

# Итерационный метод восстановления спектра по цвету RGB

В.В. Афанасьев<sup>1</sup>, А.В. Игнатенко<sup>2</sup>, А.Г. Волобой<sup>1</sup>

vafanasjev@graphics.cs.msu.ru | ignatenko@graphics.cs.msu.ru | voloboy@gin.keldysh.ru

<sup>1</sup>Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша, Москва, Россия

<sup>2</sup>Факультет вычислительной математики и кибернетики

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

Во многих задачах синтеза изображений необходимо проводить расчёты с учётом спектра светового излучения, а не только его цвета. Это позволяет корректно моделировать такие явления как дисперсия, спектральное поглощение. К таким задачам относится, например, фотореалистичная визуализация драгоценных камней. Однако в большинстве случаев получение исходных данных в спектральном представлении затруднено или невозможно. Как правило, цифровые камеры записывают цвет в виде трёх чисел, соответствующих отклику чувствительных элементов. Данная статья описывает итерационный метод получения спектра из цвета RGB, который позволяет строить результат с учётом заданных ограничений.

**Ключевые слова:** восстановление спектра, синтез изображений, фотореалистичный рендеринг

## Iterative spectrum reconstruction using RGB color

V. V. Afanasyev<sup>1</sup>, A. V. Ignatenko<sup>2</sup>, A. G. Voloboy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS

<sup>1</sup>Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Many image synthesis problems require spectrum-aware calculations instead of simple color calculations. It allows correct modelling of wavelength-dependent phenomena such as dispersion or spectral absorption. For example, photorealistic rendering of gemstones refers to such problems. In most cases initial spectral data acquisition is hard or impossible. Usually digital cameras store the color represented by 3 numbers corresponding to sensitive elements' response. This article describes an iterative method of spectrum reconstruction using RGB color that allows getting the result matching given constrains.

**Keywords:** spectrum reconstruction, image synthesis, photorealistic rendering

## Введение

Свет представляет собой электромагнитную волну, одной из характеристик которой является спектр. Человеческий глаз имеет 3 типа цветовых рецепторов, которые воспринимают свой диапазон длин волн из видимого спектра. В ходе экспериментов CIE были получены усреднённые кривые спектральной чувствительности человеческого глаза. Отклики чувствительных клеток глаза задают одно из линейных цветовых пространств. Преобразования между линейными цветовыми пространствами описаны во многих источниках, например, [4]. Здесь и далее будем работать с кривыми для условного линейного цветового пространства RGB.

Спектральные кривые для пространства CIE RGB приведены на рис. 1.

Для регистрации световых волн используются камеры, которые имеют несколько видов чувствительных элементов (обычно тоже 3), каждый со своей кривой отклика. Как правило, они соответствуют красному, зелёному и синему цветам:  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$ .

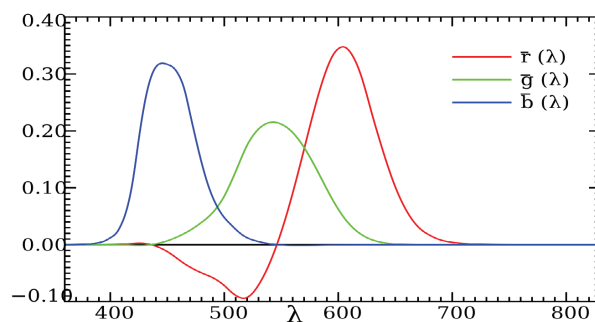


Рис. 1: Спектральные кривые CIE RGB.

Отклик камеры на спектр  $S(\lambda)$  выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} R &= \int_{380}^{780} S(\lambda)r(\lambda)d\lambda \\ G &= \int_{380}^{780} S(\lambda)g(\lambda)d\lambda \\ B &= \int_{380}^{780} S(\lambda)b(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

Устройства отображения цвета, такие как мониторы, имеют набор излучателей, как правило, 3 типов, каждый со своим спектром излучения. Цвет пикселя, представленный тремя числами  $RGB$ , задаёт мощность этих источников излучения, для наблюдателя спектры излучателей одного пикселя складываются, и его глаз воспринимает итоговый спектр в соответствии со своими кривыми отклика. Выше была описана общая схема записи и воспроизведения цвета. В случае синтеза изображений отсутствует этап записи цвета реального объекта, вместо этого его цвет рассчитывается на основе некоторых данных. В большей части задач можно пренебречь спектральной природой света и проводить расчёты с цветами  $RGB$ . Однако для определённого класса задач спектр важен: существуют такие явления как дисперсия, спектральное поглощение и отражение, учёт которых существенно влияет на результат. К таким задачам относится синтез изображений драгоценных камней, где дисперсия света в материале определяет итоговый цвет, который видит наблюдатель.

Для синтеза изображений с учётом спектра необходимо иметь спектральные исходные данные. В частности, панораму окружения бриллианта, или спектральные текстуры в других задачах. Однако со стандартного оборудования получить исходные данные можно в цвете  $RGB$ , и напрямую использовать их для расчётов в спектре нельзя. Нужно по имеющемуся цвету воспроизвести максимально приближенно исходный спектр. Из прямого преобразования спектра в  $RGB$  очевидно, что существует бесконечно много спектров, дающих одинаковый набор чисел  $RGB$ . Такие спектры называются метамерами. С математической точки зрения, подходит любая функция, дающая после преобразования (1) заданные числа  $RGB$ , однако с точки зрения физики, бессмысленны спектры с отрицательными значениями. По мере наличия априорной информации об исходном спектре, на результат могут быть наложены дополнительные ограничения, например, непрерывность или гладкость.

## Обзор существующих методов

Существующие решения основаны на представлении спектра в виде кусочно-постоянной функции, дискретизованной с определённым шагом по длине волны.

В статье [1] спектр реконструируется как линейная комбинация трёх базисных функций, соответствующих излучающим фосфорам, с коэффициентами, вычисленными из исходного цвета  $RGB$  путём решения системы линейных уравнений.

В [2] предлагается взять такую же линейную комбинацию от заданных автором функций: константной, синусоидальной и косинусоидальной, с коэффициентами, полученными аналогичным способом.

Данные два подхода позволяют получить спектры, которые после преобразования имеют в точности исходный цвет  $RGB$  при заданных кривых отклика. Проблема этих подходов состоит в том, что они не учитывают реальных физических свойств результирующего спектра, также результатом может быть функция, имеющая отрицательные значения. Автор работы [3] ввёл дополнительные ограничения на гладкость спектра для того, чтобы результат лучше соответствовал спектрам отражения известных материалов. На основе этого ограничения был построен набор базисных функций, и итоговый спектр является некоторой их линейной комбинацией.

Проблемой последнего метода является невозможность построить спектр для некоторых цветов.

## Предложенный подход

Предлагается итерационный метод восстановления спектра. На вход алгоритма подаётся:

- Набор коэффициентов линейного цветового пространства, например, 3 числа  $RGB$ .
- Набор кривых отклика  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$ , на основе которых из спектра можно получить цвет.
- Ограничения на результат, представленные в виде процедуры коррекции “неправильного” спектра в сторону “правильного”  $Constrain(S(\lambda))$ . Например, процедура, приравнивающая нулю все отрицательные значения.
- Точность приближения цвета  $\varepsilon$ .

Результатом применения алгоритма является спектр, цвет которого приближает заданный с указанной точностью  $\varepsilon$ . Спектр и кривые отклика могут быть заданы множеством дискретных способов или аналитически.

Начальным приближением  $S_0$  является нулевой спектр. Далее последовательно циклически выбираются компоненты цвета  $R, G, B, R, \dots$  и производятся следующие действия (пример для компоненты  $R$ ):

1. Расчёт текущего значения  $R_i$ .
2. Вычисление разности с соответствующим эталоном  $diff = R_{photo} - R_i$ .
3. Коррекция существующего спектра  $S_{i-1}$  на функцию  $k * BaseR(\lambda)$ . Коэффициент  $k$  вычисляется таким образом, чтобы  $diff \rightarrow 0$ .
4. Применение коррекции  $Constrain(S_i(\lambda))$  для приведения спектра в соответствие с ограничениями.

Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность по цвету:  $\|RGB_{photo} - RGB_i\| < \varepsilon$ . Базовые функции  $BaseR(\lambda)$ ,  $BaseG(\lambda)$ ,  $BaseB(\lambda)$  можно выбрать равными соответствующим кривым отклика камеры или другими, исходя из некоторой информации о спектре. В простейшем варианте, без ограничений на

спектр, алгоритм сойдётся к решению из работы [1] с данными базовыми функциями, т.к. является покомпонентным спуском. Обратим внимание, что в общем случае, при наличии ограничений полученное решение не будет являться линейной комбинацией базовых функций. Также введение ограничений может повлиять на сходимость. Сходимость для всевозможных ограничений на спектр не исследовалась.

## Результаты

Предложенный алгоритм был применён для перевода панорам из *RGB* в спектральное представление в задаче синтеза изображений бриллиантов в этой панораме. Алгоритм применяется к изображению попиксельно. Алгоритм реализован для кусочно-постоянных спектров в среде Matlab и опробован на реальных данных. Использовано ограничение неотрицательности спектра. Опытным путём не была выявлена расходимость алгоритма на каких-либо данных при заданных условиях.

Ниже приведён пример разложения тестового цветного изображения по длинам волн с шагом 5 нм. На рис. 2 показано исходное изображение и монохроматические составляющие для некоторых длин волн.

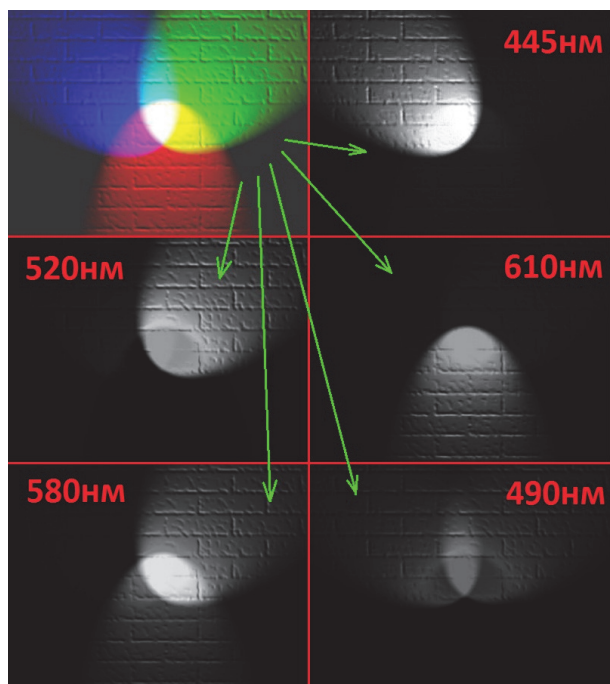


Рис. 2: Пример восстановления спектра.

Метод описан и применялся для трихроматических данных, однако использование 3 цветов не является его принципиальным ограничением. Также возможна произвольная форма задания использу-

емых функций при условии соответствующих изменений в процедурах суммирования, интегрирования и коррекции.

Пример визуализации бриллианта в работе [5] с использованием спектральной панорамы окружения, полученной из *RGB* панорамы описанным методом, приведен на рис. 3.



Рис. 3: Визуализация бриллианта в спектральной панораме.

## Выводы

Разработан метод восстановления спектра излучения по цвету, позволяющий итерационно строить итоговый спектр с учётом заданных ограничений. Данный метод был проверен в практических приложениях. В то же время, остаётся открытым вопрос сходимости для различных ограничений, накладываемых на спектр.

## Литература

- [1] Glassner A.S. How to derive a spectrum from an RGB triplet // IEEE Computer Graphics and Applications, July 1989 – Vol.9, No.4. pp.95–99.
- [2] Glassner A.S. Principles of Digital Image Synthesis. – San Francisco: Morgan-Kaufman, 1995. – pp.104-105.
- [3] Smits B. An RGB-to-spectrum conversion for reflectances // Graphics tools: The jgt editors' choice, 2005 – p.291.
- [4] Rogers D.F. Procedural Elements for Computer Graphics. – McGraw-Hill, 1985.
- [5] Лобанов И.В. Спектральные представления и аппаратно-ускоренная трассировка лучей в задаче визуализации драгоценных камней // Тезисы конференции «Ломоносов — 2014». – Москва, МАКС Пресс, 2014.