

## СГЛАЖИВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАДАНЫХ ОБЪЕКТОВ В СЦЕНАХ С ГЛОБАЛЬНОЙ ОСВЕЩЕННОСТЬЮ

*Вяткин С.И., Долговесов Б.С.*

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск,  
Российская Федерация*

**Ключевые слова:** глобальное освещение, функционально заданные объекты, трассировка лучей, фильтрация, частотный анализ.

**Аннотация.** Представлен метод сглаживания функционально заданных объектов в сценах с глобальной освещенностью. Описан подход для сглаживания функциональных объектов с предварительной фильтрацией цвета, нормали и смещения в сценах глобального освещения с несколькими отражениями. Применяются спектры Фурье для функций яркости, которые позволяют осуществить фильтрацию изображения. С помощью модуляции карт цвета и нормалей высокого разрешения происходит сглаживание отражений. В методе используется комбинация классического подхода переноса света и частотно-пространственная предварительная фильтрация глобального освещения. Для сложных сцен, известные подходы требуют на порядок больше вычислений для получения изображений высокой реалистичности.

## SMOOTHING OF FUNCTIONALLY DEFINED OBJECTS IN SCENES WITH GLOBAL ILLUMINATION

*Vyatkin S.I., Dolgovesov B.S.*

*Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

**Keywords:** global illumination, functionally defined objects, ray tracing, filtering, frequency analysis.

**Abstract.** A method for smoothing functionally defined objects in scenes with global illumination is presented. An approach for smoothing functional objects with pre-filtering of color, normals and offsets in global lighting scenes with multiple reflections is described. Fourier spectra are used for brightness functions that allow image filtering. With the help of modulation of color maps and high-resolution normals, reflections are smoothed. The method uses a combination of the classical approach of light transfer and frequency-spatial pre-filtering of global illumination. For complex scenes, well-known approaches require an order of magnitude more calculations to obtain images of high realism.

### 1. Введение

Для моделирования сложных высоко детализированных сцен применяются текстурные карты цвета, нормалей и смещения. Для устранения нежелательных артефактов используются методы сглаживания изображений. Для реалистичного рендеринга необходимы детали [1, 2]. Однако визуализация сложной поверхности с большим количеством деталей не простая задача. В работе [1] рассматривается сложное распределение нормалей на участке поверхности, видимом через один пиксель. В работе [3] обобщены традиционные пирамиды mip-map на пирамиды нейронных

текстур. Нейронные материалы поддерживают семимерный запрос, включая местоположение, направление входа и выхода и желаемый размер ядра фильтра. Это позволяет отображать материалы разных уровней детализации, с точным параллаксом, само затенением и другими эффектами. Для моделирования зеркальных микро поверхностей эффективны карты нормалей. Однако, при небольших углах между лучом и поверхностью, зеркальная поверхность отображается с погрешностями. В работе [4] предлагается решить проблему точности, используя более физически обоснованную модель отражения. Для этого карта нормалей аппроксимируется анизотропными нецентрированными функциями распределения нормалей Бекмана (Beckmann). Для отображения зеркальных поверхностей используются интеграторы блеска, которые улавливают микро отражающие блики, попадающие в пиксельный след. Зеркальные карты нормалей применяются для представления произвольных микро структур. Однако использование карт нормалей имеет ряд недостатков. Например, когда образуются обратных нормали, а также при неоптимальной выборке значений шероховатой микро поверхности. В статье [5] предлагается интегратор блеска, на основе патчей с множественным рассеянием. Градиентные методы также важны для компьютерной графики, машинного обучения и компьютерного зрения. При рендеринге градиент необходим для таких переменных, как параметры камеры, источники света, геометрия сцены и внешний вид материала. Однако вычисление градиента является сложной задачей, поскольку интеграл рендеринга включает данные видимости, которые не поддаются дифференцированию. В работе [6] представлен универсальный дифференцируемый трассировщик лучей, который может вычислять производные скалярных функций по отображаемому изображению. Например, таких как положение камеры, геометрия сцены, материалы и параметры освещения. Сцены в компьютерной анимации могут быть очень сложными, например, когда объекты с высоким разрешением расположены на расстоянии и занимают всего несколько пикселей [7]. Метод для повышения уровня детализации заключается в использовании разреженного воксельного восьмеричного дерева. Восьмеричное дерево содержит твердые поверхности, и участвующую среду, состоящую из микро частиц. В статье [8] обсуждаются методы аппроксимации распределения нормалей микро частиц. Это необходимо для вычисления поглощения, рассеяния ослабленного прямого освещения и многократного рассеяния в участвующей среде. В работе [9] предлагается предварительно вычислять приближенные функции распределения нормалей. Они хранятся в текстурах и обрабатываются в режиме реального времени путем выборки текстур при рендеринге сложных зеркальных поверхностей на GPU. В статье [10] анализируется фильтрация комбинированного эффекта микро граней BRDF и карт нормалей. Показано, что проблема фильтрации может быть сведена к оценке интегральной гистограммы и обобщению таблицы с суммированной областью.

Мы применяем наш метод для визуализации сложных эффектов глобального освещения на функционально заданных поверхностях с картами нормалей, цветов и смещений высокого разрешения. Известный метод *tip-mapping* применяется для снижения затрат на загрузку текстур с высоким разрешением в память. Так как результирующий цвет пикселя является результатом многомерной интеграции световых путей, падающих на пиксель и отраженных в сторону наблюдателя, пиксельный след распространяется по нескольким отражениям. Например, в каждой вершине светового пути. При этом фильтрация применяется в каждой вершине вдоль светового пути. В нашем методе учитывается пиксельное и частотное содержание света в вершине, что приводит к правильному сглаживанию. Применяется ковариационная трассировка для вычисления предварительной фильтрации пределов полосы пропускания в вершинах пути. При этом учитываются спектры датчика и излучателя. Известные методы сглаживают непосредственно видимый внешний вид поверхности. В них используются упрощенные приближительные модели BRDF для косвенных отражений. Дифференциалы лучей распространяют локальные различия от датчиков или источников света только благодаря зеркальному отражению и преломлению. Однако они не могут правильно обрабатывать не зеркальные взаимодействия. Дифференциалы пути [5] учитывают только передачу и фильтрацию от под путей глаз наблюдателя и пренебрегают эффектами источника света, в том числе и переносом от под путей света. Это приводит к большому размытию изображения. Различия в траекториях отслеживаются и вычисляются частные производные пространства путей с большими затратами. Наш метод позволяет избежать этой дорогостоящей процедуры с вычислениями и масштабируемостью. В нашем методе используется частотный анализ локальных световых полей. Мы используем компактное ковариационное представление второго порядка. В котором отслеживаются и обновляются спектры яркости, для вычисления следов предварительной фильтрации вдоль пути. Также используется простой оператор отражения BRDF для ковариационной матрицы. Цель работы - сглаживание сложных световых эффектов в функциональных сценах.

## **2. Описание метода**

### *2.1 Функционально заданные поверхности*

Функциональное задание объектов позволяет решить проблему детализации. Рассмотрим задание объектов в виде квадрики с возмущениями [11]. Такие объекты будем называть свободными формами. Таким образом, предлагается подход для задания объекта, отличный от полигонального способа. Необходимо подобрать базовую форму и выбрать набор возмущений, заданных в виде квадрик. Такой подход позволяет уменьшить расходы на память. Количество памяти необходимой для задания одного полигона чуть меньше, чем для задания одной квадрики. Но для того, чтобы

приблизить объект из одной квадрики с приемлемым уровнем детализации требуются тысячи полигонов.

Пусть мы имеем функцию плотности вдоль луча, которая зависит от одной переменной. Задача будет состоять в нахождении первой точки, в которой функция обращается в ноль. Найдя такую точку для каждого луча, будет известна глубина кадра. Данными приближениями задача сводится к задаче отслеживания лучей. Далее в каждом пикселе можно вычислить нормаль. А имея данные о глубине и нормали в каждом пикселе, можно использовать модель локального освещения. В итоге получится изображение гладкого объекта с учётом освещения. Главной частью работы является эффективное нахождение первого пересечения луча с поверхностью.

Данная задача напоминает задачи визуализации объёмных данных, которые часто применяется, например, в томографии. В подобных задачах задана функция плотности. Основным отличием является то, что в подобных задачах мы имеем дело с дискретными данными. А в нашем случае есть аналитически заданная функция плотности. Это позволяет более эффективно осуществлять поиск.

Для описания поверхностей используются функции отклонения от базовой квадрики [11]:

$$F'(x, y, z) = F(x, y, z) + \sum_{i=1}^N f_i R_i(x, y, z), \quad (1)$$

где  $F'(x, y, z)$  – функциональная поверхность;  $F(x, y, z)$  – базовая квадратика;  $f_i$  – форм-фактор;  $i=1 \dots N$  – количество функций возмущения;  $R_i(x, y, z)$  – возмущение,

$$R_i(x, y, z) = \begin{cases} Q_i^3(x, y, z), & \text{if } Q_i(x, y, z) \geq 0 \\ 0, & \text{if } Q_i(x, y, z) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

где  $Q(x, y, z)$  – возмущающая квадратика.

Степень возмущения можно выбирать произвольно. От этого будет зависеть гладкость переходов от базовой поверхности до области с возмущением, и соответственно размер самого возмущения. Для того чтобы поверхность была гладкая достаточно, чтобы степень была больше двух. Это гарантирует, что сама функция и её производная будут непрерывными.

## 2.2 Сглаживание

Начиная от источника света, распространяем фильтр пикселя вдоль траектории луча, с использованием ковариационной трассировки. При взаимодействии рассеяния ковариационная матрица используется для вычисления пространственного следа. Пространственный след используется для выполнения локальной фильтрации модели рассеяния на функциональной поверхности. После локальной фильтрации ковариационная матрица обновляется в соответствии с соответствующей операцией переноса света. Трассировка пути продолжается, с повторением шагов фильтрации и обновлением в каждой вершине.

Уравнение визуализации [12] моделирует глобальное освещение:

$$L(\bar{x}, \omega_0) = L^0(\bar{x}, \omega_0) + \int_{S^2} L(\bar{y}(\bar{x}), -\omega) \tilde{\rho}(\bar{x}, \omega_0, \omega) d\omega, \quad (3)$$

где  $L(\bar{x}, \omega)$  – излучение в точке поверхности  $\bar{x}$  с нормалью  $\bar{n}$ , в направлении  $\omega$ ,  $\tilde{\rho}(\bar{x}, \omega_0, \omega)$  – пространственно-разностная косинус-взвешенная функция BRDF,  $L^0(\bar{x}, \omega_0)$  – излучение в точке  $\bar{x}$  в направлении  $\omega_0$ ,  $\bar{y}$  – ближайшая поверхность в  $\bar{x}$  в направлении  $\omega$ .

Чтобы моделировать реакцию пикселя на датчик изображения, необходимо определить функцию пиксельного фильтра:

$$L_f(\bar{x}, \omega_0) = \int_{S \times A} s_f^0(\bar{x}, \omega_0) L(\bar{x}, \omega) d\omega_0 d\bar{x}, \quad (4)$$

где  $s_f^0(\bar{x}, \omega_0)$  – фильтр датчика для пикселя  $f$ ,  $S \times A$  – область пространственно-углового интегрирования пиксельного фильтра.

Подставим уравнение 3 в уравнение 4:

$$L_f = \langle s_f^0, L^0 \rangle + \iint s_f^0(\bar{x}, \omega_0) L(\bar{y}, -\omega) \tilde{\rho}(\bar{x}, \omega_0, \omega) d\bar{x} d\omega d\omega_0, \quad (5)$$

где  $\langle s_f^0, L^0 \rangle$  – наблюдаемое излучение в пикселе  $f$ .

Заменим произведение пиксельного фильтра и взвешенного по косинусу BRDF на среднее значение, тогда сглаженное затенение для пикселя  $f$  равно:

$$L_f = \langle s_f^0, L^0 \rangle + \int \bar{p}_f(\omega) L(\bar{y}, -\omega) d\bar{x} d\omega, \quad (6)$$

где  $\bar{p}_f = \int s_f^0(\bar{x}, \omega_0) \tilde{\rho}(\bar{x}, \omega_0, \omega) d\bar{x} d\omega_0$ .

Интегрированное произведение фильтра пикселей и взвешенного по косинусу BRDF в видимой точке поверхности служит косвенным пиксельным фильтром. Его применим к входящему излучению в точке  $\bar{x}$  или исходящему излучению в точке  $\bar{y}$ :

$$s_f^k(\bar{y}, \omega) = \int s_f^{k-1}(\bar{x}, \omega_0) \tilde{\rho}(\bar{x}, \omega_0, \omega) d\omega_0, \quad (7)$$

где  $\bar{y}$  – ближайшая точка, видимая из  $\bar{x}$  в направлении  $\omega$ .

Уравнение 7 неявно определяет распространение отфильтрованного пути в сцену.

Объединим уравнения 3, 4 и 7:

$$L_f = \langle s_f^0, L^0 \rangle + \sum_{k=0}^{\infty} \int s_f^k(\bar{x}, \omega_0) \tilde{\rho}(\bar{x}, \omega_0, \omega) L^0(\bar{y}, -\omega) d\bar{x} d\omega, \quad (8)$$

Уравнение 8 используется для сглаживания со множественными отражениями. При каждом отражении  $k$  сглаживается взвешенный по косинусу BRDF в соответствии с ограничением полосы пропускания косвенного фильтра.

Заменим точечные оценки вклада вершин предварительно отфильтрованными значениями, чтобы артефакты сглаживания. То есть уменьшим пространственный, угловой и временной шум при результирующей визуализации.

Отфильтрованное изображение выглядит следующим образом:

$$\tilde{\rho}(\bar{x}_k, \omega_0, \omega) = \int_{A_u \times S} \rho(\bar{x}_k + \bar{u}, \omega + \omega_0, \omega) h(\bar{u}, \omega) d\bar{u} d\omega, \quad (9)$$

где  $A_u \times S$  – четырехмерный след фильтрации,  $h$  – ядро фильтрации.

Определим ядро фильтрации в точке  $\bar{x}_k$  :

$$h(\bar{u}, \omega) = \frac{g([\bar{u}, \omega]^T \sum_k [\bar{u}, \omega])}{G}, \quad (10)$$

где  $g(\bar{x})$  – одномерный фильтр,  $G$  – нормализация для фильтра Гаусса.

После определения ядра фильтрации используем метод локальной фильтрации для вычисления уравнения 9.

### 3. Результаты

В работе показана эффективность метода на сценах со сложным переносом света (рис. 1, 2).

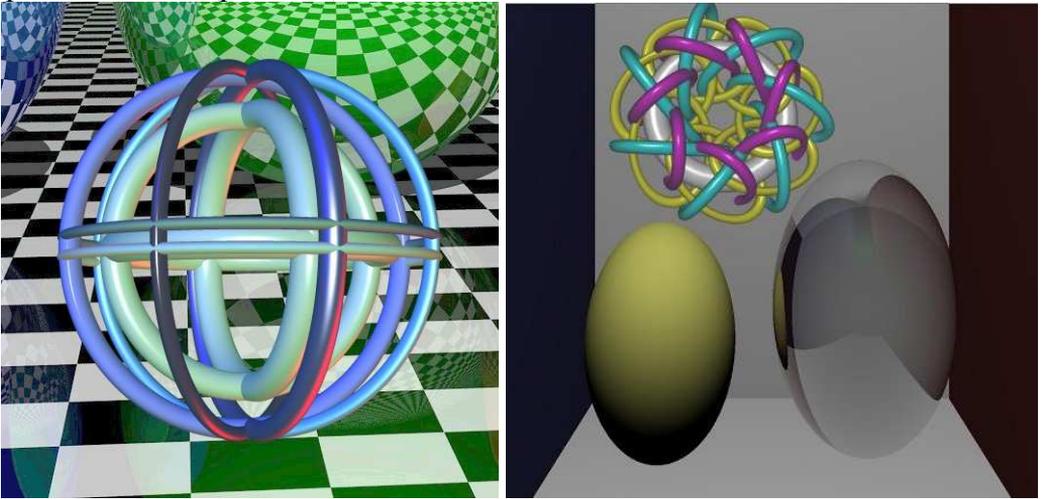


Рис. 1. Сглаженные сцены с функциональными объектами

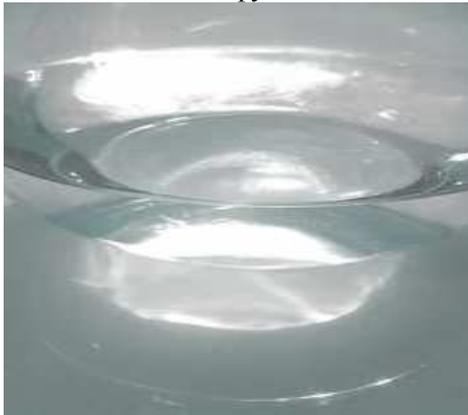


Рис. 2. Сглаженная сцена с каустикой

Тесты показали способность метода сглаживать текстуры с различными типами глянцевых отражений.

Рисунок 1 (слева) иллюстрирует способность метода сглаживать текстуры, просматриваемые через косвенное отражение. Используется EWA для фильтрации альbedo. Рисунок 1 (справа) иллюстрирует способность метода правильно предсказывать фильтрующие ядра для косвенных отражений в сложных случаях. Результат имеет высокую дисперсию, ошибки визуально не видны из-за смещения фильтрации. Сглаживание точное и согласованное во времени. На рисунке 2 показана тестовая сцена стеклянного сосуда с каустикой. Тестирование производилось на компьютере с процессором Intel Core2 CPU E8400 3.0 GHz, и графическом процессоре GeForce GTX 470 (табл. 1). Изображения было визуализировано с разрешением 1024×768 пикселей. Реализован метод с использованием Direct3D 11 и HLSL. Для метода достаточна архитектура шейдера модели 4. Сцена стеклянного сосуда содержит среду, получающую каустику от полупрозрачной модели. Показан сложный эффект многократного преломления. Преломленные лучи каустики вновь преломляются на поверхности воды. Каустика под поверхностью воды сложна с точки зрения производительности. Поскольку практически никакие каустические лучи не перекрываются. Поэтому скорость заполнения очень высока. Поверхностные каустики интерполируются между соседними объемами каустики, используя соседние пути. Для каждой вершины пути используется функция площади, которая усредняется по каустическим лучам. Применен метод объемного освещения для объемной каустики. Конечное изображение состоит из прямого освещения поверхности, объемного освещения с тенями, поверхностных и объемных каустик.

Табл. 1: Производительность тестовой сцены (рис. 3)

Геометрические операции	Растрирование	Количество лучей каустик	Количество кадров в секунду
18.6 миллисекунд	20.4 миллисекунд	4800	18

#### 4. Заключение

Представлен метод сглаживания функционально заданных объектов в сценах с глобальной освещенностью. Описан подход к фильтрации сложных сцен освещения с учетом вторичных эффектов подробных карт цвета, нормалей и смещения. Применяется частотный анализ переноса света. Метод прост в реализации на существующих средствах визуализации. С помощью метода обеспечивается рендеринг такого же качества для сложных изображений, но на порядок с меньшим временем визуализации, в сравнении с известными методами.

#### Список литературы / References

1. Yan L.Q., Foley J. Realistic Rendering in "Details" // IEEE engineering in medicine and biology magazine: the quarterly magazine of the Engineering in Medicine & Biology Society. 2021, 41(4):20-26. DOI:10.1109/MCG.2021.3077918.

2. Torregrosa S., Champaney V., Ammar A., Herbert V. Surrogate parametric metamodel based on Optimal Transport // Mathematics and Computers in Simulation. 2021, 194(2). DOI: 10.1016/j.matcom.2021.11.010.
3. Kuznetsov K. Mullia Z. Xu, Hasan M. NeuMIP: Multi-resolution neural materials // ACM Transactions on Graphics. 2021, 40(4):1-13. DOI: 10.1145/3450626.3459795
4. Chermain X., Claux F., Merillou S. A microfacet-based BRDF for the accurate and efficient rendering of high-definition specular normal maps // Springer, The Visual Computer. 2021, 36(1). DOI: 10.1007/s00371-018-1606-7.
5. Chermain X., Claux F., Merillou S. Glint Rendering based on a Multiple-Scattering Patch BRDF // Computer Graphics Forum. 2019, 38(4):27-37. DOI: 10.1111/cgf.13767.
6. Li T.M., Aittala M., Durand F., Lehti J. Differentiable Monte Carlo ray tracing through edge sampling // SIGGRAPH Asia 2018 Technical Papers, ACM Transactions on Graphics. 2018, 37(6):1-11. DOI: 10.1145/3272127.3275109.
7. Loubet, Zeltner T., Holzschuch N., Jakob W. Slope-space integrals for specular next event estimation // ACM Transactions on Graphics. 2020. 39(6):1-13. DOI: 10.1145/3414685.3417811.
8. Max N., Duff T., Mildenhall B., Yan Y. Approximations for the distribution of microflake normals // Springer, The Visual Computer. 2018, 34(3). DOI: 10.1007/s00371-017-1352-2.
9. Son H.S., Han J.H. Real-Time Approximation of a Normal Distribution Function for Normal-Mapped Surfaces // IEICE Transactions on Information and Systems. 2018, E101.D(5):1462-1465. DOI: 10.1587/transinf.2017EDL8212.
10. Atanasov, Wilkie A., Koylazov V.N., Krivanek J. A Multiscale Microfacet Model Based on Inverse Bin Mapping // Computer Graphics Forum. 2021, 40(2):103-113. DOI: 10.1111/cgf.142618.
11. Vyatkin S. Perturbation functions for compact database // Review of computer engineering research. 2017, vol. 4, no. 1, pp. 30-37. doi: 10.18488/journal.76.2017.41.30.37.
12. Hua B.S., Gruson A., Hachisuka T. A Survey on Gradient-Domain Rendering // Computer Science, Computer Graphics Forum. 2019. DOI:10.1111/cgf.13652.

<b>Вяткин Сергей Иванович</b> – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	<b>Vyatkin Sergey Ivanovich</b> – candidate of technical sciences, senior research fellow
<b>Долговесов Борис Степанович</b> – кандидат технических наук, заведующий Лабораторией синтезирующих систем визуализации	<b>Dolgovesov Boris Stepanovich</b> – candidate of technical sciences, head of the synthesizing visualization systems Laboratory
sivser@mail.ru	

Received 11.06.2022