

Метод спектрального рендеринга с использованием рядов Фурье

Р. О. Родионов^{1,2}, Е. В. Приходько¹, В. А. Фролов^{1,2}, А. Г. Волобой²

¹Институт перспективных исследований проблем искусственного интеллекта и интеллектуальных систем МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

Аннотация. В данной статье рассматриваются задача спектрального рендеринга и ключевые проблемы, связанные с хранением и обработкой спектральных данных. Предлагается подход, основанный на использовании ограниченного числа коэффициентов ряда Фурье. Метод ориентирован на быстрый предварительный просмотр и интерактивное использование. Также решается проблема представления материалов в Фурье-базисе, в том числе с использованием нейронных сетей для аппроксимации спектральных распределений. Рассмотрена эффективность такого подхода для уменьшения дисперсии в задаче спектрального рендеринга.

Ключевые слова: спектральный рендеринг, ряд Фурье, нейронные модели материалов.

Spectral rendering method using Fourier series

R. O. Rodionov^{1,2}, E. V. Prikhodko¹, V. A. Frolov^{1,2}, A. G. Voloboy²

¹IAI Moscow State University, Moscow, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

Abstract. This paper addresses the problem of spectral rendering and key issues related to storing and processing spectral data. An approach based on using a limited number of Fourier series coefficients is proposed. The method is focused on fast preview and interactive use. The problem of representing materials in the Fourier basis is also solved, including using neural networks to approximate spectral distributions. The effectiveness of this approach for reducing variance in spectral rendering is considered.

Keywords: spectral rendering, Fourier series, neural material models.

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений физически корректного рендеринга является спектральный рендеринг: вместо привычного RGB-цвета в сценах применяется вещественная функция длины волны, описывающая спектральную плотность излучения света (или отражательной способности материалов). Спектр обычно представлен в рендер-системах и системах оптического моделирования в виде набора пар длина волны – значение спектра. Этот способ используется, например, в рендер-системе PBRT [1]. Данным способом могут быть представлены значения спектра для материалов, источников освещения, текстур. Кроме того, отдельные лучи или фотоны, переносящие спектр, как правило, сохраняют не весь спектр, а лишь некоторую выборку из него. При этом типичное число длин волн в таких выборках, как правило, является небольшим: 4, 8, 16, 32 [2]. Такое представление неоптимально как по памяти, так и по производительности.

К сожалению, даже простая выборка из такого спектра на практике приводит к необходимости реализации бинарного поиска в массиве, из-за чего некоторые рендер-системы [1, 3] для спектров материалов и источников заранее отображают спектр в массив с некоторым константным шагом, например в 1 нм.

Обычно это приводит к заметному (20–30%) увеличению скорости работы рендер-систем. Однако и метод с бинарным поиском, и тем более метод спектра с константным шагом на практике мало применимы для задания спектральных текстур, т.к. исходные 2D-текстуры превращаются в 3D-текстуры и начинают потреблять на 1–2 порядка больше памяти, чем обычные текстуры. На практике нам бы хотелось иметь хранилище значений 3D-функции, которое было бы относительно компактно и достаточно эффективно для обращения.

Поскольку большинство функций спектра, используемых на практике, являются непрерывными, их можно представить с помощью преобразования Фурье. Получаемые коэффициенты могут быть далее восстановлены в первоначальную функцию с помощью, например, рядов Фурье.

Современные исследования способов хранения спектра уже обращались к преобразованию Фурье как к компактному и эффективному представлению спектрального распределения световых источников или отражательных способностей материалов. На практике для хранения достаточно гладких распределений без сильной потери точности достаточно небольшого числа коэффициентов. Однако ни одна из рассмотренных работ не предлагает использование представления Фурье непосредственно в процессе рендеринга, что могло бы потенциально снизить затраты памяти (в т.ч. оперативной) при рендеринге и хранении сцен, снизить эффект цветового шума за счет использования полной информации о спектре вместо подвыборки и ускорить время получения изображения.

Целью данной статьи является исследование возможностей применения спектра в пространстве коэффициентов Фурье в системах рендеринга на основе трассировки путей.

Обзор существующих методов

Наиболее распространённым способом представления спектра в задачах спектрального рендеринга является дискретное хранение его значений на фиксированном наборе длин волн. Как правило, спектр представляется таблицей значений, равномерно распределённых по спектральному диапазону. И хотя в некоторых физических моделях материалов, таких как идеальные диэлектрики или интерференционные покрытия, отражённый или преломлённый луч может переносить вклад лишь одной длины волны [4], в большинстве случаев переносится сразу весь световой спектр. В таких случаях дискретное представление становится избыточным и неэффективным, что мотивирует поиск более компактных способов хранения спектра.

Работа [5] предлагает использовать небольшой вектор коэффициентов полинома для представления спектра отражения. Сумма таких векторов будет соответствовать сумме их спектров. Однако данный метод предназначен для получения синтетического спектра на основе известного цвета и возможности его использования для представления известного спектра не исследовались.

Также функцию спектрального распределения можно представить с помощью коэффициентов Фурье. Существует несколько работ, предлагающих данный подход. Авторы статьи [6] для восстановления функции предлагают использовать метод MESE (спектральная оценка максимальной энтропии), а также его модификацию – Bounded MESE для представления спектра отражения. Показано, что, применяя MESE, непрерывную функцию спектра можно с достаточной точностью представить всего шестью коэффициентами Фурье. Метод позволяет избежать артефактов и искажений, возникающих при прямой реконструкции усечённого ряда Фурье (рис. 1).

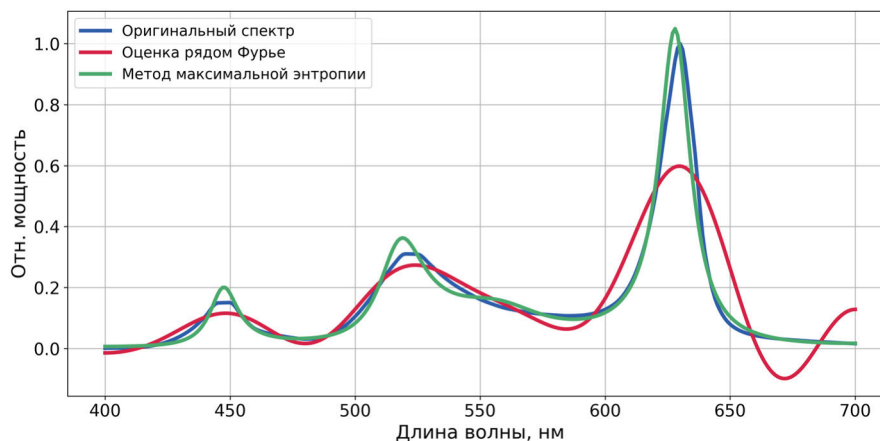


Рисунок 1. Реконструкция спектра излучения через усечённый ряд Фурье и с помощью метода максимальной энтропии

Связанный с таким подходом метод хранения спектральных текстур был представлен в статье [7]. Здесь показано, что спектральные текстуры, спектры которых конвертированы в коэффициенты Фурье, достаточно хорошо поддаются сжатию алгоритмом JPEG. Авторы данной работы не обращаются к методу MESE [6], для того чтобы сохранить точные значения спектра в точках выборки, и используют ряды Фурье для реконструкции спектра.

Работа [8] предлагает гибридную систему рендеринга, представляющую низкочастотные компоненты спектра в виде усеченного ряда Фурье, а высокочастотные с помощью традиционного способа представления спектра. При рендеринге спектр, представленный в виде коэффициентов Фурье, конвертируется в выборку значений спектра. Поскольку операция вычисления усеченного ряда Фурье выполняется за линейное время, такой подход дает возможность сохранить линейную сложность операций со спектром, позволяя передавать сразу весь спектр.

Предложенный метод

1. Косинусный ряд Фурье для представления спектра

Рассмотрим функцию сигнала $f(\phi)$ с периодом 2π , $f(\phi) \geq 0$. Далее представим эту функцию в виде $m + 1$ коэффициентов Фурье, используя набор базисных функций:

$$c_j(\phi) = \frac{1}{2\pi} (\exp(-ij\phi)) \in \mathbb{C}, j = 0 \dots m.$$

Полученные коэффициенты будут иметь следующий вид:

$$f_j = \int_{-\pi}^{\pi} f(\phi) c_j(\phi) d\phi \in \mathbb{C}, j = 0 \dots m.$$

Далее рассмотрим функцию спектрального распределения $g(\lambda)$ на видимом интервале $\Lambda = [\lambda_0, \lambda_1]$. Представим ее в виде четного сигнала $f(\phi)$: с помощью замены переменной

$$\phi(\lambda) = \pi \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_1 - \lambda_0} - \pi$$

отобразим ее на отрезок $[-\pi, 0]$ и отзеркалим относительно нуля.

Поскольку функция $f(\phi)$ чётная, получим следующее представление сигнала в виде набора коэффициентов:

$$f_j = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 f(\phi) \cos(j\phi) d\phi \in \mathbb{R}, j = 0 \dots m.$$

Таким образом, получим возможность извлекать приближение исходного сигнала в виде тригонометрического ряда Фурье, представляя высокочастотные компоненты нулевыми значениями:

$$f(\phi) \cong f_0 + 2 \sum_{j=1}^m f_j \cos(j\phi).$$

2. Фурье базис для спектрального рендеринга

Одна из актуальных проблем спектрального рендеринга – цветной шум, возникающий из-за того, что для оценки спектра используется разреженная выборка на видимом диапазоне длин волн. Особенно сильно этот эффект виден при наличии в сцене источников или материалов с резкими пиками в спектральном распределении, прозрачных объектов с показателем преломления, зависимым от длины волн проходящего света. Использование большой выборки может помочь решить первую проблему, но приводит к повышенным вычислительным затратам.

Пусть рассчитываемый световой луч сталкивается с поверхностью материала или источника света, описываемой некоторой двулучевой функцией отражательной способности (ДФОС, англ. Bidirectional reflectance distribution function – BRDF). Энергия входного луча и распределение отражательной способности для выбранного направления отражённого луча описываются своими коэффициентами Фурье:

$$f(\phi) = \sum_{i=0}^m a_i \cos(i\phi), g(\phi) = \sum_{j=0}^m b_j \cos(j\phi).$$

Тогда энергия отражённого луча будет иметь распределение

$$f(\phi)g(\phi) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m a_i b_j \cos(i\phi) \cos(j\phi).$$

Далее раскрываем произведение косинусов

$$\cos(i\phi) \cos(j\phi) = \frac{1}{2} [\cos((i+j)\phi) + \cos((i-j)\phi)],$$

где $\cos(-k\phi) = \cos(k\phi)$.

Поскольку наше представление хранит фиксированное число коэффициентов Фурье, приходится отсекал высокочастотные компоненты, что для множества пересечений может привести к накоплению ошибки и сильным искажениям спектра.

Полученное распределение в итоге описывается простой сверткой исходных распределений, представленных в виде усеченного ряда Фурье:

$$f(\phi)g(\phi) = \sum_{i=0}^m c_i \cos(i\phi),$$

$$c_i = \frac{1}{2} \sum_{p+q=i} a_p b_q + \frac{1}{2} \sum_{|p-q|=i} a_p b_q.$$

Итоговая формула позволяет посчитать коэффициенты Фурье для произведения двух сигналов.

Полученные в результате рендеринга коэффициенты Фурье-спектра необходимо преобразовать в цвет. Это можно сделать несколькими способами. Наиболее простым способом конвертации является вычисление спектра с помощью ряда Фурье. Полученный спектр далее переводится в координаты цвета цветовой модели XYZ:

$$X = \int_{\Lambda} s(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, Y = \int_{\Lambda} s(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, Z = \int_{\Lambda} s(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda.$$

Заметим, что поскольку перевод спектра в цвет в программах как правило [3] производится интегрированием на заранее определенных длинах волн, возможно предварительно подсчитать значения $\cos(i\phi)$ для ряда Фурье и использовать эти значения при конвертации.

Другим способом преобразования является свертка с предварительно подсчитанными коэффициентами Фурье для функций \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} . Полученные коэффициенты будут соответствовать произведению спектра с функциями чувствительности. Далее, поскольку для коэффициента Фурье a_0 функции $f(\phi)$, соответствующей спектру $g(\lambda)$ верно

$$a_0 = \int_{-\pi}^0 f(\phi) d\phi = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0} \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} g(\lambda) d\lambda,$$

то значения X , Y , Z будут равны соответствующим нулевым коэффициентам Фурье, умноженным на $(\lambda_1 - \lambda_0)$.

Также вместо рядов Фурье для преобразования коэффициентов в спектр можно использовать метод MESE.

Отметим, что при обычном рендеринге на выборках длин волн преобразование спектра в цвет производится на каждой итерации (что позволяет избежать необходимости хранения большого фреймбуфера). В случае коэффициентов Фурье данная проблема выражена гораздо меньше, так как число коэффициентов Фурье может быть значительно меньше, чем количество длин волн, что позволяет хранить фреймбуфер коэффициентов и производить вычисление цвета уже после трассировки путей.

3. Фурье-базис для уменьшения дисперсии

Помимо прямого расчёта спектрального освещения с помощью рядов Фурье, можно рассмотреть использование данного метода для уменьшения дисперсии в классическом методе спектрального рендеринга через выборку длин волн. Поскольку метод, использующий Фурье, даёт смещённую оценку распределения на всём диапазоне спектра, коррелирующую с истинным спектром, естественным шагом является использование техники контрольных переменных (control variates) [9].

Допустим, нам требуется оценить матожидание функции расчёта цвета пикселя на изображении $\ell = \mathbb{E}[H(X)]$, где X – выборка длин волн на видимом спектре, $Y = H(X)$ – оценка цвета пикселя по данной выборке в представлении CIE XYZ.

Оригинальный метод Монте Карло оценивает цвет следующим образом:

$$\widehat{Y}_n = \frac{H(X_1) + \dots + H(X_n)}{n}.$$

Дисперсия такой величины оценивается как $\text{Var}[\widehat{Y}_n] = \frac{1}{n} \text{Var}[H(X)]$.

Предположим, что мы хотим уменьшить дисперсию для одного луча в трассировке пути, используя малую выборку длин волн. Обозначим $C = F(X)$ – оценка цвета пикселя по выборке X длин волн из Фурье-спектра, $\mu = \mathbb{E}[C]$. Оценка методом контрольной переменной:

$$\widehat{\ell} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \alpha(C_i - \mu)) = \widehat{Y}_n - \alpha(\widehat{C}_n - \mu).$$

Имея оптимально подобранный параметр $\alpha^* = \frac{\text{Cov}(Y, C)}{\text{Var}[C]}$, можно было бы ожидать снижения дисперсии:

$$\text{Var}[\widehat{\ell}] = (1 - \rho^2) \text{Var}[\widehat{Y}_n] < \text{Var}[\widehat{Y}_n],$$

где ρ – корреляция между Y и C [10]. Однако оптимальное значение коэффициента α^* невозможно найти заранее, поэтому зачастую прибегают к аппроксимациям, оценивающим параметр некоторой небольшой стартовой выборкой или на каждом отдельном батче, что, в теории, создаёт небольшое смещение относительно оптимального решения.

4. Вычисление и хранение спектральных материалов

Главная особенность спектрального рендеринга – возможность визуализации явлений, являющихся прямым следствием спектральной природы света. Только такой подход позволяет корректно показать взаимодействие световых источников и материалов со сложными спектральными распределениями, явления интерференции, дифракции, дисперсии и поляризации света. Явным ограничением рассматриваемого метода является отсутствие зависимости направления распространения лучей от длины волны, поскольку этот метод переносит энергию для всего видимого диапазона. Поддержка такого типа явлений требует особого подхода, зачастую приводящего к сильному зашумлению итогового изображения. Данный метод, напротив, способен дать относительно быстрое приближение для визуализации спектральной сцены с минимумом затрат по памяти и практически полным отсутствием цветного шума ценой игнорирования вышеупомянутого явления.

Возможность распространения всего спектра целиком ведёт и к другому ограничению – сложность расчёта произвольных BRDF. Отдельные примеры не вызывают сложностей. Так, диффузные материалы, описываемые моделью Ламберта, сводятся к вычислению одного скалярного умножения с домножением получившегося значения на спектр альбеда. Требуется лишь хранить отдельный спектр или спектральную текстуру. Для универсальных моделей, таких как модель Кука–Торренса, а также для диэлектриков, проводников и множества других материалов, вызывает сложность вычисление значения функции Френеля. Одним из вариантов решения проблемы является использование аппроксимаций, таких как модель Шлика [11] или более точная модель на основе декомпозиции спектра отражения [12].

Другой вариант – использование предрассчитанных таблиц отражательной и пропускательной способности. Таблицы имеют разрешение $N \cdot L$, где N – размер выборки длин волн; L – число выбранных углов. Для избежания алиасинга и цветовых искажений нет необходимости хранить большое число значений, однако это число можно сократить до $M \cdot L$, предполагая спектр достаточно гладким и хорошо представимым дискретным преобразованием Фурье, что обычно верно для спектров отражения и пропускания. Описанный подход особенно полезен для сложных материалов, таких как однослойные и многослойные тонкие плёнки.

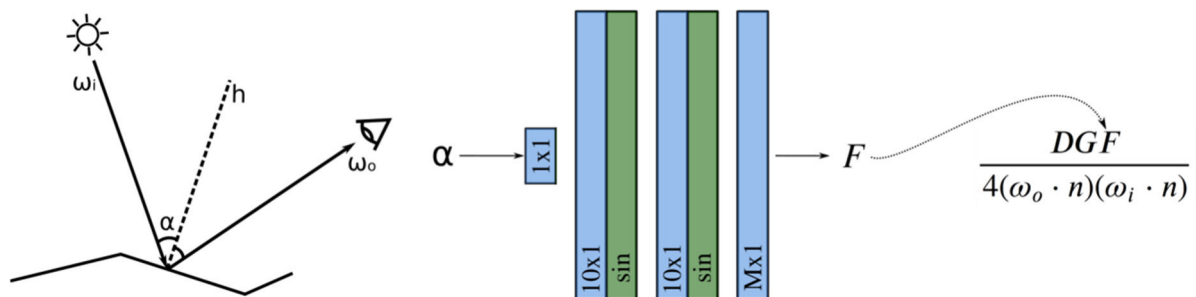


Рисунок 2. Вычисление компоненты Френеля для модели Кука–Торренса с помощью нейронной сети.

Пайплайн поддерживает задание BRDF или его компонент в виде нейронной сети. Пример вычисления компоненты Френеля в модели Кука–Торренса показан на рисунке 2. Аналогично работам [13, 14], нейронные функции BRDF представляются в виде многослойного перцептрона с малым числом внутренних слоёв и нейронов. Число выходных нейронов совпадает с числом используемых коэффициентов Фурье. Для обучения используется эталонная функция BRDF и случайные входные параметры. На рисунке 3 изображены оригинальная, реконструированная из Фурье-базиса (10 коэффициентов на каждый угол наблюдения) и реконструированная из предсказанного нейронной сетью Фурье-базиса таблица отражательной способности для диэлектрической тонкой плёнки. Для гладких распределений, таких как показанное в примере, не требуется большого числа параметров. Используемая на рисунке 2 нейронная сеть использует два внутренних слоя по 10 нейронов, периодическую функцию активации (синусоида) и 10 коэффициентов Фурье. Обучение занимает около 2 минут на RTX 4070.

Применение компактных нейросетей позволяет избежать хранения таблиц с высоким разрешением и сократить потребление памяти для реконструкции гладких сигналов. В отличие от похожей работы по нейронным спектральным BRDF [14], одному проходу нейросети соответствует весь спектр, а не значение на одной длине волны, что помогает сократить время рендеринга. Использование

нейронных сетей даёт и другую возможность – задание параметрических моделей (BRDF с зависимостью от параметров материала в конкретной точке). Входные параметры задаются в текстурах (заданных художником или полученных в ходе обучения нейросети, как в работе [13]), и подаются в нейронную сеть во время расчёта материала.

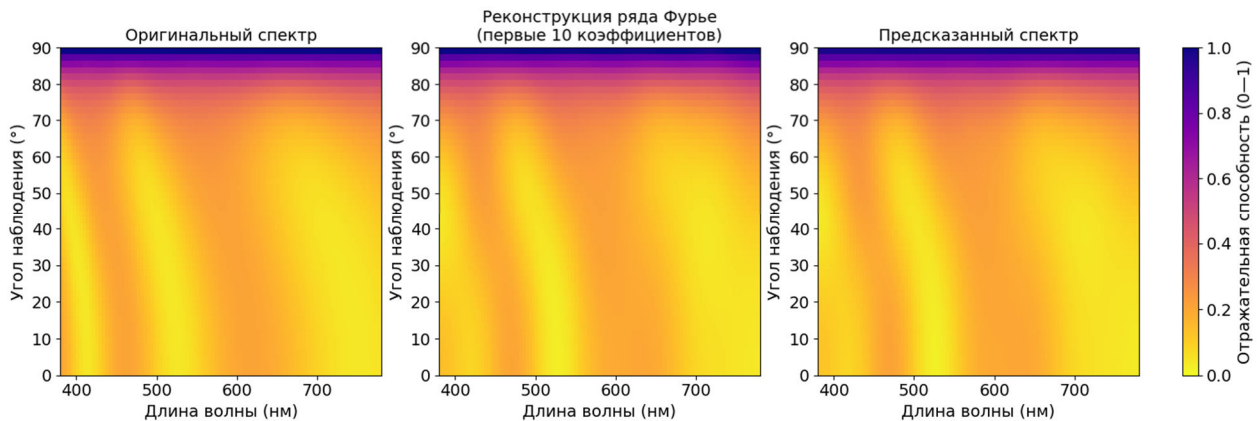


Рисунок 3. Таблица отражательной способности:

- 1) хранящаяся в явном виде; 2) реконструированная из предрассчитанного ряда Фурье;
- 3) реконструированная из предсказанного нейронной сетью ряда Фурье

На рисунке 4 показана сцена, содержащая описанные выше материалы. Для визуализации использовался метод на основе коэффициентов Фурье. Все материалы, кроме диффузных, используют предрассчитанные таблицы отражательной и пропускательной способности (для прозрачных материалов) либо представлены в весах нейронных сетей.

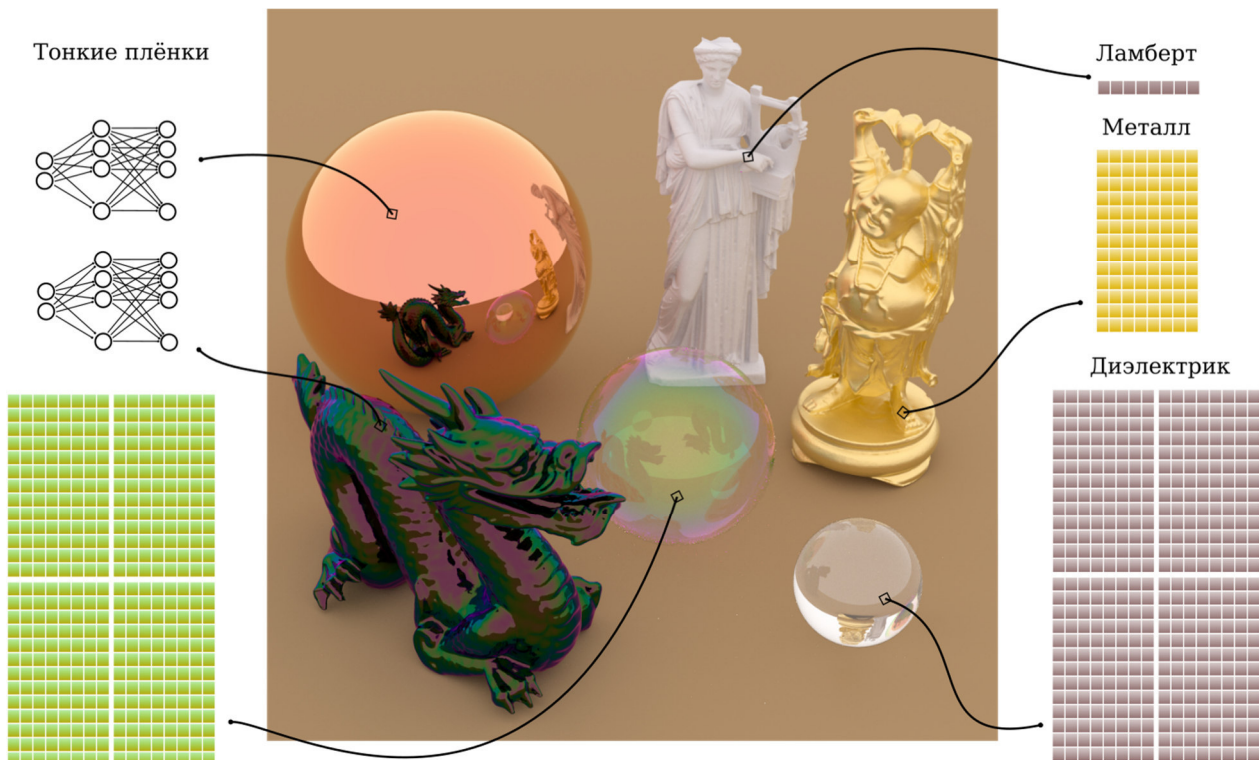


Рисунок 4. Поддерживаемые материалы и их представления

Эксперименты

1. Реализация предложенного метода в системе спектрального рендеринга

На текущем этапе работы метод спектрального рендеринга с использованием метода максимальной энтропии и предложенный метод, использующий усечённые ряды Фурье, реализованы в рендер системе Hydra Core 3 [3].

Для работы с рядами Фурье были реализованы способы конвертации итоговых коэффициентов в цвет: с помощью рядов Фурье, с помощью таблицы поиска и с помощью свертки с функциями цветовой чувствительности. Рассматривались два случая: преобразование в цвет в конце рендеринга (коэффициенты Фурье хранились в отдельном буфере) и на каждой итерации.

Были проведены сравнения данных методов при рендеринге сцен (рис. 5-7). В качестве метрики качества использовалась метрика CIE ΔE . Рендеринг производился с разрешением 512x512 и размером выборки для пикселя (числом итераций), равным 64. Результаты сравнения можно увидеть в таблице:

Результаты сравнения различных способов рендеринга

	Ряды Фурье	Таблица поиска	Нулевой коэфф.	MESE	Spec32 ¹
CIE ΔE	11.5498	11.5498	11.5577	11.5578	11.6477
PSNR	17.30	17.30	17.29	17.29	17.39
Время рендеринга (спектральный буфер), с	7.8	7.5	7.4	9.8	—
Время рендеринга (RGB буфер), с	31.1	11.1	7.5	162.3	8.3

CPU: AMD Ryzen 7 9700x @ 3.80 GHz, 32 GB RAM. GPU не использовался.

Анализ результатов показывает, что метод преобразования на основе нулевого коэффициента Фурье оказался наиболее быстрым в обоих случаях. При этом он имеет малую ошибку по сравнению с использованием коэффициентов Фурье. Также из таблицы видно, что использование методов на основе коэффициентов Фурье позволяет достичь меньшей ошибки по сравнению с обычным спектральным рендерингом с размером выборки 32.

На рисунке 7 можно заметить, что средняя цветовая ошибка метода на основе рядов Фурье меньше чем отличие для спектра с размером выборки 32. Также видно, что метрика PSNR для обоих способов рендеринга остается приблизительно одинаковым (что можно объяснить тем, что пространственный шум гораздо сильнее влияет на значение метрики, чем цветовой).

Далее были проведены эксперименты с применением спектра с явно выраженными пиками (лазер). Спектральное распределение источника можно увидеть на рисунке 8. Результаты представлены на рисунках 9, 10.

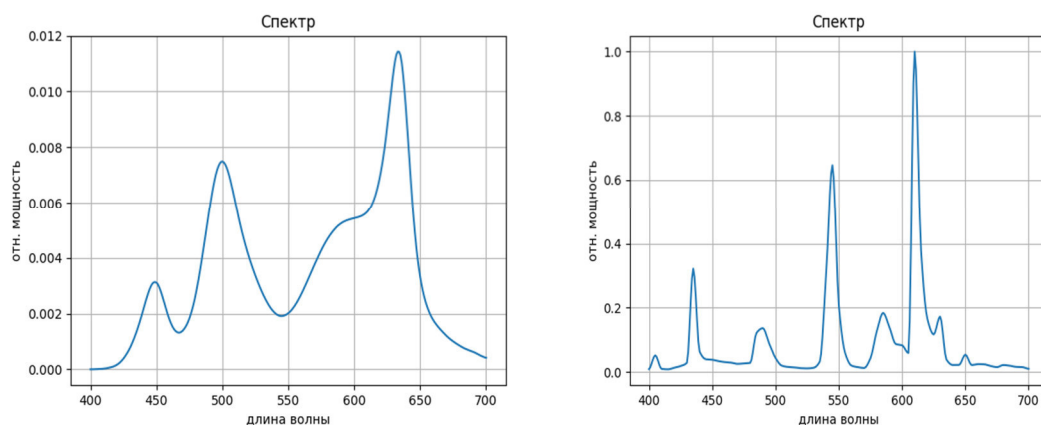


Рис. 5. Графики спектрального распределения ламп для сцены 1

¹ Время рендеринга с отдельным спектральным буфером не замерялось.

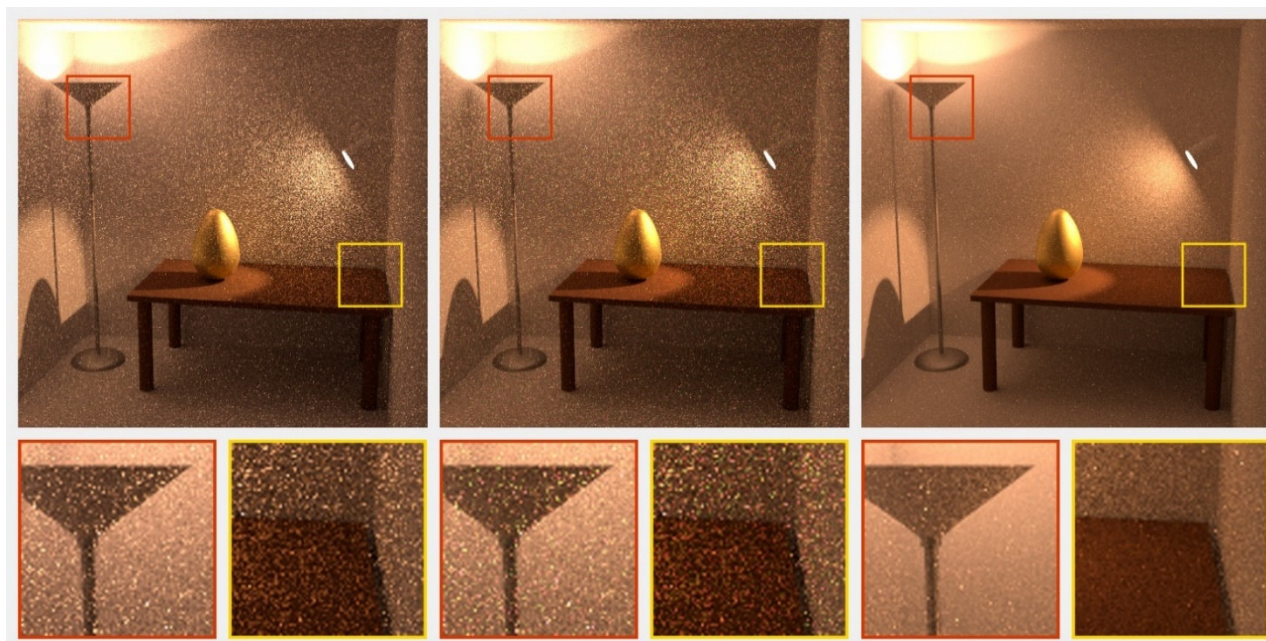


Рисунок 6. Примеры сцены 1 (размер выборки на пиксель – 256): предложенный метод, обычный спектральный рендеринг с размером выборки 32, изображение с большим размером выборки

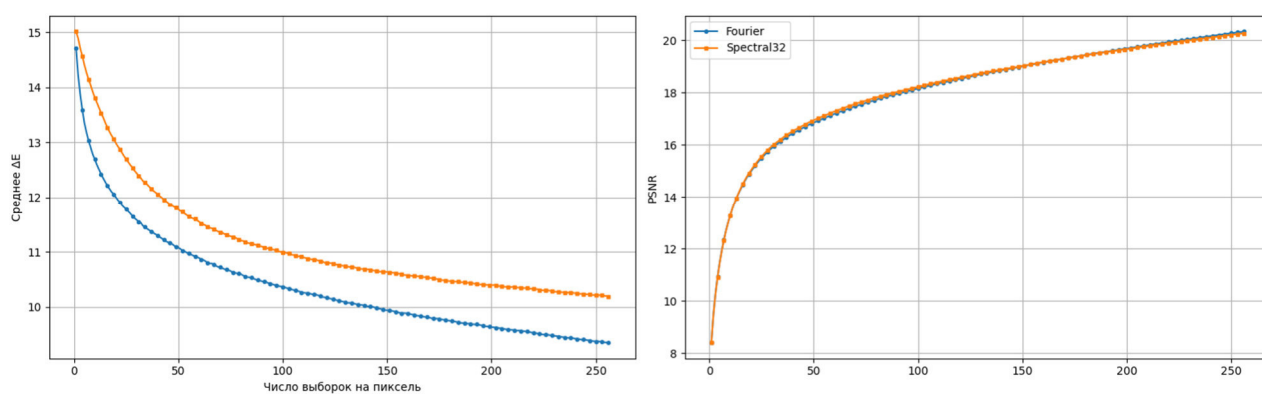


Рисунок 7. Графики средних значений CIE ΔE и PSNR для рендеринга в зависимости от размера выборки на пиксель (сцена 1)

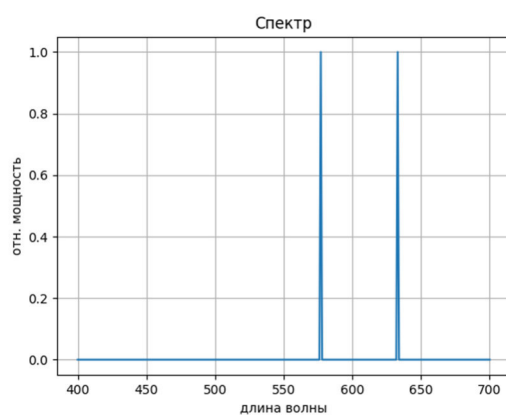


Рисунок 8. График спектрального распределения источника света для сцены 2

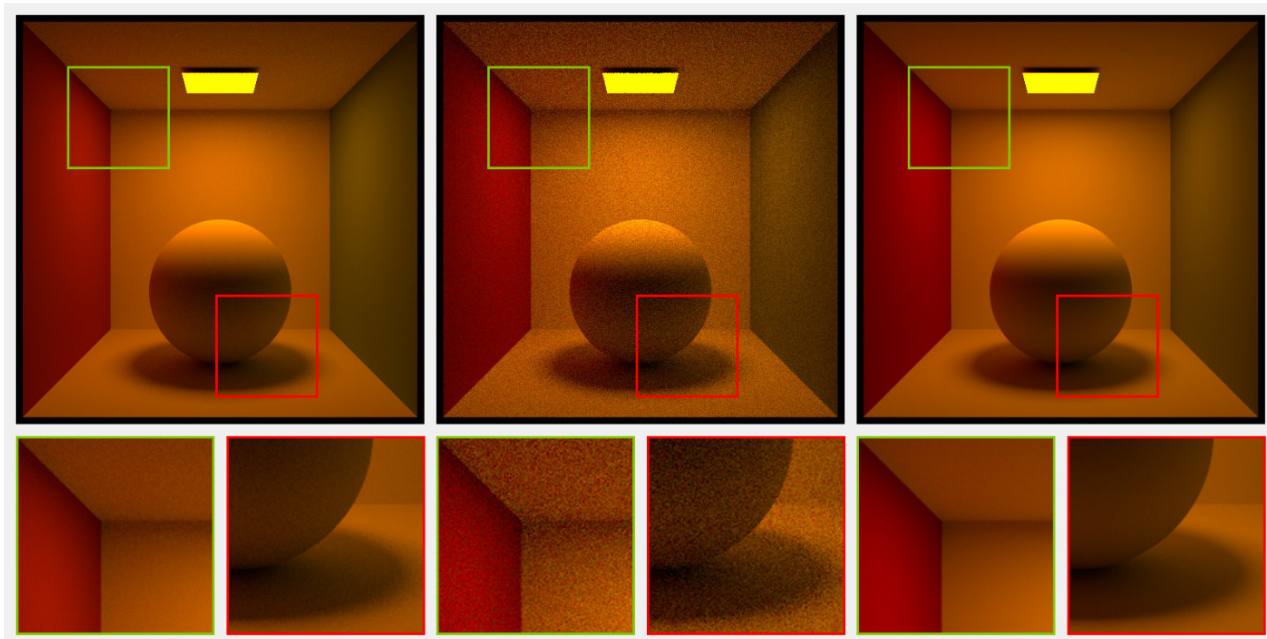


Рисунок 9. Примеры сцены 2 (размер выборки на пиксель – 256): предложенный метод, обычный спектральный рендеринг с размером выборки 32, эталонное изображение

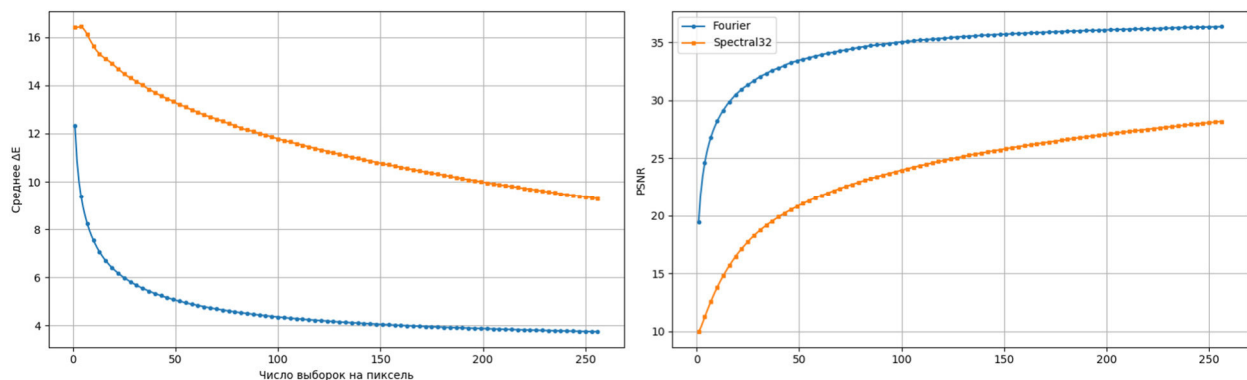


Рисунок 10. Графики средних значений CIE ΔE и PSNR для рендеринга в зависимости от размера выборки на пиксель (сцена 2)

По результатам рендеринга сцены 2 можно заметить, что предложенный метод позволил значительно снизить цветовой шум.

2. Метод уменьшения дисперсии

Для тестирования метода Фурье при использовании его в качестве контрольной переменной проведён эксперимент: прямое освещение цветовой калибровочной мишени рассчитывается для различных источников, для каждого метода результаты замеряются и сравниваются с эталоном.

Используемая калибровочная мишень (ColorChecker® Classic 2002 GretagMacBeth, рис. 11) имеет 24 цвета. Взаимодействие источника с поверхностью рассчитывается следующими методами:

- 1) равномерная выборка длин волн на спектре;
- 2) стратифицированная выборка (равномерная выборка на фиксированных диапазонах);
- 3) выборка на расстояниях с фиксированным шагом относительно случайно выбранной длины волны (Hero Wavelength Spectral Sampling [15]);
- 4) предложенный метод на основе Фурье-базиса;
- 5) Фурье-базис в качестве контрольной переменной для методов 1–3.

Для оценки отклонения полученного цвета от эталонного выбрана метрика ΔE .

На рисунках 12 и 13 показаны замеры для двух источников. Методы, основанные на выборке длин волн, используют 12 коэффициентов для переноса излучения. Объединённый метод с контрольной переменной использует 8 длин волн и 4 коэффициента Фурье.

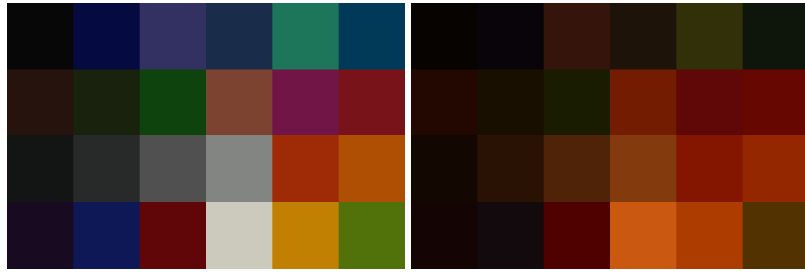


Рисунок 11. Цветовая калибровочная мишень, освещённая двумя различными источниками: D6500 и фосфорный светодиод

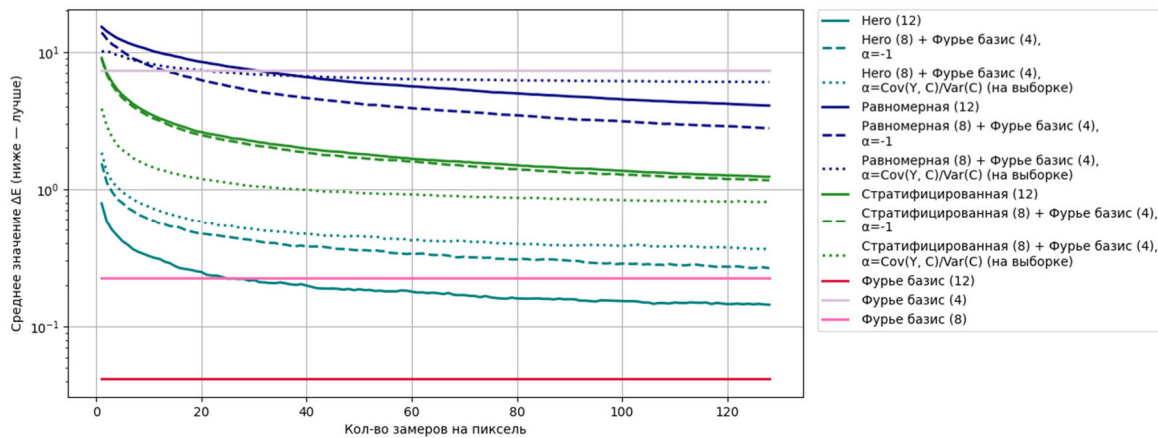


Рисунок 12. Среднее значение ΔE для прямого освещения с источником D6500

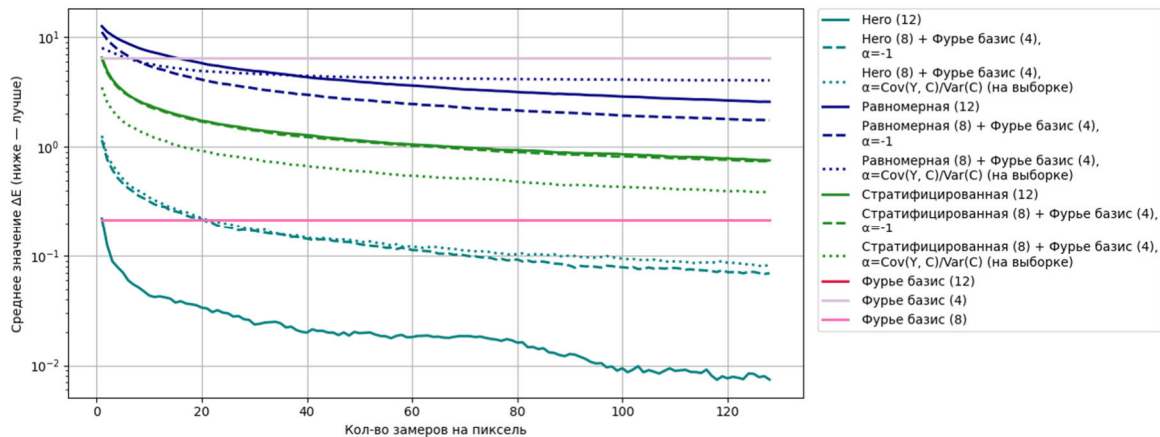


Рисунок 13. Среднее значение ΔE для прямого освещения с фосфорным светодиодом

Обсуждение результатов

Результаты сравнения рассматриваемых вариантов рендеринга с помощью коэффициентов Фурье, представленные выше в таблице, демонстрируют, что предложенный метод позволяет достичь качества рендеринга, сравнимого с традиционным подходом. На сценах с источниками освещения, имеющими спектральное распределение с заметными пиками, метод позволяет получить выигрыш по метрике ΔE .

Также из результатов следует, что наиболее выгодным способом преобразования итогового спектра в цвет является использование нулевого коэффициента свертки спектра с кривыми цветовой чувствительности. Важным фактом является то, что метод MESE хоть и зарекомендовал себя в качестве способа хранения спектра [6], все же не смог дать существенного выигрыша в комбинации с нашим методом и существенно увеличил время рендеринга.

Предложенный метод показал значительное улучшение результатов для источников с явно выраженными пиками (как например, лазеров). Это может быть связано с тем, что значения спектра

в пиках (имеющие наибольший вклад в результат рендеринга) могут не попадать в выборку спектра. Такая проблема не возникает при представлении спектра рядами Фурье, так как в данном случае для трассировки путей используется весь спектр, а не его подвыборка.

Поскольку предложенный метод позволяет достичь малого цветового шума даже на небольшом размере выборки на пиксель, из результатов следует возможность использования данного метода для быстрой генерации изображений предварительного просмотра сцен.

Как показали эксперименты, рассмотренный метод уменьшения дисперсии, использующий контрольные переменные, способен дать ощутимый прирост качества по метрике ΔE , но только при условии равномерной или стратифицированной выборки длин волн. Использование более продвинутых методов выборки приводит к отсутствию выигрыша от предложенной идеи.

Заключение

В данной работе был предложен метод спектрального рендеринга, основанный на коэффициентах усеченного ряда Фурье. Представлено исследование различных стратегий преобразования коэффициентов во время рендеринга. Показано достижение меньшего уровня цветового шума на полученном изображении по сравнению с традиционными методами при сопоставимом уровне качества и времени рендеринга.

Рассмотренный метод целесообразно применять для быстрого предпросмотра или интерактивного просмотра сцен, особенно при низком разрешении, когда цветовой шум наиболее заметен и существенно влияет на восприятие. Данный подход потенциально применим и в других приложениях, которые будут подробно рассмотрены в последующих исследованиях.

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-11-00054, <https://rscf.ru/project/25-11-00054/>.

Список литературы

1. Система реалистичного рендеринга PBRT 4. URL:<https://github.com/mmp/pbrt-v4> (Дата обращения: 12.07.2025).
2. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically Based Rendering: from theory to implementation. Fourth ed. Section 4.6.5. URL: https://www.pbr-book.org/4ed/Radiometry,_Spectra,_and_Color/Color#ChoosingtheNumberofWavelengthSamples (дата обращения: 12.07.2025).
3. Система реалистичного рендеринга HydraCore3 // URL:<https://github.com/Ray-Tracing-Systems/HydraCore3> (Дата обращения: 12.07.2025).
4. Evans G. F., Mccool M. D. Stratified wavelength clusters for efficient spectral Monte Carlo rendering // Graphics Interface '99. Morgan Kaufmann. 1999. P. 42–49.
5. Jakob W., Hanika J. A low-dimensional function space for efficient spectral upsampling. // Computer Graphics Forum. 2019. Vol. 38, no. 2. P. 147–155.
6. Using moments to represent bounded signals for spectral rendering / C. Peters [and others] // ACM Transactions on Graphics. 2019. Vol. 38, no. 4. P. 1–14.
7. Fichet A., Peters C., Compression of Spectral Images using Spectral JPEG XL // Journal of Computer Graphics Techniques (JCGT). 2025. Vol. 14, no. 1. P. 49–69.
8. A spectrally based framework for realistic image synthesis / Y. Sun [and others] // Visual Comp. 2001. Vol. 17. P. 429–444.
9. Lemieux C. Control Variates // Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. 2017. P. 1–8.
10. Botev Z., Ridder A. Variance reduction // Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. 2017. P. 1–6.
11. Schlick C. An inexpensive BRDF model for physically-based rendering // Computer graphics forum. 1994. Vol. 13. P. 233–246.
12. Belcour L, Bati M, Barla P. Bringing an accurate fresnel to real-time rendering: a preintegrable decomposition // SIGGRAPH 2020: special interest group on computer graphics and interactive techniques conference talks. ACM. 2020. P. 1–2.
13. Real-time Neural Appearance Models / T. Zeltner [and others] // ACM Transactions on Graphics. 2024. Vol. 43, no. 3. P. 1–17.
14. Chitnis S., Sole A., Chandran S. Spectral bidirectional reflectance distribution function simplification // Journal of Imaging. 2025. Vol. 11, no. 1. 18 p.
15. Hero wavelength spectral sampling / A. Wilkie [and others] // Computer Graphics Forum. 2014. Vol. 33, no. 4. P. 123–131.