

Недетерминированная трассировка луча в задачах анализа светорассеивания и проектирования осветительных систем

А.А. Гарбуль, Д.Д. Жданов, В.А. Майоров, В.Г. Соколов

ГОИ им. С.И. Вавилова, ГОИ им. С.И. Вавилова, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

В работе предлагается использование метода Монте-Карло для расчета оптических систем с недетерминированным ходом луча. Рассматриваются основные алгоритмы стохастической трассировки луча и программная реализация данных алгоритмов. Работа иллюстрируется примерами расчета рассеянного света в линзовых оптических системах.

Введение

Классическая линзовая оптика решает проблемы проектирования линзовых систем с точки зрения построения идеального изображения. Идеальное изображение в данном контексте не подразумевает безабберационное изображение, это скорее изображение, не содержащее шумовой составляющей в виде бликов, фоновых засветок и т.п. Классическая линзовая оптика предполагает детерминированный ход луча, когда, во-первых, порядок чередования поверхностей строго определен, а во-вторых, поведение луча (отражение или преломление) на каждой поверхности заранее определено. Однако существует большой ряд систем, в которых не требуется построение изображения, а требуется вычисление распределения яркости или освещенности в заданных областях системы, например, яркости экрана дисплея, показанной на рис.1 (а), или освещенности в интерьерной сцене, показанной на рис. 1 (б).

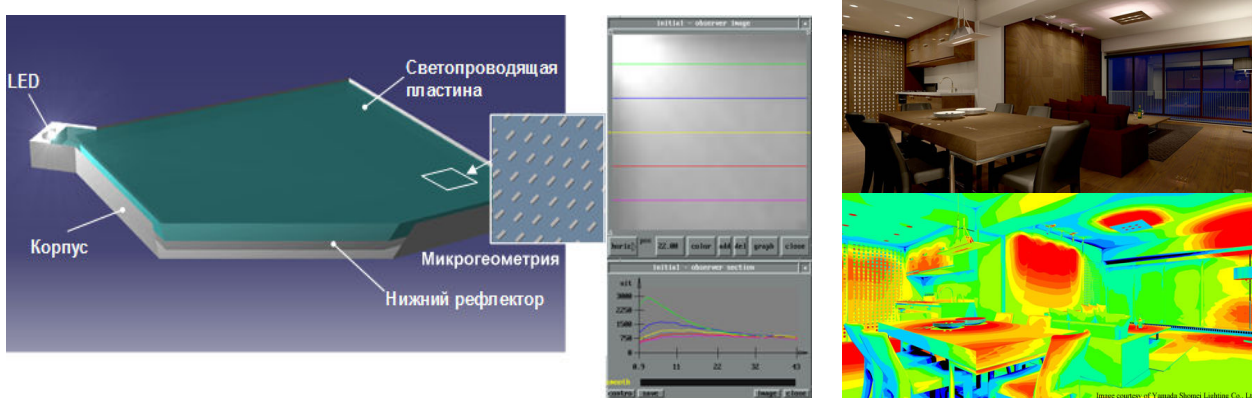


Рис. 1. Расчет распределений (а) яркости экрана дисплея, (б) освещенности помещения

С другой стороны, в системах, формирующих изображение, возникают фоновые засветки, вызванные, например, отражением фонового света от элементов конструкции оптического прибора. Рис. 2 демонстрирует расчет фоновой засветки линзового объектива.

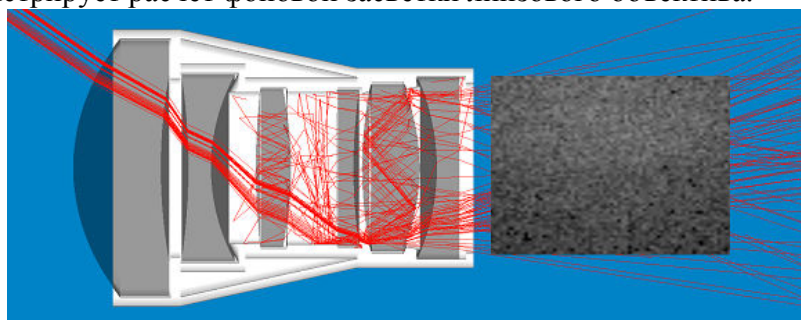


Рис. 2. Расчет фоновой засветки линзового объектива

При выполнении данных расчетов порядок чередования поверхностей и способ преобразования луча на поверхностях и оптических материалах системы заранее не определены. Поэтому для решения таких задач детерминистические методы трассировки лучей в большинстве случаев непригодны и им на замену приходит стохастические методы. Хотя стохастические методы и не всегда являются столь эффективными, как детерминистические, и ряд оптических явлений, таких как дифракция и интерференция не всегда могут быть реализованы в полном объеме, данные методы имеют неоспоримое преимущество, а именно, любая задача лучевого оптического моделирования может быть решена в конечное время.

В задачах, связанных с моделированием освещенности (яркости или интенсивности) на приемниках излучения оптических систем, как правило, применяется прямая трассировка лучей методом Монте-Карло [1, 2]. Прямая трассировка лучей методом Монте-Карло моделирует распространение световых лучей от источника света до приемника излучения и тем самым статистически воспроизводит распределение освещенности, интенсивности или яркости на приемнике излучения. Существует большое количество различных модификаций метода Монте-Карло, каждый из которых оптимален для специфических задач оптического моделирования. Однако наиболее универсальным и эффективным методом для большинства задач оптического моделирования является метод «русской рулетки», представленный в следующей главе.

Идея и алгоритмические решения метода «русской рулетки»

Идея трассировки лучей методом «русской рулетки» базируется на следующих основных положениях:

- Источники света, независимо от их спектрального состава, испускают лучи («фотоны») единичной энергии.
- В процессе распространения луча в оптической системе его энергия, независимо от изменения его спектрального состава, остается неизменной (в оптической системе всегда распространяется только один луч).
- Как следствие, при взаимодействии луча с объектами оптической системы, предполагающими множественный способ преобразования луча (одновременно отражение, преломление, рассеивание и поглощение), выбирается единственный способ его преобразования и единственные направление, координаты и спектральный состав луча.

Схематично трассировка луча состоит из трех основных элементов: испускание луча источником света, распространение луча в оптической системе и регистрация луча на приемнике излучения. Испускание луча источником света и преобразование луча на объектах оптической системы носит вероятностный характер. Метод «русской рулетки» предполагает однообразное решение для всех вероятностных событий. Во-первых, в случае множественного события выбирается единственное событие из ряда возможных. Например, если оптическая система содержит более одного источника света, то необходимо выбрать один источник света, который будет испускать луч. Или, если оптическая поверхность предполагает более одного способа преобразования луча, например, зеркальное преломление/отражение, диффузное отражение/преломление, поглощение, то необходимо выбрать единственный способ преобразования луча на поверхности. Рис. 3 демонстрирует данный процесс выбора для случая преобразования луча на поверхности. В соответствии с частными вероятностями событий строится функция интегральной вероятности выбора одно из событий. Затем генерируется псевдослучайное число ζ , равномерно распределенное в области функции интегральной вероятности, и определяется интервал функции (равный номеру выбираемого события), куда попадает ζ .

$$P_{Event(i-1)} < \zeta \leq P_{Event(i)}$$

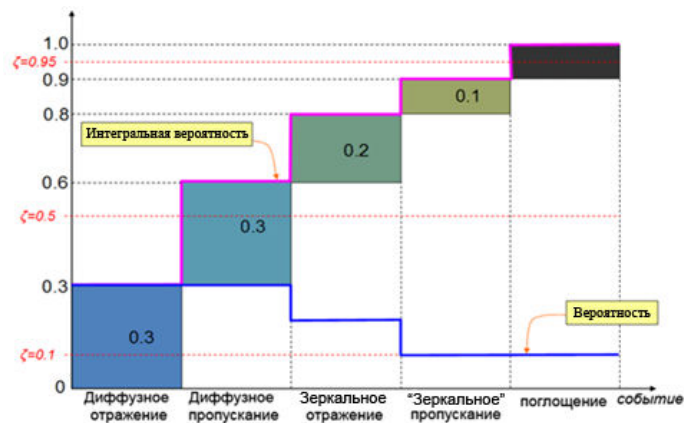


Рис. 3. Выбор одного события преобразования свет на поверхности из множества возможных

На втором этапе реализуется собственно событие. В зависимости от типа события его реализация может быть как детерминистической (преломление света на поверхности), так и вероятностной. В ряде простых случаев для генерации вероятностного распределения (равномерное излучение прямоугольной области, Ламбертовское рассеивание и т.п.) используются аналитические решения. Во всех остальных случаях строится функция интегральной вероятности (аналогично функции, показанной на рис. 3), и параметры луча, например, направление рассеивания, определяются по аналогии с выбором случайного события, рассмотренного ранее.

Общая схема стохастического моделирования распространения света в оптической системе, основанная на методе «русской рулетки», выглядит следующим образом:

- I. Выбор начальных параметров луча (начало, направление, цвет, поляризация). Выбор осуществляется в два этапа. Первый этап – вероятностным образом (в соответствии с излучаемым потоком) выбирается источник света. Второй этап это вероятностный выбор (в соответствии с параметрами излучения источника света) параметров луча единичной энергии.
- II. Осуществляется поиск поверхности, ближайшей к точке начала луча. Если поверхность является приемником излучения, то энергия луча переносится в соответствующую ячейку приемника. Если поверхность не найдена, луч покинул оптическую систему, то осуществляется переход на точку I.
- III. Преобразование луча на поверхности. Преобразование осуществляется в два этапа. Первый этап это выбор типа преобразования луча, например, диффузное рассеивание. Второй этап это преобразование луча в соответствии с выбранным типом. Если тип преобразования есть поглощение, то трассировка луча останавливается и осуществляется переход на точку I.
- IV. Осуществляется переход на точку II.

По окончании расчета осуществляется нормировка результата на количество протрассированных лучей и общий поток всех источников света оптической системы. Кроме того, производится оценка точности выполненного расчета [2].

Описанный метод стохастической трассировки лучей был реализован в программном комплексе оптического моделирования SPECTER [9]. По сравнению с аналогичными программными комплексами LightTools [7], ASAP [5], TracePro [6], SPEOS [8] SPECTER обладает наиболее эффективным алгоритмом трассировки луча и поддерживает практически все возможные (с точки зрения лучевой оптики) физические эффекты излучения и преобразования света на оптических объектах. А именно, поверхностное и объемное излучение поляризованного света, поляризационное рассеивание света в объеме и на поверхностях оптических объектов, регистрация поляризованного света. Все это делает SPECTER оптимальным инструментом для анализа и проектирования сложных осветительных систем и анализа рассеянного света в оптических устройствах [3, 4].

Пример расчета фоновых засветок в линзовом объективе

В качестве примера рассмотрим анализ рассеянного света в фотографических объективах, выполненного на программном комплексе СРЕСТЕР. В первом примере источником рассеянного света является яркий вторичный источник света, находящийся в поле зрения объектива (солнечный блик от купола церкви). Схема подсветки показана на рис. 4. Левая часть рис. 4 демонстрирует, как трассы лучей от источника засветки бликуют на линзовых поверхностях оптической системы. Такая визуализация трасс лучей полезна для анализа источников возникновения бликов и определения путей борьбы с ними. Правая часть рис. 4 это результат моделирования изображения объекта (распределение освещенности в поле зрения объектива), содержащего яркий источник (солнечный блик от купола церкви), сформированного фотографическим объективом. В данном моделировании просветляющие покрытия линз объектива не использовались.

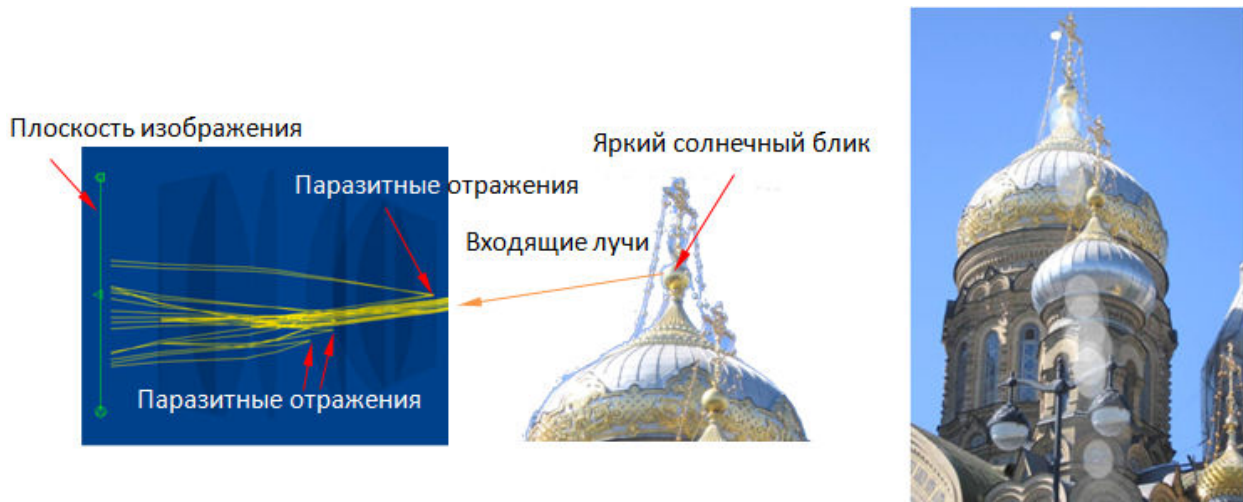


Рис. 4. Анализ бликов фотографического объектива от источника света в поле его зрения

Во втором примере демонстрируется расчет рассеянного света, сформированного протяженным источником света (находящегося вне поля зрения фотографического объектива), отраженным от элементов его конструкции. Рис. 5 представляет принципиальную схему работы оптической системы. Левая часть рис. 5 демонстрирует трассы лучей, рассеивающихся на корпусе, оправках объектива и торцах линз и создающих фоновую засветку изображения. Коэффициент диффузного отражения нерабочих поверхностей оптической системы был равен 10%. Правая часть рис. 5 это та же оптическая система, но содержащая бленду и предотвращающая формирование фоновой засветки.

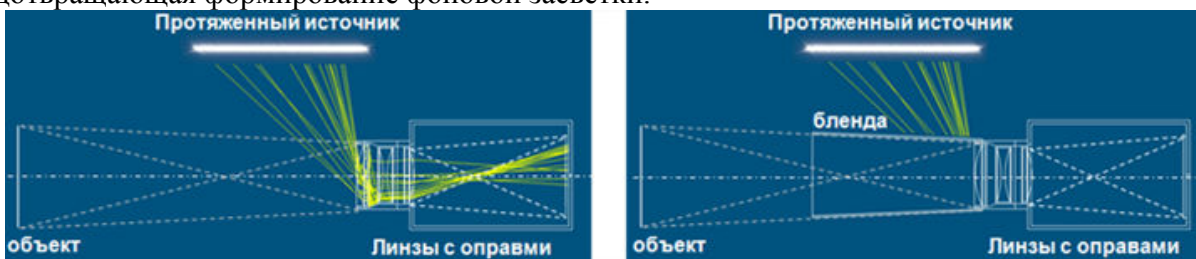


Рис. 5 Оптическая схема и трассы лучей в фотографическом объективе с блендой и без нее

Результаты моделирования изображения объекта (распределение освещенности в поле зрения объектива), сформированного фотографическим объективом, показано на рис. 6. Источник фоновой засветки – солнечный свет, проникающий через купол здания. Левая часть рис. 6 содержит изображение зала, сформированного объективом без бленды, а правая часть рис.

6 – объективом с блендой. Очевидно, что бленда блокирует большую часть фонового света, что помогает уменьшить паразитную засветку изображения.



Рис. 6 Результаты моделирования изображения, формируемого фотографическим объективом с блендой и без нее

Заключение

Разработанная программа стохастической трассировки лучей успешно применялась для анализа и проектирования сложных осветительных систем, таких как системы подсветок жидкокристаллических дисплеев, приборных панелей автомобилей, отражателей сложной формы, включая автомобильные фары. Кроме того, разработанная программа нашла применение в проектировании сложных зеркально-линзовых оптических систем, а именно для анализа рассеянного света в видимом и инфракрасном диапазонах света, включая анализ засветки, вызванный самосвечением элементов оптической системы.

В планы работы по расширению возможностей программы входят интеграция детерминистических и стохастических методов трассировки лучей в задачах построения изображения с учетом влияния эффектов рассеивания и дифракции света.

Благодарности

Работа поддержана грантами Президента РФ НШ-8129.2010.9, РФФИ № 10-01-00302, а также компанией Integra Inc.

Авторы выражают свою признательность И.С. Потемину за предоставленные материалы.

Литература

[1] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, К.А. Дмитриев, Э.А. Копылов. Двухнаправленная трассировка лучей для интегрирования освещенности методом квази- Монте Карло // "Программирование", № 5, 2004, с. 25-34.

[2] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, С.В. Ершов, Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, Л.З. Шапиро. Анализ ошибок компьютерного моделирования глобального освещения // Российская академия наук, институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, 2009

[3] Волобой А.Г., Галактионов В.А., Жданов Д.Д. Программное моделирование светопроводящих систем // Препринт ИПМ № 55, Москва, 2007

[4] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, А.Д. Жданов, Д.Д. Жданов. Средства визуализации распространения световых лучей в задачах проектирования оптических систем // "Информационные технологии и вычислительные системы", № 4, 2009, с. 28-39.

[5] <http://www.breault.com/software/software-overview.php>

[6] www.lamdares.com/products/tracepro

[7] http://www.opticalres.com/lt/ltprodds_f.html

[8] http://www.optis-world.com/G_O.asp?soft_id=1

[9] <http://www.integra.jp/en/specter/index.html>