метода прямой стохастической трассировки луча и примененные в методе двунаправленной стохастической трассировки лучей.

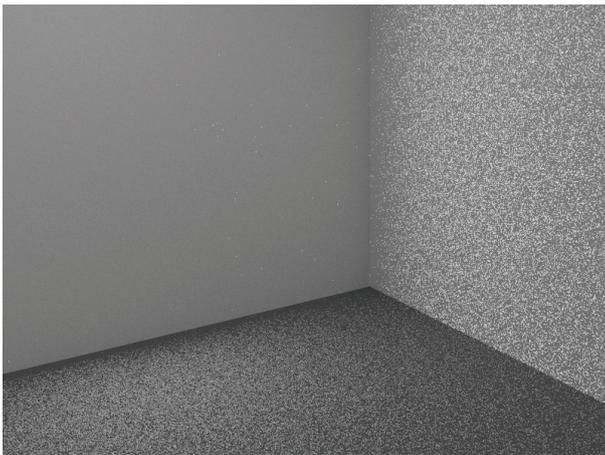


Рис. 1: Недостатки модели источника света, разработанной для метода прямой стохастической трассировки лучей

Сцена представляет собой замкнутый параллелепипед, освещенный светодиодным кластером, со-

стоящим из 39 светодиодов, показанных на рисунке 2, и расположенным в области виденья на левой незашумленной стенке. Очевидно, что светодиод не виден, а изображение содержит неустрашимый шум.

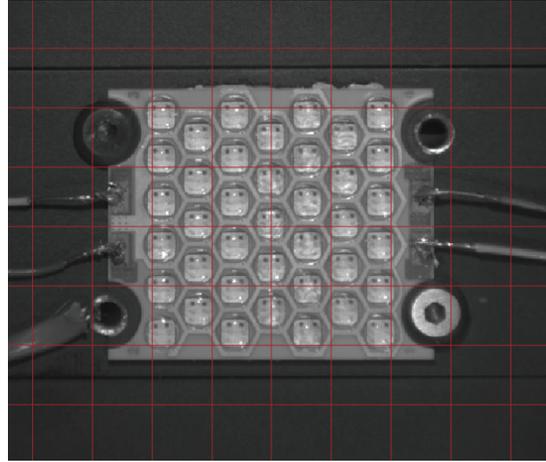


Рис. 2: Фотография светодиодного кластера

Целью данной работы являлась полномасштабная реализация сложной дискретной модели источника света, позволяющая реализовать методы расчета яркости прямого виденья, первичной и вторичной яркостей, в методе стохастической двунаправленной трассировки лучей. Кроме того, данная модель должна исключить постоянную составляющую шума изображения, вызванную дискретным характером излучения источника света.

Расчет яркости методом двунаправленной трассировки лучей

Для статических сцен видимая яркость световой компоненты c в точке \vec{p} и по направлению \vec{v} определяется следующим уравнением рендеринга:

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

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

\vec{n} – нормаль к поверхности 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 рассеивания (ДФР)) от источника освещения \vec{v}' в направлении \vec{v} на наблюдателя,

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

Поскольку уравнение (1) это уравнение с бесконечной рекурсией, то при наличии значительной доли

первичного и вторичного диффузного освещения, наиболее подходящим способом решения данного уравнения является метод двунаправленной стохастической трассировки лучей. Для прерывания бесконечной рекурсии, возникающей при выполнении интегрирования, наиболее подходящим решением является метод русской рулетки. Рисунок 3 схематично иллюстрирует данный алгоритм.

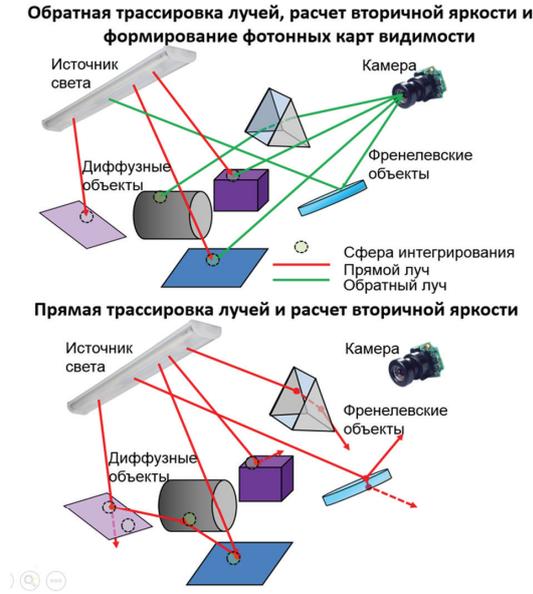


Рис. 3: Метод двунаправленной стохастической трассировки лучей

Двунаправленная трассировка лучей состоит из двух чередующихся процессов: (1) обратной трассировки луча, позволяющей на «зеркальных» трассах вычислить видимую яркость источников света, сформировать карты виденья сцены и для всех видимых диффузных объектов вычислить яркость прямого освещения, и (2) прямой трассировки луча, позволяющей вычислить яркость вторичного освещения в диффузных точках карты виденья сцены. Выражение для вычисления яркости прямого виденья достаточно просто и имеет вид:

$$L_B^V(\vec{p}, \vec{v}, c) = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} \tau(\vec{p}_i, \vec{v}_i, c) \cdot L_i(\vec{p}_i, \vec{v}_i', c)}{N_B} \quad (2)$$

где: N_B – количество лучей, испущенных наблюдателем;

$L_i(\vec{p}_i, \vec{v}_i', c)$ – яркость источника света, находящегося на i -ой трассе «зеркального» луча.

В данном случае яркость прямого виденья – это средняя яркость всех источников света, находящихся на трассе «зеркальных» лучей, испущенных наблюдателем из одной точки камеры.

Первичная яркость – это яркость непосредственно освещаемых диффузных объектов, которые на-

блюдаются либо непосредственно, либо посредством отражения (пропускания) луча наблюдения от «зеркальных» объектов сцены. Для вычисления первичной яркости используются методы “light sampling” (3) $L_L^D(\vec{p}, \vec{v}, c)$ и “BDF sampling” (4) $L_B^D(\vec{p}, \vec{v}, c)$ [5]:

$$L_L^D(\vec{p}, \vec{v}, c) = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{m=1}^{M_i} \tau_m(\vec{p}_{im}, \vec{v}_{im}, c) \sum_{j=1}^{N_k} B S D F_{im}(\vec{p}_{im}, \vec{v}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c) E_j(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)}{\pi \cdot N_B \cdot N_S} \quad (3)$$

$$L_B^D(\vec{p}, \vec{v}, c) = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{m=1}^{M_i} \tau_m(\vec{p}_{im}, \vec{v}_{im}, c) \sum_{j=1}^{N_k} L_j(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)}{N_B \cdot N_S} \quad (4)$$

где: M_i – количество сохраненных фотонов на поверхностях сцены для i -ой трассы луча;

N_S – количество случайных попыток вычисления прямой освещенности $E_j(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)$ для метода “light sampling” и яркости источников света $L_j(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)$, находящихся на трассе луча после рассеивания луча на j -ой поверхности для метода “BDF sampling”.

В случае метода “light sampling” яркость – это средняя яркость, сформированная случайными точками на источнике излучения, освещающими диффузную точку наблюдения. Метод “BDF sampling” аналогичен методу расчета яркости прямого виденья, за исключением того, что яркость вычисляется, и соответствующим образом усредняется, после N_S попыток однократного диффузного рассеивания на поверхности, наблюдаемой на трассе «зеркального» луча. Вторичная яркость – это яркость, накопленная после двух и более рассеиваний на трассе луча от точки наблюдения до источника света. Данная яркость вычисляется в диффузной области пересечения трасс прямых и обратных лучей. Область пересечения ограничена сферой интегрирования, формируемой в процессе трассировки обратных лучей в виде карты виденья сцены. Выражение яркости имеет следующий вид:

$$L^I(\vec{p}, \vec{v}, c) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{m=1}^{M_i} \tau_m(\vec{p}_{im}, \vec{v}_{im}, c) \frac{\sum_{j=1}^{N_k} B S D F_{im}(\vec{p}_{im}, \vec{v}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c) F_{Rj}(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)}{\pi^2 N_B N_{F_{im}}^2} \quad (5)$$

где: N_F – количество лучей, испущенных источниками света;

N_R – количество фотонов, попавших в m -ую сферу интегрирования (фотонную карту) на трассе i -го луча;

r_{im} – радиусы сфер интегрирования вторичной яркости для i -го луча на m -ой поверхности наблюдения соответственно;

$F_{Rj}(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)$ – спектральный поток, переносимый j -ым фотоном в точке \vec{p}_{im} по направлению \vec{v}'_{imj} и попавший в сферу интегрирования фотонной карты виденья.

То есть вторичная яркость – это средняя яркость вторичного освещения, попавшего в область сфер интегрирования карт виденья сцены.

Ниже рассматриваются программные модели источников света, обеспечивающие вычисление всех трех компонент яркости.

Расчет яркости прямого виденья источника света

В соответствии с уравнением (2) яркость прямого виденья, как и первичная яркость в методе “BDF sampling” (4), вычисляется в точке пересечения обратного луча с поверхностью источника света. То есть, с точки зрения программной реализации модели источника света, необходимо выполнить две операции, во-первых, найти точку пересечения луча с поверхностью источника света \vec{p}_i , а во-вторых, вычислить яркость источника света в точке \vec{p}_i по направлению \vec{v} .

Принимая во внимание специфику модели источника света, представляющей собой цветное облако лучей, данные операции не могут быть непосредственным образом применены к существующей модели.

Поиск пересечения луча с поверхностью источника света явным образом невозможен. Однако, если заменить точки начала лучей на сферы, то можно найти точку пересечения луча с ближайшей сферой и принять ее за граничную точку тела источника света. Проблемы данного метода заключаются в слишком большом количестве точек (количество точек может достигать десятков миллионов) и неопределенном значении радиуса сферы в начале луча.

Для решения данных проблем в области определения начал лучей строится плотность их распределения. Плотность распределения строится на пространственной решетке, разрешение которой определяется количеством лучей в источнике света (как правило начальное разрешение $128 \times 128 \times 128$), и по данной плотности вычисляется оптимальное количество центров сфер и радиусов в каждой ячейке решетки. Как правило, количество точек на одну ячейку ограничивается 16, точки выбираются максимально равноудаленными друг от друга, а их радиусы должны полностью заполнять ячейку. Кроме того, сферы формируются только по границе области, что позволяет существенно сократить объем исходных данных, формирующих поверхность источника света.

Расчет поверхностной яркости источника света осуществляется по формуле:

$$L_i(\vec{p}_i, \vec{v}'_i, c) = \frac{\Delta^2 F(\vec{p}_i, \vec{v}'_i, c)}{\Delta S(\vec{p}_i, c) \cdot \Delta \Omega(\vec{v}'_i, c) \cdot (\vec{n} \cdot \vec{v}'_i)} \quad (6)$$

где: $\Delta^2 F(\vec{p}_i, \vec{v}'_i, c)$ – поток, испускаемый ячейкой источника света $\Delta S(\vec{p}_i, c)$ в телесном угле $\Delta \Omega(\vec{v}'_i, c)$ и по направлению \vec{v}'_i к нормали излучающей области \vec{n} (ячейки решетки).

Поскольку для аккуратного вычисления распределения светового потока разрешение решетки, используемой для формирования области виденья, является чрезмерным (из-за ограниченного количества лучей в исходных данных), то для вычисления яркости (6) используются дополнительные решетки более низкого разрешения. Для построения пространственного распределения потока начальное распределение решетки ($32 \times 32 \times 32$), а для пространственного распределения интенсивности излучения – ($5 \times 5 \times 5$). Распределения строятся по трем ортогональным осям решетки, что позволяет оптимальным образом выбрать $\vec{n} \cdot \vec{v}'_i$.

Рисунок 4 показывает яркость прямого виденья источника света, представленного на рисунке 2.



Рис. 4: Изображение сцены, сформированное яркостью прямого виденья источника света

Расчет яркости первичного и вторичного освещения

В соответствии с уравнениями (3) и (5) яркости прямого и вторичного освещения вычисляются в два этапа. На первом этапе в соответствии с распределением светового потока по ячейкам источника излучения выбирается ячейка излучения, а затем, используя метод “rejection sampling”, выбирается точка излучения внутри ячейки. Выполнение второго этапа для расчета прямой (3) и вторичной (5) яркостей идет по разным схемам. В первом случае для выбранной точки излучения вычисляется интенсивность светового излучения в точке наблюдения. А во втором случае осуществляется случайный выбор направления луча в соответствии с гониометрическими диаграммами, хранящимися в ячейке, содержащей точку излучения.

Поскольку решетки, на которых определяются пространственные распределения потока и интенсивности излучения, не совпадают друг с другом, то цвет источника света для полученного направления может быть выбран опционально по одному из распределений.

Рисунки 5 и 6 показывают яркости первичного и вторичного освещения сцены источником света, представленным на рисунке 2.

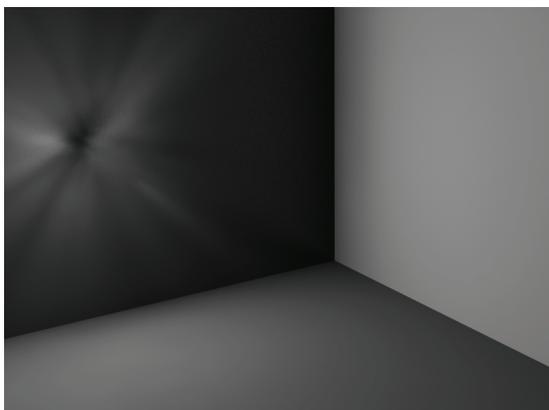


Рис. 5: Изображение сцены, сформированное яркостью первичного освещения

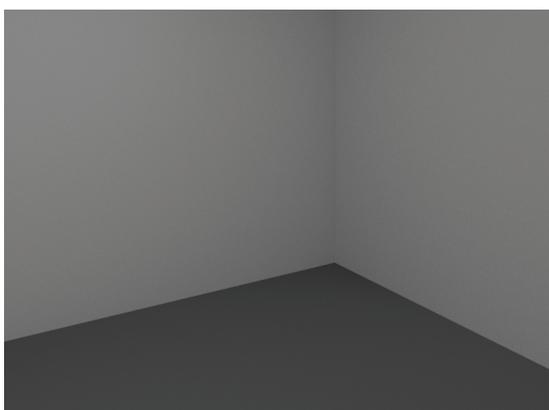


Рис. 6: Изображение сцены, сформированное яркостью вторичного освещения

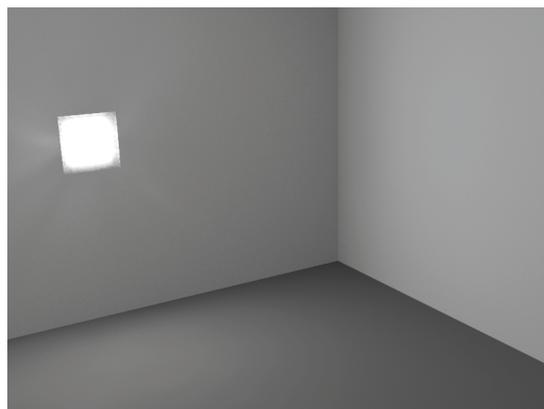


Рис. 7: Полное изображение сцены, построенное с помощью разработанной модели источника света

Литература

- [1] Synopsys, LightTools Illumination Design Software, URL: <http://optics.synopsys.com/lighttools/>, 2015.
- [2] Synopsys, LightTools Illumination Design Software, URL: <http://optics.synopsys.com/lighttools/>, 2015.
- [3] Kajiya, J.T. The rendering equation / Siggraph 1986: 143.
- [4] Radiant Vision Systems SIG-400, URL: <http://www.radiantvisionsystems.com/products/sig-400>, 2015.
- [5] Eric Veach. A dissertation: Robust Monte-Carlo methods for light transport simulation, URL: http://graphics.stanford.edu/papers/veach_thesis/thesis.pdf, 1997.
- [6] Intgera Inc., Lumicept, URL: <http://www.integra.jp/en>, 2015.

Заключение

В рамках программного комплекса Lumicept [6] была реализована модель сложного дискретного источника света, обеспечивающая физически корректное решение уравнения рендеринга для метода двунаправленной стохастической трассировки лучей. Разработанные программные решения обеспечивают возможность построения фотореалистичного изображения, включая изображение самого источника света, без постоянной шумовой составляющей яркости первичного освещения. Рисунок 7 иллюстрирует, как возможности разработанных моделей позволяют повысить качество и реализм изображения сцены по сравнению с начальной моделью, представленной на рисунке 1.