

# Анализ точности моделирования глобального освещения

А.Г. Волобой\*, С.В. Ершов\*, Д.Д. Жданов\*\*, И.С. Потемин\*, Л.З. Шапиро\*

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

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

## Аннотация

В данной работе рассматриваются вопросы точности моделирования освещения сложных сцен и построения их фотореалистических изображений. В работе был проведен анализ ошибок моделирования. Были приведены оценки прогнозирования времени вычислений, необходимого для достижения заданной точности моделирования, как критерия, определяющего окончание процесса моделирования.

**Ключевые слова:** реалистичные изображения, глобальная освещенность, карта освещенности, оценка точности.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Физически аккуратное моделирование освещения находит широкое применение в архитектуре, при проектировании светотехнических устройств, а также при построении реалистических изображений сцен виртуальной реальности. Результатом такого моделирования могут быть либо карты распределения световых характеристик (освещенности, яркости или интенсивности света) на объектах сцены, либо фотореалистическое изображение сцены.

В задачах, связанных с построением фотореалистических изображений, эффективным является сочетание методов прямой трассировки лучей, рассчитывающих распределение глобальной (или вторичной) освещенности или яркости на объектах сцены, с методами обратной трассировки, суммирующих яркости объектов сцены с прямыми яркостями от источников света [1, 2]. Идея прямой трассировки лучей методом Монте-Карло состоит в статистическом воспроизведении механизма распространения света путем моделирования всевозможных траекторий лучей от источников света до объектов сцены. Траектории световых частиц (фотонов) прослеживаются на всех этапах их существования, от момента их генерации источниками света до поглощения или выхода из сцены. Метод естественным образом поддерживает все типы поверхностей, включая сочетания диффузных и зеркальных свойств, а также поверхности, описываемые сложными функциями отражения (преломления) света. Поскольку в нашей реализации расчета глобальной освещенности каждый фотон переносит элементарный поток, то объекты сцены могут накапливать падающий на них поток и, в зависимости от типа объекта, сохранять его в виде карт освещенности или яркости.

Данная работа посвящается методам оценки погрешностей моделирования глобальной освещенности (яркости) объектов сцены и прогнозированию времени моделирования, необходимого для достижения заданной точности.

## 2. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК

Вычисление световых характеристик осуществляется методом Монте-Карло и содержит стохастические ошибки вычисления. Кроме того, световые характеристики вычисляются на элементах объектов сцены конечных размеров (в вершинах треугольной сетки или в текстурных ячейках). Поэтому точная оценка световых характеристик в заданных точках сцены невозможна. Таким образом, погрешность вычисления состоит из двух основных ошибок – ошибки «дискретизации» сцены, связанной с конечными размерами элементов сцены, и ошибки «сходимости», связанной со случайным процессом вычислений.

Ошибка «дискретизации» — это ошибка интерполяции освещенности в пределах элемента сцены, накапливающего световой поток. Каждый элемент сцены накапливает единственную величину, и, очевидно, чем больше элемент сцены, тем более проблематично осуществлять точное распределение этой величины в пределах элемента сцены. Наиболее оптимальным решением является адаптивное разбиение сцены, критерием которого будет сведение ошибок «дискретизации» и «сходимости» к одному значению.

Для метода Монте-Карло ошибка «сходимости» может быть определена как дистанция между идеально правильной картой освещенности (яркости) и реально вычисленной картой. Принимая во внимание, что размеры и форма треугольников, на которых представлены карты, меняются по сцене, необходимо выполнить усреднение вычисленной дистанции по размеру сцены (суммарной площади всех треугольников сцены). Данная дистанция есть среднеквадратическое отклонение распределения глобальной освещенности (яркости) от идеальной карты и может служить оценкой ошибки моделирования. Выражение среднеквадратического отклонения имеет следующий вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int (E_0(x, y) - E(x, y))^2}{S}},$$

где:  $E_0$  – идеальная карта освещенности,

$E$  – карта освещенности, выч. методом Монте-Карло,

$S$  – суммарная площадь поверхности всех треугольников, на которых была рассчитана карта освещенности.

Основным недостатком вычисления выражения среднеквадратического отклонения является невозможность применения его на практике. Идеальная карта освещенности (яркости) неизвестна, она есть результат моделирования при бесконечном времени вычисления. Поэтому в условиях реального моделирования в качестве оценки идеальной карты освещенности (яркости) используется карта, вычисленная при других (независимых) начальных значениях датчиков случайных чисел. Было принято решение для получения двух независимых карт освещенности (яркости) – сохранять

результаты трассировки четных лучей в «четной» карте, а результаты трассировки нечетных лучей – в «нечетной».

Выражение среднеквадратичного отклонения для оценки погрешности вычисления глобальной освещенности (яркости) примет следующий вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int (E_{\text{нечет}}(x, y) - E_{\text{чет}}(x, y))^2}{S}}$$

где:  $E_{\text{нечет}}$  – карта яркости, вычисленная для нечетных лучей,

$E_{\text{чет}}$  – карта яркости, вычисленная для четных лучей.

Глобальная карта освещенности (яркости) есть карта, сформированная нечетными и четными лучами.

### 3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ РАСЧЕТА

Оценка точности моделирования является необходимым условием физически аккуратного оптического моделирования. Достаточным же условием является прогнозирование времени расчета, необходимого для достижения заданной точности. Для оценки необходимого времени моделирования можно использовать хорошо известную теоретическую зависимость:

$$\sigma_{\text{rel}} \approx \frac{1}{\sqrt{t}}$$

Предполагая, что количество испущенных фотонов достаточно велико ( $N \rightarrow \infty$ ) и элементы сцены накапливают независимые фотоны с единичной энергией, то выражение сводится к:

$$\sigma_{\text{rel}} = \frac{1}{\sqrt{n}}$$

где  $n$  – количество лучей, аккумулированных элементом сцены.

Принимая во внимание, что в среднем время на трассировку одного луча (фотона), приходящего на элемент сцены, меняется незначительно, можно заключить, что количество лучей, аккумулированных элементом, пропорционально времени моделирования. Очевидно, что высокая точность прогноза времени моделирования возможна при значительном количестве протрассированных лучей.

Алгоритмы оценки точности и прогнозирования времени моделирования не являются трудоемкими, поэтому оценка точности и прогноз могут вычисляться интерактивно, без видимой задержки времени моделирования. Графически анализ точности вычислений включает в себя график зависимости точности от времени вычислений (рис. 1, до настоящего времени показывается реальная зависимость, после настоящего времени – прогноз). На нем отображается текущее значение точности (цифра 2 на рис. 1), прошедшее время и количество протрассированных лучей (цифра 1), установленная пользователем желаемая точность (цифра 3) и прогнозируемое время для достижения заданной точности с прогнозируемым количеством лучей (цифра 4).

График прогнозируемого времени вычислений обновляется каждый раз по мере накопления новой порции данных. Начальный прогноз, сделанный через 17 секунд расчета (показанный на рис. 1), хотя и не является абсолютно точным (однопроцентное значение ошибки реально было достигнуто

через 12 минут и 5 секунд, а не 11 минут и 49 секунд, как предсказано на рис. 1), он достаточно достоверен. Надо отметить, что прогноз времени вычисления достаточно точен с первых секунд расчета (он находится в пределах 2-3% от общего времени расчета), и по мере продолжения вычислений прогноз становится более достоверным.

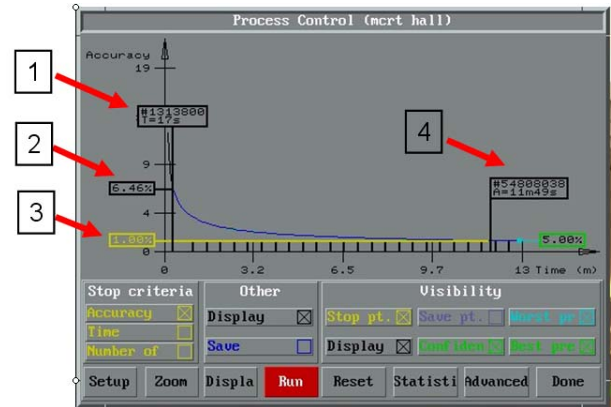


Рис. 1. График зависимости точности от времени вычислений с прогнозом времени для достижения заданной точности.

Алгоритмические и программные решения оценки и прогнозирования точности оптического моделирования были реализованы в программном комплексе Inspire [9].

Работа поддержана грантами РФФИ № 07-01-00450 и № 08-01-00649, а также фирмой Integra Inc. (Япония).

### 4. ЛИТЕРАТУРА

- [1] E.P.Lafortune, Y.D.Willems. Bidirectional path tracing. Computer Graphics Proceedings, Portugal, pp.145-153, 1993.
- [2] S.N.Pattanaik, S.P.Mudur. Adjoint equations and random walks for illumination computation, ACM Transactions on Graphics 14: 77-102, 1995.
- [3] Inspire: Simulation software for lighting design and analysis. <http://www.integra.jp/en/inspire/index.html>

### Abstract

The accuracy of physically based lighting simulation and realistic rendering is considered in the paper. The stochastic error is analyzed for the task of global illumination simulation. Also the issue of prediction of calculation time necessary to obtain requested simulation accuracy is discussed and practical approach to solve the issue is suggested.

**Keywords:** realistic images, global illumination, illumination maps, accuracy estimation.

### Authors:

Alexey G. Voloboy, PhD, senior researcher, Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS (KIAM RAS). E-mail: [voloboy@gin.keldysh.ru](mailto:voloboy@gin.keldysh.ru)

Sergey V. Ershov, PhD, senior researcher, KIAM RAS.

Dmitry D. Zhdanov, PhD, senior researcher, Vavilov State Optical Institute

Igor S. Potemin, researcher, KIAM RAS

Lev Z. Shapiro, PhD, senior researcher, KIAM RAS.