

# Методы стохастической трассировки лучей в задачах построения изображений, формируемых реальными оптическими системами

Д.Д. Жданов<sup>\*,\*\*,\*</sup>, А.А. Гарбуль<sup>\*,\*\*,\*</sup>, И.С. Потемин<sup>\*,\*\*,\*</sup>, И.В. Валиев<sup>\*\*</sup>, В.Г. Соколов<sup>\*\*</sup>

E-mail: [ddzhdanov@mail.ru](mailto:ddzhdanov@mail.ru), [garalexey@yandex.ru](mailto:garalexey@yandex.ru), [ipotemin@yandex.ru](mailto:ipotemin@yandex.ru), [valiev@gin.keldysh.ru](mailto:valiev@gin.keldysh.ru), [sokolovv1969@gmail.com](mailto:sokolovv1969@gmail.com)

\* Университет ИТМО, Санкт-Петербург

\*\* Институт Прикладной Математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва

\*\*\* ОАО «Государственный Оптический Институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

## Аннотация

В работе предлагается использование методов стохастической трассировки лучей для синтеза фотореалистичных изображений оптически сложных трехмерных сцен, формируемых оптическими приборами. Разработанные модели позволяют учитывать все основные оптические эффекты, возникающие при распространении света в оптическом устройстве. В работе представлены три основные группы моделей оптических приборов: модель идеальной оптической системы, позволяющая учесть эффекты дефокусировки и дисторсии изображения; модель реальной оптической системы, учитывающая все геометрические аберрации; модель реального оптического прибора, позволяющая учесть не только аберрации оптической системы, но и эффекты рассеивания света как на оптических (линзы, зеркала), так и на механических элементах конструкции прибора (оправы линз, корпус объектива). Кроме того, предложена модель квази-детерминированной трассировки лучей, позволяющая достаточно быстро построить «незашумленную» компоненту изображения, формируемую оптической системой. Работа иллюстрируется примерами ряда изображений, сформированных моделями различных фотообъективов.

**Ключевые слова:** Сцена, стохастическая трассировка лучей, оптическая система, фотореалистичное изображение, рассеивание света, модели оптического прибора.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На настоящий момент задача физически корректного моделирования и фотореалистичной визуализации оптически сложных сцен приобретает все большее значение для моделирования и проектирования сложных оптических устройств, работающих в условиях реального окружения. Например, выходные оптические характеристики осветительного устройства должны рассчитываться исходя не только из условий прямого освещения, но и условий вторичного освещения, создаваемого светом, переотраженным объектами сцены. Однако, большинство программных пакетов расчета оптических систем ограничивается моделированием изображения точечных объектов. В ряде случаев имеется дополнительная возможность построения изображения плоского объекта, подобно Bitmap Image Analysis в ZEMAX. Такое моделирование имеет ряд существенных недостатков, связанных с тем, что не принимаются во внимание ни трехмерность геометрии, ни оптические свойства объектов изображаемой сцены, ни реальные условия освещения. В работах [5], [6] и [7] показана возможность моделирования

изображений трехмерных сцен, полученных с использованием полиномиальной модели линзовых объективов. В этом случае оптическая система участвует в трассировке не как геометрия, а как «черный ящик», направляющий попадающие в него лучи в соответствии с заданной функцией преобразования, связывающей координаты на зрачке с координатами в фокальной плоскости. Такие модели весьма эффективны с точки зрения скорости трассировки лучей, проходящих через оптическую систему без попадания на корпус объектива, оправы и торцы линз. Однако, при построении изображения не учитываются эффекты рассеивания света, возникающие на элементах конструкции оптического устройства, рассеивание на дефектах оптических деталей или такие эффекты, как блики.

Задача построения изображения, формируемого оптической системой, отличается от классической задачи построения изображения, существующей в компьютерной графике. Основное отличие заключается в том, что точечная камера, используемая в компьютерной графике, формирует изображение в единицах яркости, соответствующей яркости наблюдаемых объектов сцены, а в оптической системе изображение представляет собой освещенность, собранную со всей площади выходной поверхности оптической системы. Поэтому, чисто технически, задача построения изображения, формируемого оптической системой, приобретает две новые размерности – это интегрирование локальных яркостей изображения сцены в малой апертуре по всей выходной поверхности оптической системы. В данном случае оптическая система представляет собой часть общей визуализируемой сцены и может содержать поверхности как с диффузными, так и с «зеркальными» свойствами, и все компоненты яркости (яркость прямого видения, первичная, каустическая и вторичная яркости) могут формироваться как в наблюдаемой сцене, так и в самой оптической системе. Поэтому в основу моделирования был положен метод двунаправленной стохастической трассировки лучей [1, 2], учитывающий яркости каустического и вторичного освещения с помощью фотонных карт. Использование данного метода позволило существенно повысить эффективность построения изображения и учесть при построении изображения оптические и геометрические параметры элементов оптической схемы объектива (линз и зеркал), а также учесть влияние оптических и геометрических параметров механической конструкции данного объектива (корпуса, оправ и т.п. элементов).

Разработанное авторами программное обеспечение позволило моделировать изображение трехмерных объектов в произвольных условиях освещения. Данная функциональность включена в программный комплекс

Lumicept [3] и позволяет контролировать качество формируемого изображения в режиме реального времени.

## 2. МОДЕЛЬ ИДЕАЛЬНОЙ ЛИНЗЫ

Фотореалистичная визуализация оптически сложных сцен сводится к решению уравнения рендеринга для каждой точки изображения сцены [4]. Уравнение рендеринга позволяет вычислить яркость в заданном направлении, а для построения изображения, формируемого оптической системой, необходимо интегрировать яркость со всех направлений на выходную поверхность (в случае идеальной линзы, совпадающий с апертурной диафрагмой). Двухнаправленная стохастическая трассировка лучей является одним из способов решения уравнения рендеринга, 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,

$\frac{1}{\pi} \int_{4\pi} BPDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) L(\vec{p}, \vec{v}', c) (\vec{n} \cdot \vec{v}') d\omega$  – яркость,

сформированная первичным и вторичным освещением наблюдаемого объекта,

где:

$BPDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c)$  – коэффициент яркости поверхности (или двухнаправленная функция рассеивания (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, и если вклад вторичного излучения в суммарное значение видимой яркости значителен, то двухнаправленная стохастическая трассировка лучей, основанная на методе «русской рулетки» и использующая фотонные карты для расчета каустической и вторичной яркостей, позволяет физически корректно выполнить бесконечное интегрирование наиболее эффективным образом.

Для расчета освещенности изображения необходимо воспользоваться зависимостью между яркостью светящегося объекта и освещенностью, создаваемой этим объектом в точке изображения  $\vec{p}_i$  и направлении на выходной зрачок  $\vec{v}_i$ :

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = dE(\vec{p}_i, c) (\vec{n}_i \cdot \vec{v}_i) d\omega_i \quad (2)$$

Полная освещенность получается интегрированием всех локальных освещенностей, вычисленных для заданной точки изображения. В методе стохастической трассировки лучей корректное интегрирование яркостей обеспечивается равномерным испусканием лучей с приемника изображения

по всей поверхности идеальной линзы. В результате локальный телесный угол – это полный телесный угол идеальной линзы, деленный на общее количество лучей, испущенных с данной точки изображения.

Несмотря на то, что изображение, формируемое оптической системой, должно совпадать с изображением, наблюдаемым глазом (точечной камерой), существует ряд принципиальных отличий, вызванных aberrациями оптической системы, дифракцией на оправках линз и зеркал и рассеянным светом, возникающим в оптической системе. Наиболее существенный вклад в искажение изображения вносят aberrации оптической системы. Самая существенная aberrация – это aberrация первого порядка или дефокусировка. Эффект дефокусировки может быть представлен в модели идеальной линзы, определяемой уравнением:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \quad (3)$$

где:

$f'$  – задний фокус оптической системы,

$a'$  – задний отрезок оптической системы (положение изображения),

$a$  – передний отрезок оптической системы (положение источника яркости),

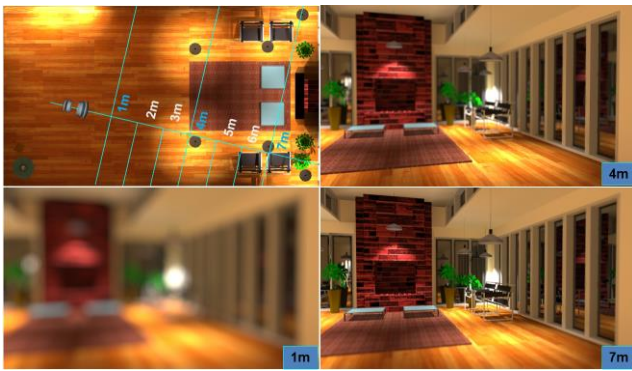
Используя модель идеальной линзы можно оценить, как параметры дефокусировки влияют на качество формируемого изображения.

Для демонстрации такого моделирования, в качестве изображаемого объекта была использована трехмерная геометрия комнаты (Рис.1), в которой каждая поверхность имеет уникальные оптические свойства. Для источников света использованы измеренные фотометрические значения углового распределения интенсивности.



Рис 1: Сцена для моделирования изображения

Варианты изображений, построенных при фокусировке на различные дистанции, представлены на Рис.2.

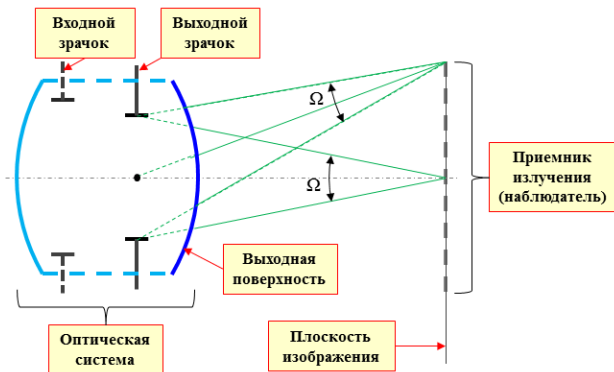


**Рис 2:** Моделирование изображений при фокусировке объектива на разные дистанции

Для модели камеры была использована оптическая схема светосильного объектива с фокусным расстоянием 100мм и относительным отверстием 1:2.8. Хорошо видно, что в случае фокусировки на дистанцию 4м, кромка ковра отображается резко, а предметы на заднем плане размыты. В случае же фокусировки объектива на дистанцию 7 метров, задний план резкий, а кромка ковра, находящаяся на уровне 4-х метров – размыта.

### 3. БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

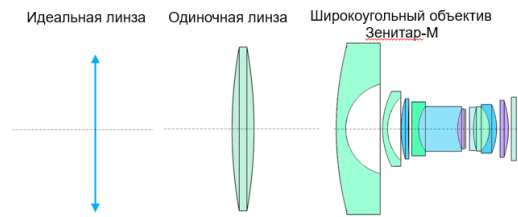
Хотя модель идеальной линзы позволяет визуализировать основной абберационный эффект, вызванный дефокусировкой, в ряде случаев этого недостаточно для того, чтобы построить фотореалистичное изображение, формируемое оптической системой. Для построения изображения, формируемого оптической системой, строится простая модель, в которой изображение совмещается с приемником излучения, а лучи наблюдателя, равномерно распределенные по поверхности выходного угла в пределах апертуры  $\Omega$ , запускаются в оптическую систему (рис.3). Для построения «чистого» изображения, не содержащего компоненту рассеянного света, испускание лучей на зрачок более эффективно, поскольку площадь выходной поверхности конкретной оптической системы может на несколько порядков превышать размер выходного зрачка. Кроме того, для повышения эффективности вычислений формируется детерминированная трасса луча через оптическую систему.



**Рис 3:** Трассировка лучей от приемника на выходной зрачок  
Трасса луча представляет собой упорядоченный список объектов оптической системы, которые луч пересекает при

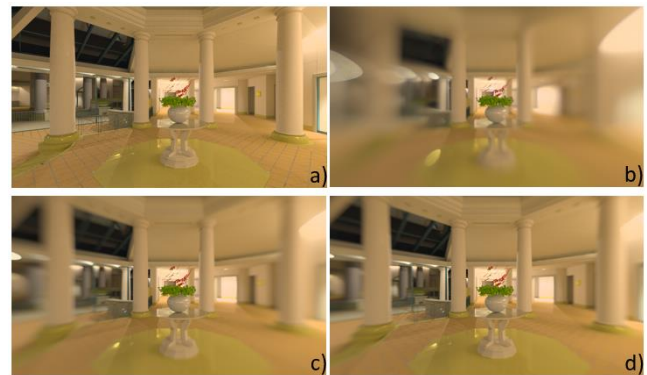
распространении от приемника излучения до последней поверхности системы. При отклонении луча от указанной трассы он убивается. Такое решение, в ряде случаев, позволяет получить ускорение в десятки и сотни раз. Причем наибольший эффект достигается в случае неточного задания зрачков оптической системы, когда большая часть лучей попадает на корпусные элементы оптической системы и не формирует основное изображение. Такая техника может быть применена как для трассировки прямых лучей (от источников света), так и для трассировки обратных лучей (от приемника излучения).

Рассмотрим далее примеры изображений, построенных с помощью оптических систем различной сложности. Для моделирования были использованы оптические системы трех типов, представленные на рис. 4.



**Рис 4:** Три типа оптических систем

На рис.5 представлены изображения сцены интерьера холла, сформированные через идеальную линзу и одиночную линзу с различной апертурой:



**Рис 5:** Изображения, построенные оптическими системами

- a) Изображение получено через идеальную линзу с фокусным расстоянием 17мм и относительным отверстием 1:4. Размер углового поля (диагональ) составляет 102°.
- b) Изображение трехмерной сцены, сгенерированное через одиночную положительную линзу конечной толщины с фокусным расстоянием 17 мм и относительным отверстием 1:4. Угловое поле зрения и дистанция фокусировки такие же, как и для идеальной линзы.
- c) Та же одиночная линза, но с апертурой 1:16;
- d) Та же одиночная линза, но с апертурой 1:32;

В случае 4b) хорошо видно существенное снижение качества изображения по полю вследствие больших aberrаций одиночной линзы. Уменьшение рабочей апертуры улучшает качество изображения, результаты которого представлены на рис. 5c) и 5d). Улучшение качества изображения вызвано

уменьшением входного зрачка и, как следствие, уменьшением сферической aberrации. Тем не менее, качество изображения по полю остается невысоким из-за больших полевых aberrаций одиночной линзы, в частности кривизны поля.

На Рис.6 представлено изображение того же интерьера, но рассчитанное через оптическую систему широкоугольного фотообъектива. В данном случае качество изображения хорошее по всему полю зрения, так как этот объектив имеет хорошую aberrационную коррекцию. Линейные размеры кадра такие же, как и в случае одиночной линзы. Однако, из-за дисторсионных искажений видимое угловое поле заметно больше.



Рис 6: Изображение, построенное объективом Зенитар-М

Если рассмотреть увеличенные фрагменты левой (рис.7а) и правой (рис.7б) частей полученного изображения, то в наиболее ярких зонах вблизи источников света можно увидеть радужное окрашивание. Это эффект недостаточной коррекции хроматизма увеличения в оптической системе объектива.

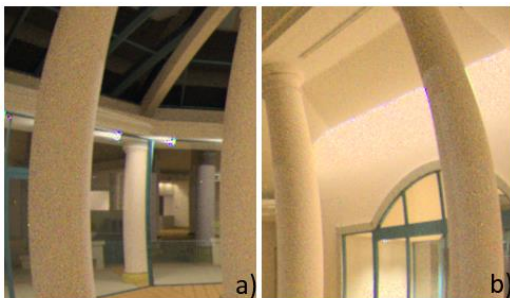


Рис 7: Визуализация эффекта хроматической aberrации

#### 4. УЧЕТ РАССЕЯННОГО СВЕТА

Для учета влияния рассеянного света на качество формируемого изображения используется базовая модель оптической системы, описанная в предыдущей главе. Основные отличия от базовой модели заключаются в том, что, во-первых, наблюдаемая локальная яркость интегрируется по всей площади выходной поверхности оптической системы, а не только по выходному зрачку, и, во-вторых, при формировании локальной яркости участвуют все поверхности оптического устройства вне зависимости от порядка их пересечения лучом, испущенным с поверхности изображения. При расчете рассеянного света можно выделить две его основные составляющие. Это, во-первых, прямые засветки и блики, когда рассеянный свет формируется за счет «зеркальных» событий, возникающих на поверхностях

оптической системы, и, во-вторых, рассеивание света на нерабочих поверхностях оптических деталей и элементах конструкции.

В качестве примера приводится результат моделирования, учитывающий рассеивание света на торцах и оправках линз и зеркал зеркально-линзового телескопа с фокусом 2000 мм., относительным отверстием  $f/10$  и полем зрения  $1^{\circ}15'$ . На рис. 8 представлена принципиальная схема конструкции телескопа и источник рассеянного света – конус внеполевых лучей размером  $3.25^{\circ}$ .

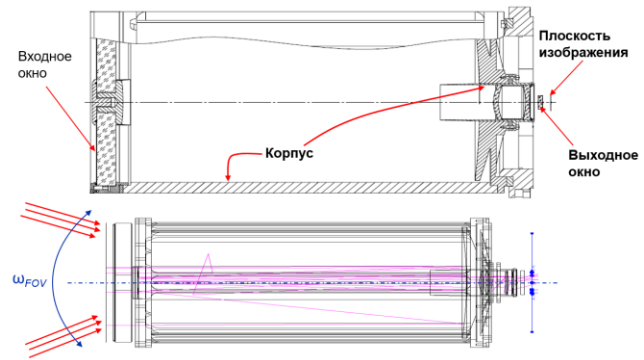


Рис 8: Схема зеркально-линзового телескопа

Результат моделирования представлен на рис. 9

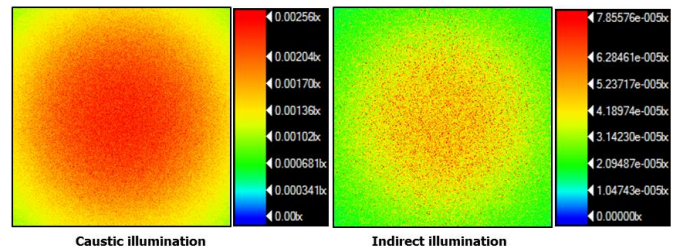


Рис 9: Схема зеркально-линзового телескопа

При моделировании использовались следующие оптические свойства элементов телескопа: отражение от зеркал 100%; рабочие поверхности линз имеют зеркальное отражение 1%, пропускание 99%; торцы линз имеют диффузное отражение и пропускание по 50%; оправы и корпусные элементы имеют диффузное отражение 1%. Поскольку при моделировании использовалась двунаправленная трассировка лучей, скорость расчета практически не зависела от значений коэффициентов диффузности.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что разработанное авторами программное обеспечение позволяет осуществлять физически корректное и эффективное моделирование изображений сложных трехмерных сцен, формируемых оптическими устройствами различного вида. Разработанные модели позволяют не только воспроизводить простейшие эффекты дефокусировки идеальной линзы, но и формировать реалистичное изображение, учитывающее все aberrационные эффекты и эффекты рассеивания света, возникающие на элементах конструкции оптической системы.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), грантом РФФИ № 16-01-00552, а также компанией Integra Inc.

## 7. ССЫЛКИ

- [1] Henrik Wann Jensen, Per Christensen. High quality rendering using ray tracing and photon mapping / SIGGRAPH 2007 Course Note #8. ACM, August 2007. (San Diego, USA, August 5-9.).
- [2] Toshiya Hachisuka and Henrik Wann Jensen. Stochastic progressive photon mapping. ACM Trans. Graph., 28(5):1–8, 2009.
- [3] Lumicept – Integra Inc.  
<http://www.integra.jp/en/products/lumicept>
- [4] J. T. Kajiya. The rendering equation // Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings), 1986, vol. 20, p.143-150.
- [5] J. Hanika, C. Dachsbacher. Efficient Monte Carlo Rendering with Realistic Lenses / EUROGRAPHICS 2014, Volume 33 (2014), Number 2.
- [6] J. Wu, C. Zheng, X. Hu, F. Xu. Rendering realistic spectral bokeh due to lens stops and aberrations / Vis Comput DOI 10.1007/s00371-012-0673-4.
- [7] H. Joo, S. Kwon, S. Lee, E. Eisemann, S. Lee. Efficient Ray Tracing Through Aspheric Lenses and Imperfect Bokeh Synthesis / Eurographics Symposium on Rendering 2016, Volume 35 (2016), Number 4

## Application of stochastic ray tracing for the real lens image synthesis

D.D. Zhdanov<sup>\*,\*\*,\*</sup>, A.A. Garbul<sup>\*,\*\*,\*</sup>, I.S. Potyemin<sup>\*,\*\*</sup>, I.V. Valiev<sup>\*,\*\*</sup>, V.G. Sokolov<sup>\*,\*\*</sup>

E-mail: [ddzhdanov@mail.ru](mailto:ddzhdanov@mail.ru), [garalexey@yandex.ru](mailto:garalexey@yandex.ru),  
[ipotemin@yandex.ru](mailto:ipotemin@yandex.ru), [valiev@gin.keldysh.ru](mailto:valiev@gin.keldysh.ru),  
[sokolovv1969@gmail.com](mailto:sokolovv1969@gmail.com)

\* ITMO University, Saint Petersburg, Russia

\*\* Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

\*\*\* Federal State Unitary Enterprise Scientific and Industrial Corporation "Vavilov State Optical Institute", Saint Petersburg, Russia

### 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. Also the article considers possible limitations of the models.

**Keywords:** Scene, stochastic ray tracing, стохастическая трассировка лучей, optical system, photorealistic image, light scattering, model of optical device