

## Построение физически корректной модели источника света по конечному набору лучей\*

Д.Д. Жданов<sup>1</sup>, А.А. Алейников<sup>1</sup>, Е.В. Кудреватых<sup>1</sup>, Н.Б. Дерябин<sup>2</sup>  
ddzhdanov@mail.ru | aaaleinik@gmail.com | jonjawa91@gmail.com | dek@keldysh.ru

Санкт-Петербург, Россия, <sup>1</sup>Университет ИТМО;  
Москва, Россия, <sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

*Статья посвящена созданию физически корректной модели источника света, заданного в виде конечного набора лучей, полученного либо как результат обработки измерений световых характеристик источника света на установке типа Radiant Imaging, либо как результат прямой стохастической трассировки лучей в сцене, моделирующей излучение сложного источника света. Разработан алгоритм, позволяющий по конечному набору лучей построить непрерывную поверхность излучения источника света и его гониометрическую диаграмму. Модель позволяет сохранить спектральный состав исходных лучей в поверхностном распределении яркости излучения источника света.*

**Ключевые слова:** Стохастическая трассировка лучей, источник света, Radiant Imaging model, пространственное распределение яркости, спектральное излучение.

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

D.D. Zhdanov<sup>1</sup>, A.A. Aleinikov<sup>1</sup>, E.V. Kudrevatih<sup>1</sup>, N.B. Deryabin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russian Federation

*The article is devoted to the creation of a physically correct model of the light source which is specified as a finite set of rays obtained either as the result of processing of the measured characteristics of the light source on the installation type Radiant Imaging, or as a direct result of stochastic ray tracing in the scene, simulating the complex radiation of light source. An algorithm is developed that allows for a finite set of rays to construct a continuous surface emission light source and the goniometric diagram. The model allows preserving the spectral content of the source rays in the surface luminance distribution of the radiation light source.*

**Keywords:** stochastic ray tracing, a light source, radiant Imaging model, the spatial luminance distribution, spectral radiation.

### Введение

Фотореалистичная визуализация, как метод быстрого прототипирования, актуальна для различных областей применения [1]. Широкое распространение подход получил благодаря тому, что системы со сложной структурой, чрезвычайно трудно описать аналитически, а создание прототипа если и возможно, требует неприемлемо много временных и финансовых ресурсов.

Суть фотореалистичного синтеза изображений сводится к решению уравнения рендеринга [2]. Существуют различные способы численного решения этого уравнения, но идея их одна и заключается в трассировании лучей света или (и) лучей видимости, испускаемых наблюдателем.

Если в большинстве задач для обеспечения корректности результата достаточно использовать элементарную модель источника света, то при проек-

тировании сложных светооптических систем необходимо учитывать естественные особенности излучения. С этой целью практикуется измерение фотометрических характеристик источников света. Результат измерения представляется в виде ограниченного случайного набора лучей, который используется для компьютерного моделирования оптических устройств. Такой подход имеет ряд недостатков, осложняющих моделирование. Во-первых, распределение лучей носит случайный характер, что приводит к невозможности использования такой модели излучателя в методе детерминистической трассировки лучей, который в некоторых случаях оказывается более эффективным. В стохастической трассировке случайный набор лучей, определяющих источник света, согласуется с алгоритмической моделью метода. Однако возникает проблема появления артефактов, природа которых объясняется тем, что для сходимости результата моделирования может потребоваться количество лучей, превышающее общее число лучей, содержащихся в исходном наборе. Из-за этого, при трассировании один и тот же луч может использоваться множество раз. В результате на изображении образуются

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

световые пятна, которые соответствуют отдельным лучам модели источника света. Кроме того, этот набор данных нельзя использовать для визуализации источника света.

Проблема ограниченности лучей, возникает также и в случае моделирования сложного осветителя, когда для обеспечения корректности результата моделирования необходимо трассировать десятки миллиардов трасс лучей. В качестве иллюстрации можно привести задачу проектирования освещения на основе световой трубы [3]. В такой сцене лишь малая часть генерируемых активным источником света лучей достигнет осветительной системы, а через нее попадет в освещаемое помещение. На этом примере видно, что природа ограниченности набора исходных данных обусловлена двумя причинами. Во-первых, низкой вероятностью попадания лучей в осветительную систему. А во-вторых, пропорционально сложности структуры возрастает и время расчета трасс лучей, и для обеспечения корректного результата общее время моделирования может быть неприемлемо большим.

Целью работы является разработка принципа построения физически корректной модели источника излучения по дискретному набору случайных лучей.

## Исходные данные

В работе в качестве исходных данных использовались результаты измерения световых характеристик, произведенных на аппаратно-программном комплексе Radiant Vision Systems [4].

Упрощенная схема измерительной установки соответствует общей схеме гониофотометра, а процесс измерения характеристик не отличается от традиционного.

Формат, в котором содержится результат измерения, не имеет открытой спецификации, и использовать его можно только в программном обеспечении производителя, которое в качестве результата формирует ограниченный по количеству набор случайных лучей. Хотя формат полученного набора лучей также является проприетарным, но тем не менее имеет открытую спецификацию, в которой содержится общая информация об измеряемом источнике света (суммарный световой поток, используемая цветовая модель, количество лучей в наборе и др.) и список лучей. Каждый луч представляется в виде кортежа  $\langle B, D, C \rangle$ , где  $B$  – точка начала луча,  $D$  – направление луча и  $C$  – цвет луча. Рисунок 1 визуализирует исходный набор данных, используемых для построения модели.

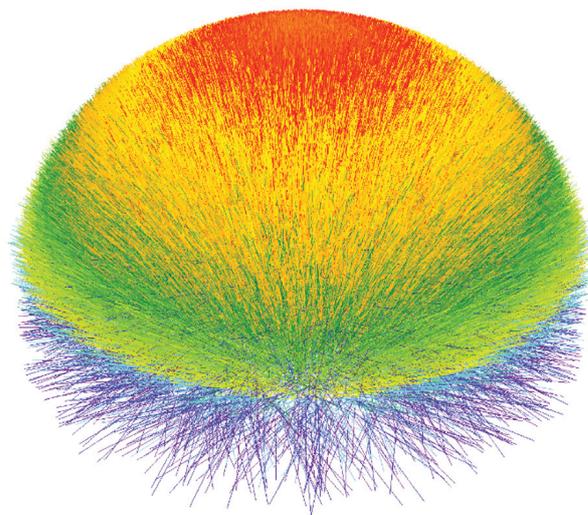


Рис. 1: Визуализация исходных данных. Цвет лучей соответствует полярному углу его направления

## Построение геометрии оболочки источника света

Поскольку формат исходных данных в явном виде не содержит информации о геометрии источника света, то единственным материалом, по которому можно восстановить оболочку, является облако точек вершин лучей. Анализ облака точек позволяет формализовать следующие характеристики геометрии. Во-первых, излучатель может быть как поверхностным, так и объемным. Во-вторых, может быть как единым, так и составным объектом, т.е. сложный излучатель может состоять из ряда независимых излучателей (независимые излучатели могут быть как элементами поверхности, так и элементами объема) [5]. Кроме того, учитывая возможное дальнейшее использование источника света для расчета фотометрических характеристик и различных моделей фотореалистичного рендеринга, было выбрано представление геометрии излучателя в виде триангуляционной сети. Данное представление удобно для визуализации и подходит для большинства моделей рендеринга. Принимая во внимание то, что «треугольное» представление источника света является поверхностной моделью излучения, необходимо специальным образом реализовать возможность излучения из объема, ограниченного триангуляционной сетью. В простейшем случае это может быть выполнено переносом излучения из объема на границу источника света. В дальнейшем программные решения, использующие данную модель, могут осуществлять случайное излучение из объема, ограниченного триангуляционной сетью.

Поскольку, при поставленных выше условиях большинство известных методов триангуляции не могут

обеспечить корректного и эффективного построения геометрии, то для решения поставленной задачи был предложен оригинальный метод формирования триангуляционной сети по облаку точек. Главная идея метода заключается в проекции видовых плоскостей на облако точек. В данном методе излучатель анализируется по шести основным видам (так как это минимальное количество, по которым можно изучить трехмерное тело), совпадающим с гранями ограничивающей прямоугольной области.

Для того, чтобы избежать наложения триангуляционных сетей видовых проекций, облако точек дифференцируется на отдельные части, соответствующие видам. Далее, на проецирующей плоскости строится регулярная сеть заданной размерности, определяемой эмпирическим путем и соответствующей качеству создаваемой триангуляционной сети. Для каждой ячейки сетки находится уровень, который соответствует точке с минимальным расстоянием до проецирующей плоскости. Если для ячейки нет соответствующих точек, то ее уровень устанавливается как нулевой. На основании регулярной вершинной сети получаем полигональную сеть.

Представленный алгоритм является неполным, так как полученные триангуляционные сети являются несвязанными и, в большинстве случаев, отстоят друг от друга на значительное расстояние. Для удаления разрывов между сетями был разработан алгоритм их сшивания, основой которого является использование того факта, что проецирующиеся сети имеют регулярный характер и соприкасаются друг с другом.

В обоих предложенных методах, в силу алгоритмической простоты, могут возникать артефакты в виде недостроенных треугольников. Эта проблема устранима, если для каждой вершины определить, возможно ли однозначно достроить треугольник на основании связи с окружающими вершинами. Необходимо отметить, что при сшивании и построении отсутствующих областей триангуляционной сети, необходимо проверять размеры достраиваемых треугольников и сравнивать их с некоторой максимально допустимой мерой фильтрации, соответствующей тем случаям, когда отсутствие триангуляционной сети оправдано, поскольку излучение в данном месте отсутствует. Данный параметр, также получаемый эмпирическим путем, позволяет управлять качеством построения геометрии. Рисунок 2 визуализирует геометрию оболочки излучателя, полученную разработанным методом.

Таким образом, предложенный алгоритм удовлетворяет поставленным требованиям, прост в реализации и позволяет управлять качеством получаемой триангуляционной сети. Кроме того, количественная мера полученной триангуляционной сети

(разрешения по проекциям) не зависит от числа лучей, участвующих в ее построении, а задается параметром. Это позволит находить баланс между качеством и сложностью полигональной сети в каждой конкретной задаче.

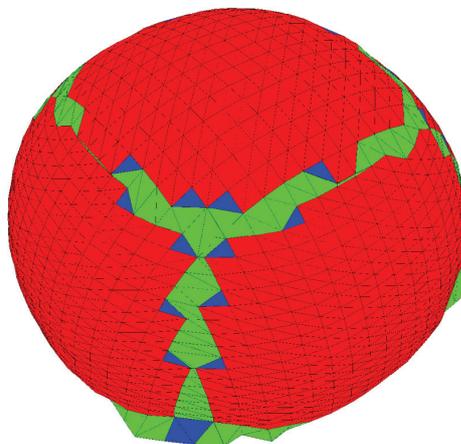


Рис. 2: Визуализация геометрии оболочки излучателя (красным цветом выделены области, построенные методом проекции, зеленым цветом – методом сшивания, синим цветом – методом построения недостающих треугольников)

## Расчет поверхностного распределения светового потока

Полученная на предыдущем шаге триангуляционная сеть строилась приближенным методом. Следовательно, нет полного соответствия между полученной геометрией и исходным набором лучей. Поэтому необходимо спроецировать исходное облако лучей на полигональную сеть.

Проверка на пересечение с треугольником каждого луча с каждым полигоном имеет достаточно низкую эффективность. Однако, в подавляющем большинстве случаев мы имеем дело с поверхностными излучателями и точки начал лучей находятся в непосредственной близости от треугольников. Поэтому вероятность пересечения луча с ближайшими треугольниками достаточно высока и оптимальным решением будет использование пространственной структуры поиска, построенной по множеству полигонов [6]. После нахождения точки пересечения луча с треугольником, целесообразно перевести ее координаты в барицентрическую систему координат в базисе этого треугольника.

Для расчета непрерывного распределения энергии, излучаемой с поверхности источника света, заданного дискретной полигональной сетью, необходимо рассчитать распределение светового потока по полигонам и взвешенного светового потока по вершинам, образующим треугольники.

Световой поток, излучаемый каждым треугольником, может быть найден как:

$$F_t = \sum_{i=1}^{N_t} F_i, \quad (1)$$

где  $N_t$  - количество лучей, пересекших  $t$ -й треугольник,  $F_i$  - световой поток, переносимый  $i$ -м лучом. Рисунок 3 визуализирует поверхностное распределение светового потока, испускаемого треугольниками.

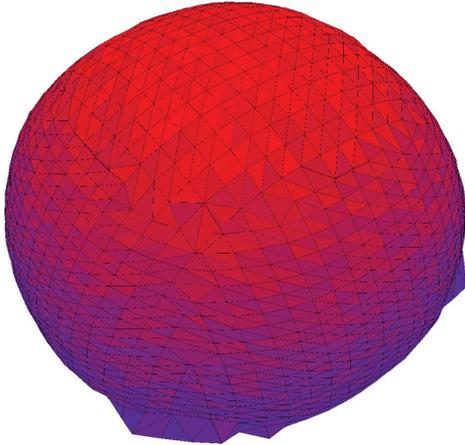


Рис. 3: Визуализация поверхностного распределения светового потока, испускаемого треугольниками

При расчете энергии излучения, испускаемой вершинами треугольника, может быть учтен его спектральный состав. В результате поверхностное распределение по вершинам триангуляционной сети будет иметь спектральное представление. Спектральная плотность распределения светового потока на вершинах полигональной сети может быть определена как:

$$\rho_l(\lambda) = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_l} \rho_i(\lambda) * p_{l,i,j}, \quad (2)$$

где  $N_l$  - количество треугольников, имеющих общую  $l$ -ю вершину,  $\rho_i(\lambda)$  - спектральная плотность распределения светового потока  $i$ -го луча,  $p_{l,i,j}$  - барицентрическая координата луча, соответствующая данной вершине треугольника. Рисунок 4 визуализирует поверхностное распределение плотности светового потока, испускаемого вершинами треугольников.

Для предотвращения появления артефактов, связанных с резкими перепадами плотности распределения световых потоков, используются алгоритмы фильтрации. Поскольку для полигональной сети было построено пространственное дерево поиска,

то одним из наиболее эффективных методов сглаживания будет алгоритм Шепарда [7].

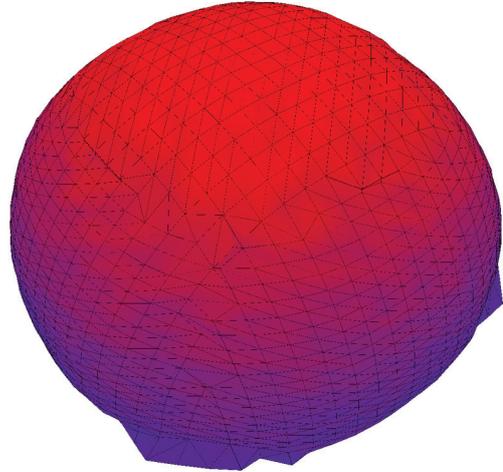


Рис. 4: Визуализация поверхностного распределения светового потока, испускаемого вершинами треугольников

### Расчет углового распределения яркости

Для использования данной модели источника света в физически корректном компьютерном моделировании необходимо определить пространственно-угловую зависимость яркости источника излучения.

Постановка задачи допускает, что источник света может иметь неправильную сложную форму. Кроме того, угловое распределение яркости может варьироваться по поверхности излучения. Поэтому, единая угловая диаграмма распределения яркости (или интенсивности) излучения будет искажать (как правило, сглаживать) характер углового излучения, испускаемого разными зонами источника света. Такое сглаживание допустимо, когда освещаемый объект удален от источника света на значительное расстояние, однако при освещении объектов, находящихся в непосредственной близости от источника света, например, освещение торца светопроводящей пластины линейкой светодиодов, ошибка моделирования может быть значительной. Естественным решением данной задачи является расчет ряда гониометрических диаграмм для разных зон одного источника света. Оптимальным решением мог бы быть расчет отдельных диаграмм для каждой вершины построенной треугольной модели. Однако чрезмерное увеличение количества диаграмм влечет за собой сильную дифференциацию имеющегося набора исходных данных, что может привести к значительному зашумлению получаемого углового распределения при недоста-

точном количестве лучей. Как правило, исходный набор лучей содержит порядка миллиона или нескольких миллионов лучей, что является недостаточным для построения сотен и даже десятков гониометрических диаграмм. Поэтому разработанная модель ограничивает количество зон на поверхности источника света, имеющих различные гониометрические диаграммы. Зоны образуют регулярную прямоугольную решетку на одной из проекционных плоскостей (чья нормаль ориентирована по направлению максимальной интенсивности излучения) и параметры решетки определяются по плотности распределения лучей в данной плоскости (на данный момент общее количество зон ограничено 16).

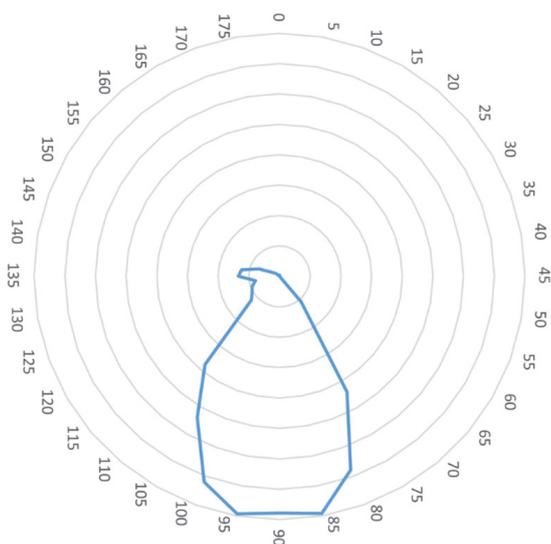


Рис. 5: График сечения распределения интенсивности излучения с одной зоны источника света

Гониометрическая диаграмма строится следующим образом. Для каждого луча, испускаемого с поверхности источника света, определяется зона, в которой осуществляется накопление гониометрической диаграммы. Далее, в системе координат гониометрической диаграммы определяются полярные координаты луча и световой поток, переносимый лучом, добавляется в соответствующую ячейку диаграммы, имеющей вид регулярной решетки по полярным координатам. В результате данной процедуры накапливается распределение интенсивности излучения по зонам источника света. При наличии спектральной составляющей потока излучения в испускаемых лучах накапливается спектральное распределение интенсивности излучения (аналогично плотности спектрального потока излучения в вершинах треугольников). Рисунок 5 представляет пример графика сечения диаграммы интенсивности излучения.

Как правило, вследствие недостаточности исходных данных полученные диаграммы интенсивности имеют значительный уровень шума и должны быть сглажены. Для фильтрации может применяться любой метод, работающий на регулярной сети.

## Заключение

В рамках данной работы был реализован алгоритм построения физически-корректной модели источника излучения по дискретному ограниченному набору лучей. Разработанная модель, в силу непрерывности распределения фотометрических характеристик, может быть использована как в детерминистических, так и в стохастических методах трассировки лучей. Кроме того, данный подход позволяет заменить источник света, заданный сложным оптическим устройством, на упрощенную, физически-корректную модель излучателя, что повышает эффективность рендеринга.

Приведенные примеры иллюстрируют возможность построения непрерывной поверхности и гониометрической диаграммы излучения источника света для ограниченного набора лучей.

## Литература

- [1] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов. Компьютерная графика как эффективный инструмент развития современных технологий // Труды 23-й Международной Конференции по Компьютерной Графике и Зрению, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Дальневосточный Федеральный Университет, 16-20 сентября 2013 года, С.186-190.
- [2] Kajiya, J.T. The rendering equation / Siggraph 1986: 143.
- [3] Laouadi A., Saber H.H. Performance of Tubular Daylighting Devices // NRC CONSTRUCTION TECHNOLOGY UPDATE, National Research Council of Canada, No. 82, June 2014.
- [4] Radiant Vision Systems SIG-400, URL: <http://www.radiantvisionsystems.com/products/sig-400>
- [5] Жданов Д.Д., Гарбуль А.А., Волобой А.Г., Галактионов В.А., Ершов С.В., Потемин И.С., Соколов В.Г. Фотореалистичная модель объемного рассеивания в задаче двунаправленной стохастической трассировки лучей // Труды 24-й Международной Конференции по Компьютерной графике и Машинному Зрению ГрафиКон'2014, Ростов-на-Дону, 30 сентября – 3 октября, С.38-42.
- [6] Wald I., Havran V. On building fast kd-trees for ray tracing, and on doing that in  $O(N \log N)$  // RT06 conference, Salt Lake City, UTAH, USA, September 2006, pp.61-69.
- [7] Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data // 23rd ACM national conference (ACM'68), ACM, New York, NY, USA, 1968, pp.517-524.