



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 77 за 2020 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Жданов А.Д., Жданов Д.Д.,
Бирюков Е.Д.

Реалистичный рендеринг на
основе прямых и обратных
фотонных карт

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Жданов А.Д., Жданов Д.Д., Бирюков Е.Д. Реалистичный рендеринг на основе прямых и обратных фотонных карт // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2020. № 77. 22 с. <http://doi.org/10.20948/prepr-2020-77>
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-77>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Российской академии наук**

**А.Д. Жданов, Д.Д. Жданов, Е.Д. Бирюков
Реалистичный рендеринг на основе
прямых и обратных фотонных карт**

Москва — 2020

Жданов А.Д., Жданов Д.Д., Бирюков Е.Д.

Реалистичный рендеринг на основе прямых и обратных фотонных карт

Работа посвящена методам решения задачи реалистичного рендеринга, основанным на двунаправленной стохастической трассировке лучей с использованием фотонных карт. В качестве основы предлагается использовать метод прогрессивных обратных фотонных карт, который позволяет сократить объем данных, используемых фотонными картами, ускорить процесс расчета яркости вторичного освещения и оценить ошибку яркости для каждой точки и для всего изображения. Рассматриваются методы, сочетающие прямые и обратные фотонные карты для расчета различных компонент яркости изображения, и методы эффективного распараллеливания, используемые для формирования фотонных карт, для вычисления трасс прямых и обратных лучей в процессе рендеринга и для расчета яркости вторичного и каустического освещения. Приводятся результаты моделирования, реализованные на основе разработанных методов и алгоритмов.

Ключевые слова: рендеринг, трассировка лучей, фотонные карты, обратные фотонные карты

Zhdanov A., Zhdanov D., Birukov E.

The realistic rendering with forward and backward photon mapping

The paper is devoted to the realistic rendering methods based on bi-directional stochastic ray tracing with photon mapping. It is proposed to use the method of progressive backward photon mapping, which allows reducing the amount of memory used to store the photon maps data, to speed up the process of calculating the indirect luminance, and to estimate the attained accuracy for each image pixel and for the entire image. Methods of combining forward and backward photon mapping for calculating different components of the image luminance and methods of efficient parallelization used to form photon maps, to trace forward and backward rays in the rendering process, and to calculate the luminance of indirect and caustic illumination components are considered. The simulation results are presented that were acquired with the developed methods and algorithms.

Key words: rendering, ray tracing, photon mapping, backward photon mapping

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 19-01-00435 и 18-08-01484.

1. Введение

Реалистичный рендеринг является частью современной машинной графики и используется в таких её областях, как реалистичная визуализация, виртуальное прототипирование и виртуальная реальность. Кроме того, реалистичный рендеринг используется для решения широкого круга прикладных задач, которые включают в себя формирование реалистичных изображений, моделирование сложных оптических эффектов, виртуальное прототипирование сложных оптических систем и т. д.

Основными алгоритмами, используемыми при реализации реалистичного рендеринга на современных рабочих станциях, являются алгоритмы, основанные на методах стохастической трассировки лучей. При этом задачей реалистичного рендеринга является расчет значения яркости для каждой точки синтезируемого изображения сцены. При разработке и реализации алгоритмов реалистичного рендеринга за основу берутся физически корректные законы распространения и преобразования светового излучения. Для этой цели в 1985 г. James Kajiya предложил [1] метод расчета видимой яркости с помощью вычисления интеграла:

$$L(\vec{p}, \vec{v}_r) = \tau(\vec{p}) \left(L_0(\vec{p}, \vec{v}_r) + \int_{\omega}^{4\pi} L_i(\vec{p}, \vec{v}_i) f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r) \cos(\vec{n}, \vec{v}_i) d\omega \right). \quad (1)$$

В формуле (1):

- \vec{p} – точка сбора яркости на поверхности объекта сцены;
- \vec{v}_r – направление на наблюдателя;
- \vec{v}_i – направление на источник освещения;
- $\tau(\vec{p})$ – коэффициент пропускания среды от точки поверхности \vec{p} до наблюдателя;
- $L_0(\vec{p}, \vec{v}_r)$ – собственная яркость поверхности;
- $L_i(\vec{p}, \vec{v}_i)$ – яркость освещения точки \vec{p} из направления \vec{v}_i ;
- $f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r)$ – значение двунаправленной функции рассеивания (ДФР) для точки поверхности \vec{p} , наблюдаемой по направлению \vec{v}_r и освещаемой из направления \vec{v}_i ;
- \vec{n} – нормаль к поверхности в точке \vec{p} .

Поскольку данное уравнение имеет аналитическое решение только для ограниченного количества сцен с определенным сочетанием оптических свойств материалов и геометрических форм, было разработано большое количество численных методов для решения данного уравнения. Наиболее подходящими подходами являются решения, основанные на трассировке лучей методом Монте-Карло. Это методы прямой, обратной и двунаправленной трассировки лучей. Эти методы используют различные решения для расчета компонент яркости прямого виденья ($L_0(\vec{p}, \vec{v}_r)$) и яркостей компонент прямого,

каустического и вторичного излучения $(\int_{\omega}^{4\pi} L_i(\vec{p}, \vec{v}_i) f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r) \cos(\vec{n}, \vec{v}_i) d\omega)$. Прямое и каустическое освещение представляет собой первый член этой бесконечной рекурсии, и разница между ними заключается в том, что каустическое освещение осуществляется через поверхности (или градиентные среды), не имеющие рассеивающих свойств. Яркость источника света просто скалируется на зеркальный коэффициент пропускания до поверхности наблюдения $(\tau(t_r)L_0(\vec{p}, \vec{v}_r))$. Яркость вторичного освещения определяется оставшимися членами суммы $(\int_{\omega}^{4\pi} L_i(\vec{p}, \vec{v}_i) f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r) \cos(\vec{n}, \vec{v}_i) d\omega)$.

Основными методами расчета видимой яркости являются прямая, обратная и двунаправленная трассировки лучей. Эти методы позволяют получить несмещенное уравнение рендеринга. Однако эффективность методов, основанных исключительно на методах прямой [2] или обратной трассировки лучей [3], может быть крайне низка в сценах со сложным вторичным и каустическим освещением. Классические методы двунаправленной трассировки лучей [4] могут обеспечить эффективный расчет яркости вторичного освещения в сценах, где на траектории луча от источника света до наблюдаемой диффузной поверхности происходит более одного диффузного события. Однако расчет яркости каустического освещения, особенно в сценах, содержащих источники света малого размера, для методов двунаправленной трассировки лучей является трудноразрешимой задачей. Поэтому наиболее универсальным методом расчета физически корректной яркости вторичного и каустического освещения является метод, основанный на использовании фотонных карт [5].

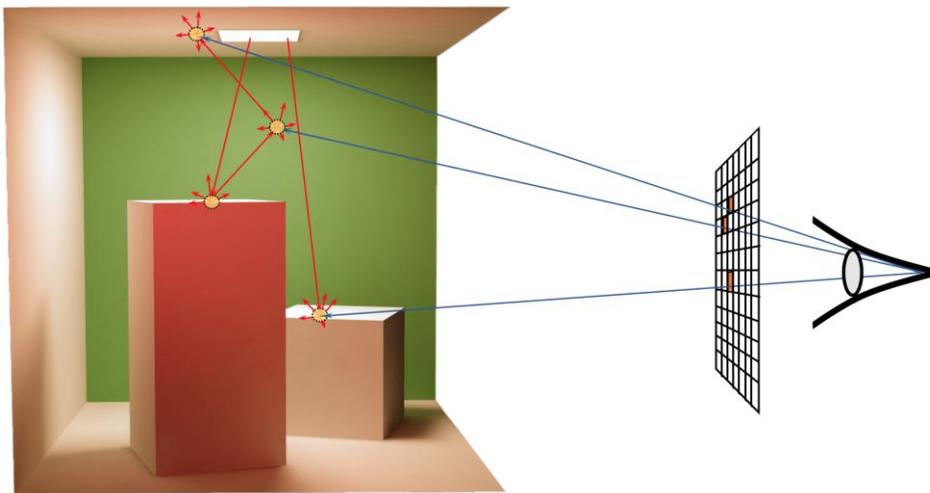


Рис. 1. Метод фотонных карт

В 1996 году Henrik Wann Jensen предложил алгоритм, использующий фотонные карты для расчета глобальной освещенности [6]. Разработанный им алгоритм рендеринга состоит из трех шагов: на первом шаге испускаются прямые лучи из источников света, распространяются по сцене и формируют

распределение фотонов на диффузных поверхностях сцены; на втором шаге на основе полученного распределения фотонов формируются фотонные карты для объектов сцены; на последнем шаге из камеры испускаются обратные лучи и ищется их пересечение с фотонными картами (рис. 1). В точках пересечения с фотонными картами происходит перерасчет светового потока, переносимого фотоном, в яркость вторичного излучения, наблюдаемую в данном направлении. Яркость наблюдения представляет собой сумму яркостей, создаваемых всеми фотонами, наблюдаемыми на трассе обратного луча (рис. 2):

$$L_{idc}(\vec{p}, \vec{v}_r) = \frac{\tau(\vec{p})}{\pi r^2} \sum_{i=1}^K f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r) \Delta\Phi(\vec{v}_i). \quad (2)$$

В формуле (2):

- \vec{p} – точка пересечения обратного луча с рассеивающей поверхностью сцены;
- \vec{v}_r – направление на наблюдателя;
- $\tau(\vec{p})$ – коэффициент пропускания среды от точки сбора яркости до наблюдателя;
- r – радиус сферы интегрирования (области наблюдения) обратного луча;
- K – количество фотонов, находящихся в области наблюдения обратного луча;
- $f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r)$ – значение двунаправленной функции рассеивания (ДФР) для точки поверхности \vec{p} , наблюдаемой по направлению \vec{v}_r и освещаемой из направления \vec{v}_i ;
- $\Delta\Phi(\vec{v}_i)$ – поток фотона, приносимый i -ым лучом, попавшим в область наблюдения обратного луча, из направления \vec{v}_i .

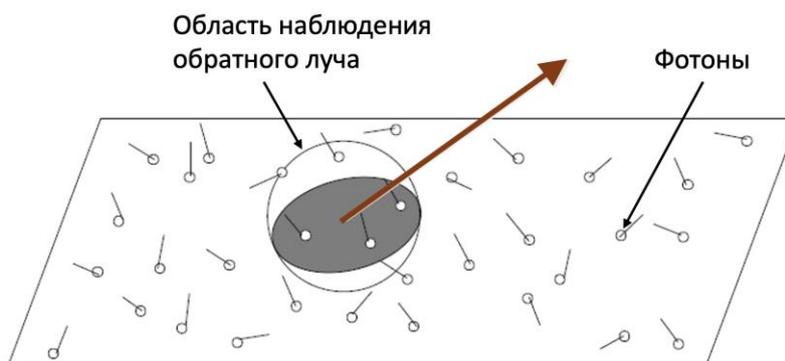


Рис. 2. Сбор распределения яркости с фотонов при трассировке обратного луча

Очевидно, что данное решение является смещенным, поскольку яркость усредняется по сфере интегрирования радиуса r . Смещенность решения является основным недостатком метода фотонных карт. На практике существуют два основных решения для определения радиуса сферы интегрирования. Во-первых, радиус можно задать в момент трассировки

прямых лучей. В этом случае он может быть либо завышен, либо занижен, поскольку на момент трассирования световых лучей отсутствует информация об условиях наблюдения области освещения. Некорректная оценка радиуса интегрирования может замедлить сходимость рендеринга или привести к размытию изображения. Во-вторых, радиус сферы можно вычислять в процессе трассировки обратных лучей. В данном случае радиус сферы интегрирования вычисляется исходя из заданного телесного угла интегрирования вторичной или каустической яркости. Сфера этого радиуса покрывает световые фотоны и вычисляет яркость вторичного освещения по формуле (2). Процесс сбора световых фотонов представлен на рис. 2. Недостатком этого подхода является усложнение алгоритма поиска пересечения луча с фотонами и, соответственно, замедление процесса рендеринга. Кроме того, метод прямых фотонных карт, как правило, требует сохранения всей истории трассы луча, т.е. фотонов, на всех диффузных поверхностях сцены. Для «замкнутых светлых» сцен это может привести к значительному увеличению памяти, требуемой для хранения фотонных карт, и замедлению рендеринга, связанному с обработкой большого объема данных.

2. Метод обратных фотонных карт

Идея формирования обратных фотонных карт для ускорения процесса финального сбора принадлежит Vlastimil Narwan [7], однако впоследствии она не получила должного развития.

В случае формирования обратных фотонных карт меняется физический смысл фотонной карты. В прямой фотонной карте хранится световой поток, переносимый от источников света, в то время как в обратной фотонной карте хранится фильтр на пути от камеры до соответствующей точки сбора яркости. Таким образом, для вычисления яркости вторичной и каустической составляющих излучения используется формула, схожая с формулой (2), но физический смысл параметров в этой формуле меняется:

$$L_{idc}(\vec{p}, \vec{v}_r) = \frac{\tau(\vec{p})}{\pi r^2} \sum_{i=1}^K f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r) \Delta\Phi(\vec{v}_i). \quad (3)$$

В формуле (3):

- \vec{p} – центр сферы интегрирования фотона обратной фотонной карты;
- \vec{v}_r – направление на наблюдателя;
- $\tau(\vec{p})$ – коэффициент пропускания среды от обратного фотона до наблюдателя, хранящийся в соответствующем обратном фотоне;
- r – радиус сферы интегрирования обратного фотона;
- K – количество попаданий прямых лучей, зафиксированных соответствующим обратным фотоном;

- $f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r)$ – значение двунаправленной функции рассеивания (ДФР) для точки поверхности \vec{p} , наблюдаемой по направлению \vec{v}_r и освещаемой из направления \vec{v}_i ;
- $\Delta\Phi(\vec{v}_i)$ – поток, приносимый i -ым лучом из направления \vec{v}_i .

Значение яркости первичного освещения может также вычисляться с использованием обратных фотонных карт, однако более корректным решением, исключая усреднение в области сферы интегрирования, является метод многократной выборки по значимости [8], выполняемый в процессе трассировки обратных лучей и формирования обратных фотонных карт:

$$L_d(\vec{p}, \vec{v}_r) = \frac{\tau(\vec{p})}{N} \sum_{i=1}^N \left(w_{i,1} \cdot L(\vec{p}, \vec{v}_i) + w_{i,2} \cdot f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r) \cdot \frac{I(\vec{v}_i) \cos(\vec{n}_i, \vec{v}_i)}{d^2} \right). \quad (4)$$

В формуле (4):

- \vec{p} – точка сбора яркости прямого освещения;
- \vec{v}_r – направление на наблюдателя из точки сбора яркости прямого освещения;
- $\tau(\vec{p})$ – коэффициент пропускания среды от точки сбора прямой яркости до наблюдателя;
- N – количество выборок;
- $w_{i,1}$ – вес яркости i -ой выборки для метода BDF Sampling;
- $L(\vec{p}, \vec{v}_i)$ – значение яркости i -ой выборки для метода BDF Sampling с направлением на источник света \vec{v}_i ;
- $w_{i,2}$ – вес яркости i -ой выборки для метода Light Sampling;
- $f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r) \cdot \frac{I(\vec{v}_i) \cos(\vec{n}_i, \vec{v}_i)}{d^2}$ – значение яркости i -ой выборки для метода Light Sampling с значением ДФР поверхности $f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r)$, интенсивностью освещения $I(\vec{v}_i)$, направлением от источника света \vec{v}_i , нормалью к поверхности \vec{n}_i и расстоянием до источника d .

Вес $w_{i,1}$, как правило, пропорционален отношению $f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r)$ к яркости идеального диффузора с интегральным коэффициентом яркости, соответствующим $f(\vec{p}, \vec{v}_i, \vec{v}_r)$. Вес $w_{i,2}$, как правило, обратно пропорционален телесному углу источника света, видимого с точки освещения. $w_{i,1}$ и $w_{i,2}$ нормируются таким образом, что их сумма равна 1. Основным достоинством метода обратных фотонных карт по сравнению с методом прямых фотонных карт является отсутствие необходимости формирования фотонов в областях, невидимых из камеры. Кроме того, этот метод позволяет ограничить глубину обратной трассировки луча (например, событием первого или второго диффузного рассеивания). Для учета яркости каустического освещения в обратной фотонной карте необходимо сохранять все точки трассы луча на поверхностях, в которых присутствуют рассеивающие свойства. Для сравнения объемов данных, необходимых для формирования прямых и обратных фотонных карт в процессе трассировки прямых и обратных лучей

соответственно, были использованы три тестовые сцены (рис. 3): Cornell Box, Room2 и Light Guides. В последней сцене было использовано три варианта расположения источников света и камеры:

- Вариант 1: источники света расположены внутри светопроводящих трубок, камера наблюдает всю сцену;
- Вариант 2: источники света расположены снаружи светопроводящих трубок и направлены в торцы, камера наблюдает всю сцену;
- Вариант 3: источники света расположены внутри светопроводящих трубок; камера смотрит в торец светопроводящих трубок.

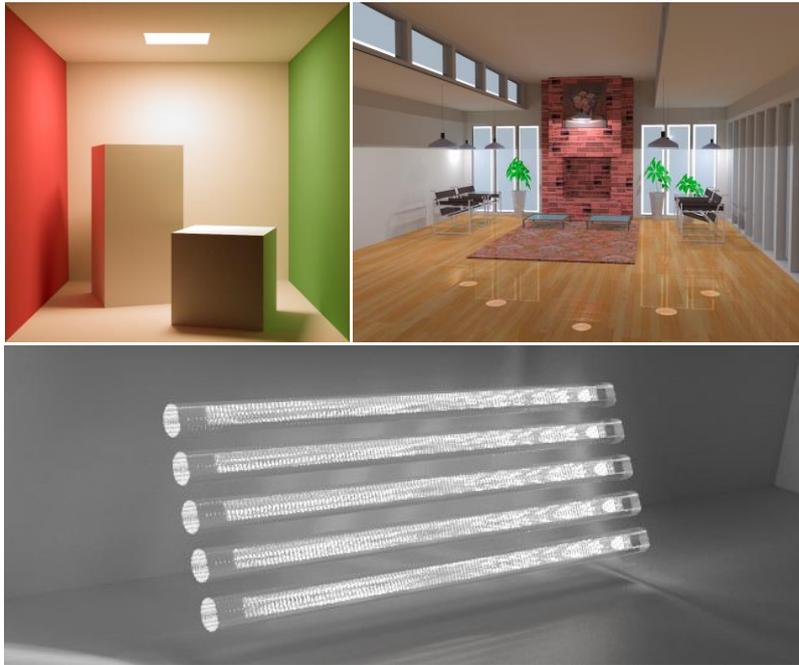


Рис. 3. Изображения тестовых сцен: Cornell Box(слева), Room2 (справа), Light Guides (внизу)

Результаты тестирования показали (см. табл. 1), что количество обратных фотонов, формируемых одним обратным лучом, в среднем в два раза меньше, чем количество прямых фотонов, формируемых одним прямым лучом. Стоит отметить, что положение камеры в последнем тесте не является стандартным для задач компьютерной графики, а задано искусственно, что привело к повышенному формированию обратных фотонов.

Таблица 1

Формирование фотонов прямыми и обратными лучами

Название сцены	Фотонов на прямой луч	Фотонов на обратный луч	Соотношение
Cornell Box	3.45	1.59	2.17
Room2	7.6	1.93	3.94

Название сцены	Фотонов на прямой луч	Фотонов на обратный луч	Соотношение
Light Guides (вариант 1)	7.6	3.1	2.45
Light Guides (вариант 2)	5.6	3.1	1.81
Light Guides (вариант 3)	7.6	5.9	1.29

Необходимо отметить, что несмотря на то, что прямая фотонная карта формирует избыточное количество фотонов, в случае формирования анимационных изображений для ряда камер с различными условиями наблюдения использование прямых фотонных карт будет предпочтительней, поскольку в отличие от обратной фотонной карты прямая фотонная карта создает глобальное освещение, которое может использовать любая камера. С другой стороны, при формировании изображения для одной камеры выигрыш от использования обратных фотонных карт может достигать трех и более крат.

3. Сочетание прямых и обратных фотонных карт

Как было показано выше, метод обратных фотонных карт так же, как и метод прямых фотонных карт, может использоваться для расчета яркости всех компонент освещения. Но если в прямых фотонных картах формируется избыточное количество фотонов, необходимых для расчета яркости вторичного освещения, то в обратных фотонных картах формируется избыточное количество фотонов, необходимых для расчета каустического освещения. Таким образом, наиболее эффективным решением может быть сочетание прямых и обратных фотонных карт для расчета различных компонент яркости. А именно, накопление источников яркости, сформированных каустическим освещением, более целесообразно осуществлять в прямых фотонных картах, а возможных источников яркости вторичного освещения – в обратных фотонных картах (рис. 4).

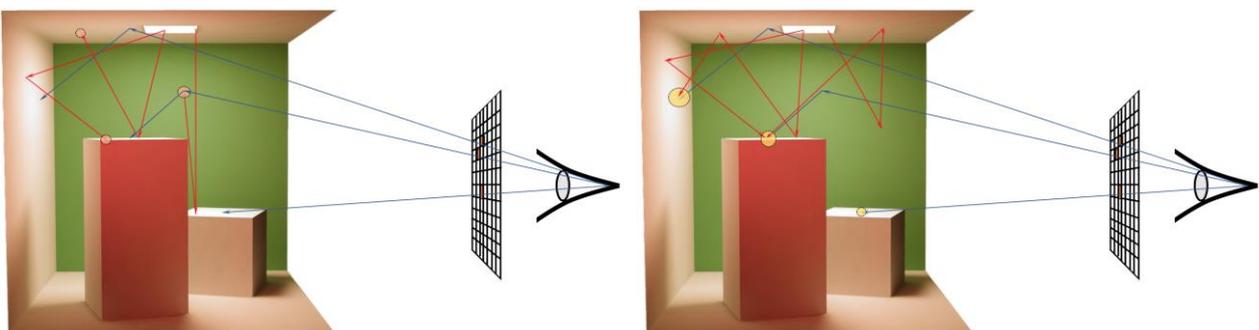


Рис. 4. Формирование каустических прямых фотонных карт (слева) и вторичных обратных фотонных карт (справа)

Основываясь на этом предположении, был разработан алгоритм рендеринга (рис. 5), последовательно формирующий прямые и обратные фотонные карты для расчета различных компонент освещения.

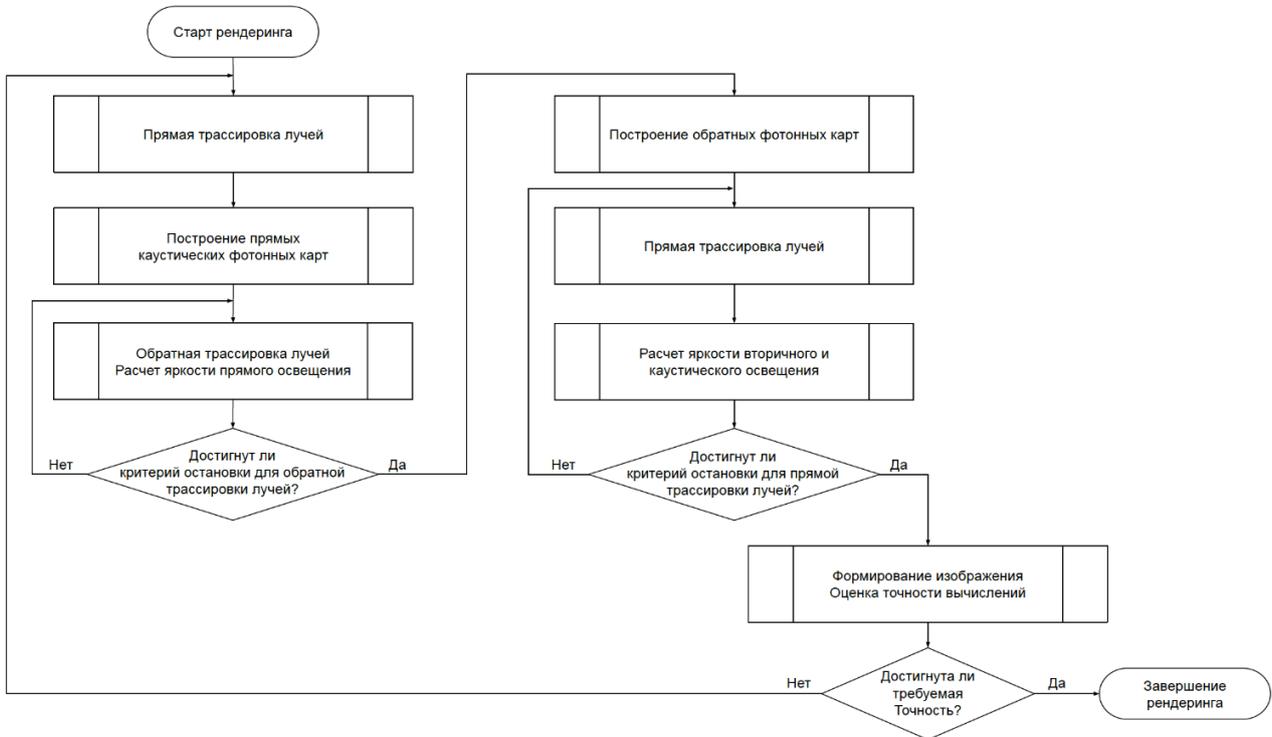


Рис. 5. Алгоритм рендеринга, сочетающий прямые и обратные фотонные карты

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Прямая трассировка лучей. Лучи испускаются из источников света и трассируются в сцене до первого события диффузного рассеивания.
2. Формирование каустической прямой фотонной карты. Фотонная карта строится для всех точек трасс прямых лучей на поверхностях с рассеивающими свойствами, если луч до этой поверхности претерпел одно «зеркальное» событие. Для фотонной карты создается ускоряющая структура (kd дерево [9]).
3. Обратная трассировка лучей. Обратные лучи испускаются из камеры и трассируются в сцене до второго события диффузного рассеивания. Яркость первичного освещения вычисляется методом многократной выборки по значимости в соответствии с формулой (4). Яркость каустического освещения вычисляется за счет сбора прямых фотонов в процессе трассировки обратного луча в соответствии с формулой (2).
4. Формирование вторичной обратной фотонной карты. Фотонная карта строится для точек трасс обратных лучей, находящихся на поверхностях с рассеивающими свойствами, если луч до этой поверхности претерпел более одного события диффузного рассеивания. Для фотонной карты создается ускоряющая структура (kd дерево).

5. Прямая трассировка лучей. Лучи испускаются из источников света и трассируются в сцене. В соответствии с формулой (3) яркость вторичного освещения вычисляется в точках пересечения трасс прямых лучей со сферами интегрирования обратных фотонов.
6. Формирование итогового синтезированного изображения и оценка погрешности вычислений. Если достигнутая точность недостаточна, то вычисления продолжаются с первого шага.

Преимуществом данного метода является то, что в процессе рендеринга за счет вариации количества трассированных прямых и обратных лучей на различных шагах алгоритма можно смещать приоритет вычисления различных компонент яркости. Кроме того, если в сцене отсутствуют потенциальные источники каустического освещения (или их вклад достаточно мал), то каустические прямые фотонные карты не будут создаваться (или будут минимальны), и это может значительно повысить скорость синтеза изображения.

4. Оценка точности вычислений

Метод прогрессивных обратных фотонных карт позволяет производить оценку точности в процессе рендеринга и формировать критерий завершения процесса рендеринга, основываясь на заданной точности распределения яркости изображения. Предложенная методика оценки точности вычислений базируется, во-первых, на прогрессивном характере вычислений яркости всех компонент освещения и, во-вторых, близости характеристик вычислительных порций (количестве прямых и обратных лучей, распределений вероятности испускания и рассеивания лучей в пределах порции). Поэтому для оценки ошибки отдельной i -ой точки изображения можно использовать формулу стандартной ошибки среднего [10]:

$$SEM_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (L_{i,j} - \bar{L}_i)^2 = \frac{1}{N} \left(\frac{\sum_{j=1}^N L_{i,j}^2}{N} - \left(\frac{\sum_{j=1}^N L_{i,j}}{N} \right)^2 \right). \quad (5)$$

В формуле (5):

- N – количество прошедших фаз вычисления яркости;
- $L_{i,j}$ – значение яркости, накопленной в i -ой точке изображения на j -ой фазе;
- \bar{L}_i – среднее значение яркости, накопленной в i -ой точке изображения.

Для оценки точности всего синтезированного изображения можно использовать формулу, усредняющую ошибки яркости точек по всему изображению:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{w \cdot h} SEM_i^2}{\sum_{i=1}^{w \cdot h} \bar{L}_i^2}}. \quad (6)$$

В формуле (6) w и h – это ширина и высота синтезируемого изображения в пикселях соответственно. При этом яркости и ошибки яркости точек фона можно исключить из процесса усреднения.

5. Параллельная обработка обратных фотонных карт

Метод рендеринга, основанный на прямых фотонных картах, хорошо распараллеливается с использованием синхронных вычислений. Прямая трассировка лучей и формирование распределения фотонов на поверхностях объектов сцены не вызывают конфликтов памяти и не требуют дополнительной синхронизации. Также существуют эффективные алгоритмы, предназначенные для построения ускоряющих структур (kd деревьев) с использованием многопоточных вычислений [11]. Сбор яркости с фотонов на шаге обратной трассировки лучей также эффективно распараллеливается с использованием разбиения всего изображения на блоки, когда каждый поток формирует свою собственную часть общего изображения, не вызывая конфликтов памяти.

В случае использования метода обратных фотонных карт обратная трассировка лучей и формирование распределения обратных фотонов на рассеивающих поверхностях сцены так же, как и построение ускоряющих структур, выполняются методами, аналогичными методам, используемым в прямых фотонных картах. Однако при расчете яркости точек изображения с использованием обратных фотонных карт ситуация кардинально меняется. Прямые лучи, испускаемые из источников света, могут участвовать в формировании яркости различных точек изображения (рис. 6). При распараллеливании данного алгоритма неизбежно возникают конфликты памяти, что приводит к замедлению вычислений на многоядерных системах.

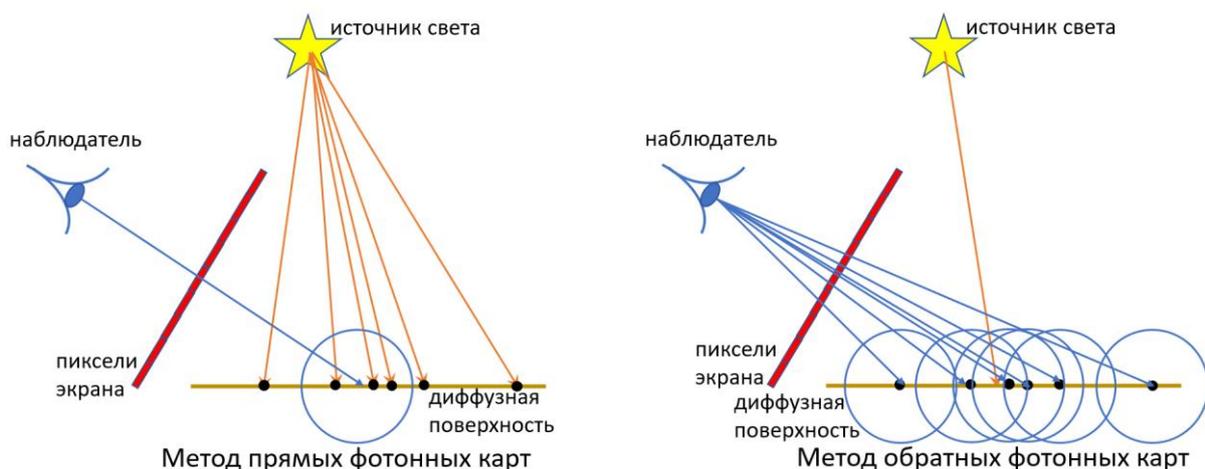


Рис. 6. Отличие расчета яркости методами прямых и обратных фотонных карт

Для демонстрации данного эффекта алгоритм рендеринга был реализован с использованием традиционных синхронных вычислений [12] и протестирован на рабочей станции с 12-ядерным процессором Intel Xeon 6226 (см. табл. 2). Из

результатов тестирования видно, что ускорение трассировки и обработки лучей алгоритмом рендеринга, использующим обратные фотонные карты, резко замедляется после достижения значения трехкратного ускорения.

Таблица 2

Ускорение трассировки при синхронном распараллеливании

Использовано ядер	Количество прямых лучей	Количество обратных лучей	Ускорение
1 ядро	20 689 305	26 788 848	1.00
2 ядра	34 199 691	44 482 520	1.66
4 ядра	53 129 762	68 986 597	2.57
8 ядер	64 440 303	83 987 647	3.13
12 ядер	71 715 295	93 785 374	3.49

Для эффективной организации параллельных вычислений можно использовать альтернативное решение в виде модели асинхронных вычислений [13]. В этом случае для каждого ядра процессора запускается вычислительный поток, который независимо синтезирует изображение всей сцены, а по завершении все полученные изображения сливаются, формируя общее изображение.

Таблица 3

Ускорение трассировки при асинхронном распараллеливании

Использовано ядер	Количество прямых лучей	Количество обратных лучей	Ускорение
1 ядро	20 717 568	26 790 396	1.00
2 ядра	34 101 290	44 481 495	1.65
4 ядра	89 476 702	72 347 407	3.41
8 ядер	220 730 378	102 960 933	6.81
12 ядер	315 318 894	120 367 282	9.17

Тестирование показало линейный рост ускорения трассировки и обработки лучей алгоритмом рендеринга, основанным на обратных фотонных картах (см. табл. 3). Но несмотря на кажущееся преимущество данного метода, у него есть существенный недостаток, связанный с увеличением объема оперативной памяти, которое кратно количеству вычислительных потоков. Принимая во внимание, что вычисления могут выполняться с использованием спектральной цветовой модели, на хранение данных изображения и фотонных карт, формируемых в одном вычислительном потоке, могут потребоваться десятки

гигабайт памяти. Учитывая, что количество ядер современных процессоров исчисляется десятками, данный метод становится неприемлем.

Для решения проблемы распараллеливания алгоритма рендеринга, основанного на использовании обратных фотонных карт, предлагается использовать двухуровневый метод распараллеливания.

Первый уровень распараллеливания — это полностью синхронные вычисления, примененные к части изображения, заданного случайной маской (рис. 7), как правило, размером 32x32 пикселя. Таким образом, группа синхронных потоков формирует обратную фотонную карту только для своей части изображения и синтезирует соответствующую часть изображения.

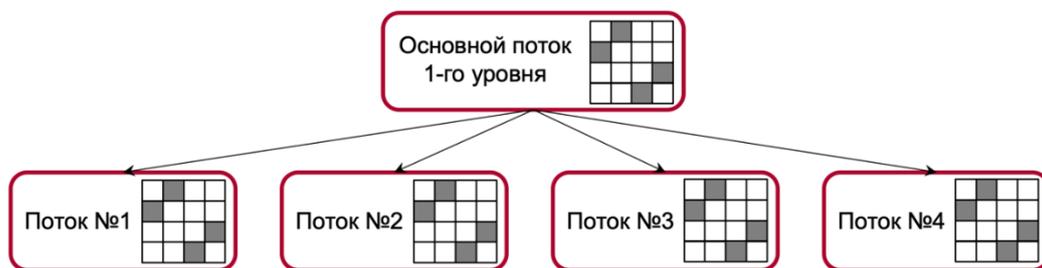


Рис. 7. Синхронный уровень распараллеливания

Второй уровень распараллеливания — это частично синхронные вычисления, объединяющие группы синхронных потоков для синтеза полного изображения (рис. 8). При этом создается дополнительный управляющий поток, который отвечает за распределение случайных масок между группами синхронных потоков. Этот поток периодически прерывает вычисления групп синхронных потоков, строит общее изображение и пересоздает случайные маски. Пересоздание масок требуется для более равномерного распределения задач между различными группами потоков и, следовательно, для равномерного распределения ошибки вычислений по всему изображению, что особенно важно в случае вариации вычислительной мощности отдельных ядер рабочей станции.

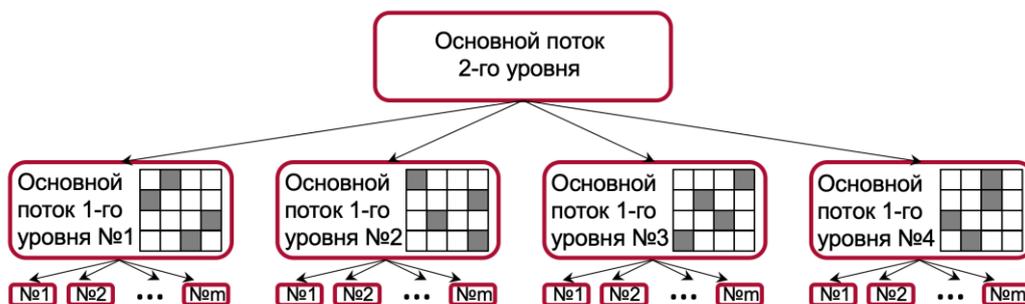


Рис. 8. Частично синхронный уровень распараллеливания

В процессе выполнения прямой трассировки лучей на отдельной группе потоков возможна ситуация, когда луч не находит пересечений с обратными фотонными картами своей группы потоков, однако может привнести яркость в обратные фотонные карты других групп синхронных потоков. Для учета яркости, приносимой такими лучами, и, следовательно, повышения скорости рендеринга предлагается организовать доступ ко всем обратным фотонным картам, существующим в данный момент трассировки лучей.

Основная идея метода доступа ко всем существующим картам заключается в том, что одновременно с каждой обратной фотонной картой будет храниться флаг, показывающий, что карты существуют и могут быть использованы для накопления яркости. Данный флаг реализуется в виде счетчика количества потоков, которые в данный момент используют данную фотонную карту. Если значение счетчика больше нуля, то карта существует и может быть использована. Если значение счетчика равно нулю, то карта закрыта для доступа. При этом только поток, создавший карту, может увеличивать значение счетчика, если оно равно нулю, или уменьшать его с 1 до 0.

Для изменения значения счетчика используются исключительно атомарные операции (рис. 9).

- Для открытия доступа к собственным обратным фотонным картам выполняется операция атомарного инкремента для соответствующего счетчика активных потоков.
- Для закрытия доступа к собственным обратным фотонным картам выполняется операция атомарного сравнения с обменом соответствующего счетчика активных потоков для изменения его значения с 1 до 0. В случае, если операция выполнена успешно, доступ к обратным фотонным картам закрыт. В случае неуспешного завершения операции трассировка прямых лучей продолжается до тех пор, пока данная операция не будет успешно выполнена.

Таким образом, неудачная попытка закрытия доступа к собственным обратным фотонным картам не приводит к остановке вычислений, а прямая трассировка лучей будет продолжаться до тех пор, пока доступ к собственным картам не будет успешно закрыт.

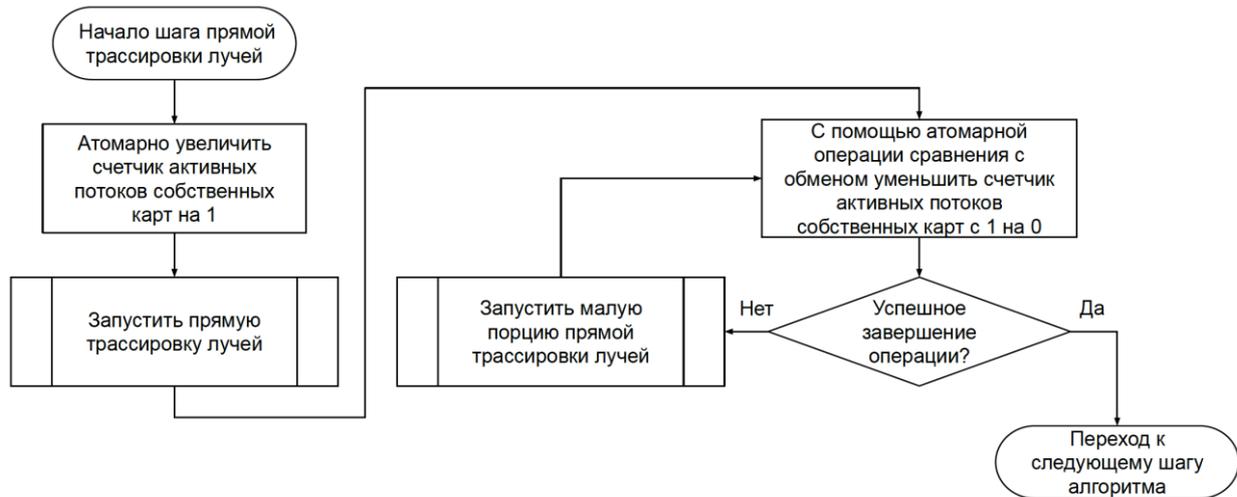


Рис. 9. Открытие и закрытие доступа к обратным фотонным картам

Для доступа к обратным фотонным картам других потоков используется аналогичный алгоритм (рис. 10).

- Для получения доступа к обратным фотонным картам чужого потока выполняется операция атомарного сравнения с обменом для увеличения соответствующего счетчика со значения большего нуля на 1. В случае успешного завершения операции доступ к обратным фотонным картам получен и карты могут быть обработаны при трассировке прямых лучей.
- По завершении обработки обратной фотонной карты выполняется операция атомарного декремента.

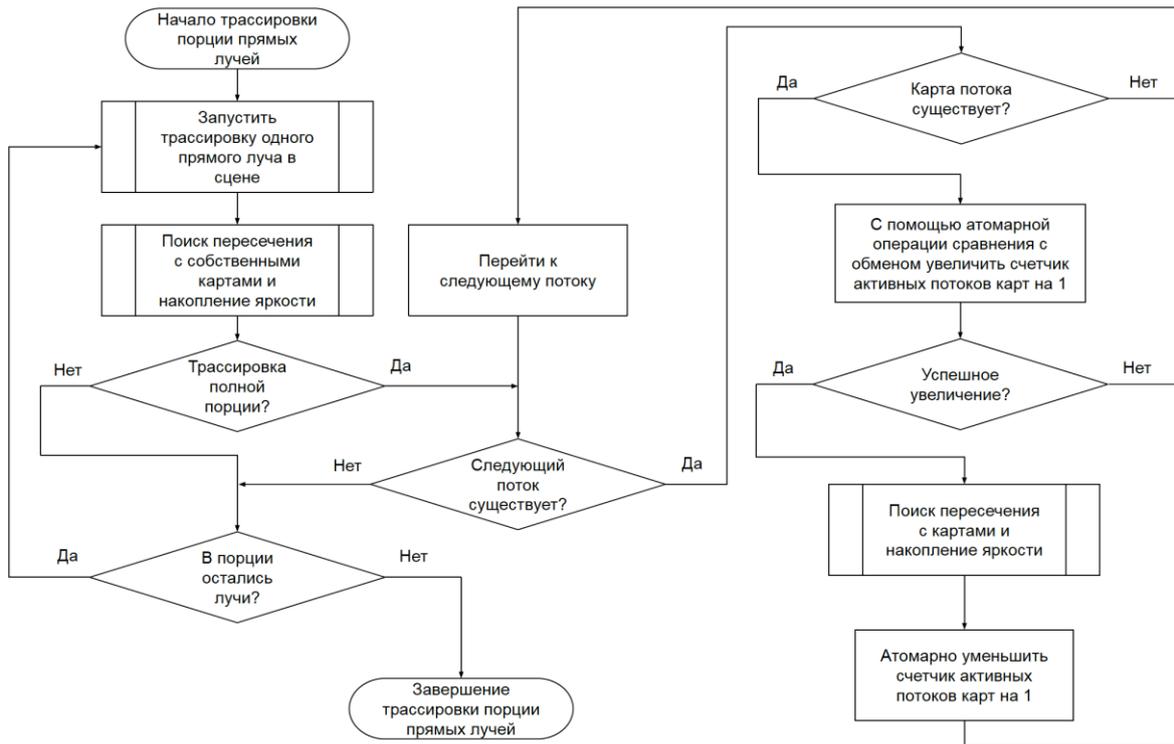


Рис. 10. Доступ к обратным фотонным картам других потоков

Для решения проблемы необходимости синхронизации потоков при записи значений в одни и те же элементы обратной фотонной карты формируется дополнительная прямая фотонная карта, содержащая индексы обратных фотонов, которые пересек прямой луч. После закрытия доступа к соответствующей обратной фотонной карте она обрабатывается группой синхронных потоков, в которой каждый поток выбирает и обрабатывает только свою часть обратных фотонов в соответствии с маской, относящейся к данному потоку (рис. 11).

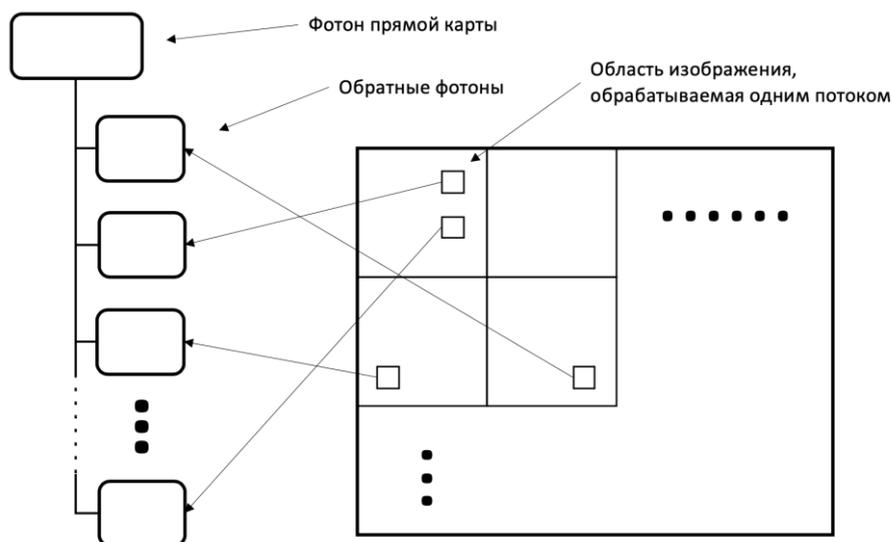


Рис. 11. Формирование и обработка промежуточной прямой фотонной карты

Тестирование описанного метода распараллеливания показало линейное ускорение трассировки и обработки лучей при выполнении рендеринга с использованием обратных фотонных карт (см. табл. 4).

Таблица 4

Ускорение при двухуровневом распараллеливании

Использовано ядер	Количество прямых лучей	Количество обратных лучей	Ускорение
1 ядро	20 647 944	26 859 521	1.00
2 ядра	53 498 805	43 273 242	2.03
4 ядра	120 166 069	55 467 718	3.70
8 ядер	220 579 897	72 378 193	6.17
12 ядер	338 469 540	93 121 907	9.08

Сравнение с методами синхронных и асинхронных вычислений (рис. 12) показало, что ускорение трассировки и обработки лучей при использовании двухуровневого метода распараллеливания сравнимо с методом полностью асинхронных вычислений. При этом объем оперативной памяти, необходимый для работы данного метода, сравним с объемом, используемым в методе синхронных вычислений, поскольку в каждой отдельной группе синхронных потоков формируется только часть общей обратной фотонной карты (при сохранении того же количества трассированных обратных лучей). Кроме того, за счет организации доступа к обратным фотонным картам всех вычислительных потоков достигается большая точность вычислений за одинаковое время расчета.

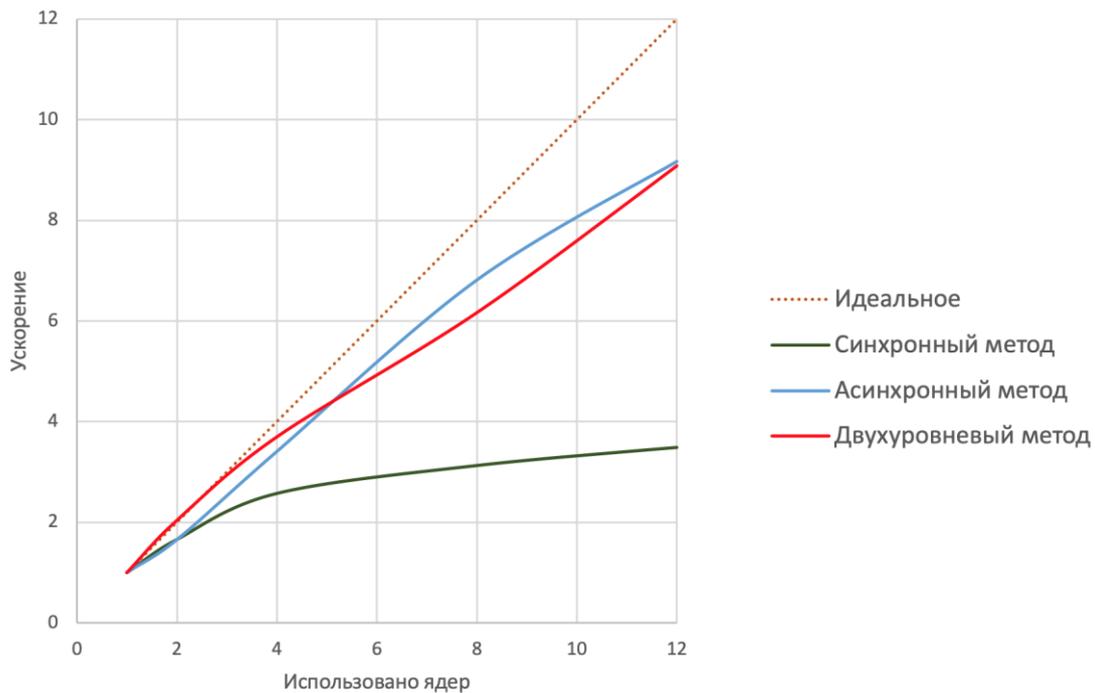


Рис. 12. График ускорения трассировки и обработки лучей для трех рассмотренных методов

Данный метод может использоваться как элемент системы распределенных вычислений, а также в случае, если рабочая станция имеет несколько процессоров с неравномерным доступом к памяти [14]. В таком случае для каждой группы вычислительных ядер, будь то ядра удаленного сервера или группы локальных ядер с выделенной памятью, запускаются независимые асинхронные вычисления, использующие двухуровневый синхронно-асинхронный метод расчета, а по завершении рендеринга полученные изображения сливаются для формирования общего финального изображения.

6. Результаты

Описанные в данной работе методы были реализованы и интегрированы в систему фотореалистичной визуализации Lumisect. Результаты сравнения разработанного метода с прототипом, реализованным с использованием метода прогрессивных прямых фотонных карт, демонстрируют преимущества метода сочетания прямых и обратных фотонных карт (рис. 13).

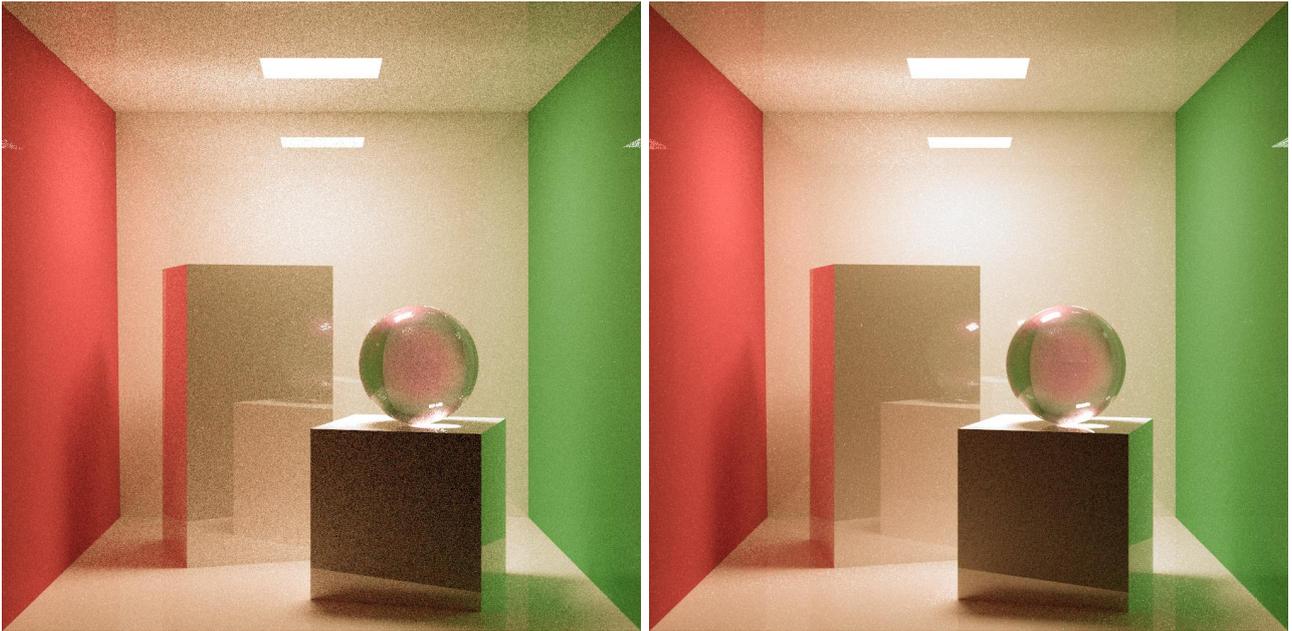


Рис. 13. Изображение сцены Cornell Box с каустикой, полученное методом прямых фотонных карт (слева) и сочетанием прямых и обратных фотонных карт (справа)

В случае отсутствия в сцене источников каустического освещения прямые фотонные карты не создаются, а в обратных фотонных картах не сохраняются точки возможного возникновения каустического освещения, что приводит к двукратному уменьшению карт и дополнительному ускорению (рис. 14).

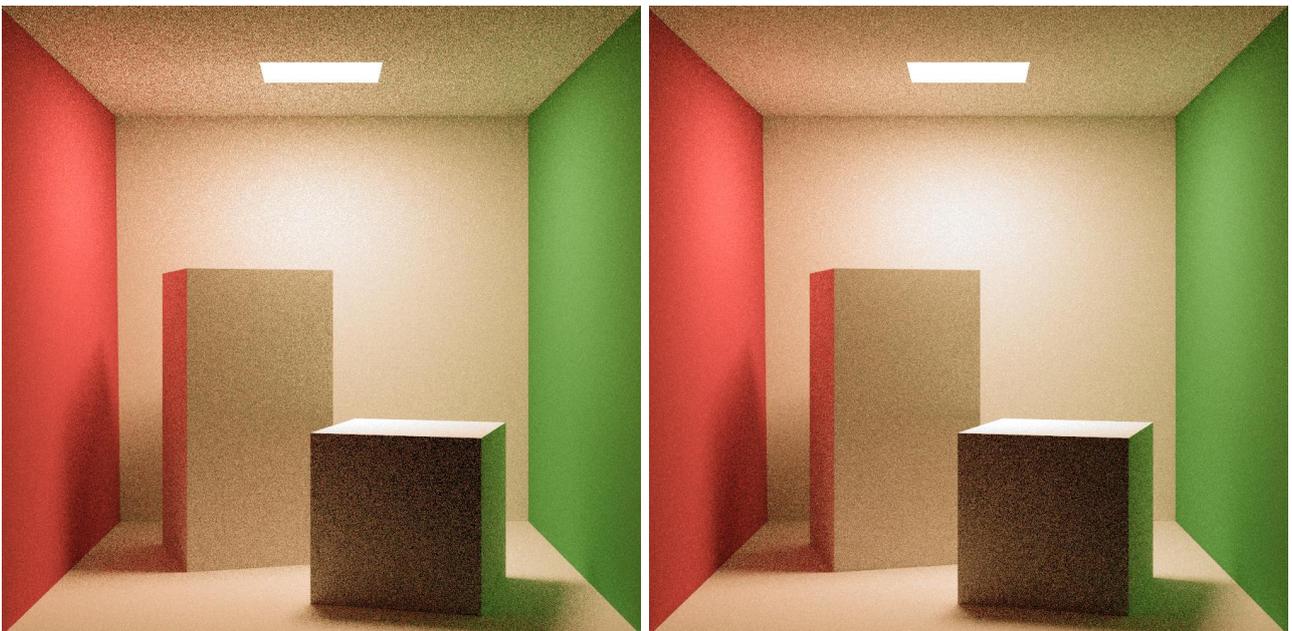


Рис. 14. Изображение диффузной сцены Cornell Box, полученное методом обратных фотонных карт (слева) и сочетанием прямых и обратных фотонных карт (справа)

Аналогичные результаты получены при формировании изображений реальных интерьерных сцен (рис. 15, 16).



Рис. 15. Изображение интерьерной сцены, полученное методом прямых фотонных карт



Рис. 16. Изображение интерьерной сцены, полученное методом обратных фотонных карт

7. Заключение

Совместное использование каустических прямых фотонных карт, строящихся для точек трасс прямых лучей после первого «зеркального» события и до первого события диффузного рассеивания включительно, и вторичных обратных фотонных карт, строящихся для точек трасс обратных лучей от первого до второго событий диффузного рассеивания, позволило уменьшить суммарный объем фотонных карт до двух раз, уменьшить время, затрачиваемое на построение ускоряющих структур и поиск пересечения луча с фотонными картами.

Смещение точки сбора вторичной яркости до второго события диффузного рассеивания на трассе обратного луча позволило более равномерно распределить обратные фотоны по объектам сцены и применить алгоритмы адаптивного распределения радиусов сфер интегрирования по объектам сцены.

Использование двухуровневого частично синхронного метода распараллеливания позволило исключить конфликты, возникающие при одновременном доступе к общим областям памяти в алгоритмах рендеринга, основанных на методе обратных фотонных карт, и ускорить процесс синтеза изображения.

Список литературы

- [1] Kajiya J. T. The rendering equation // Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1986. – Pp. 143-150.
- [2] Chattopadhyay S., Fujimoto A. Bi-directional ray tracing // Computer Graphics 1987. – Springer, Tokyo, 1987. – Pp. 335-343.
- [3] Kay T. L., Kajiya J. T. Ray tracing complex scenes // ACM SIGGRAPH computer graphics. – 1986. – Vol. 20. – No. 4. – Pp. 269-278.
- [4] Lafortune E. P., Willems Y. Bi-directional path tracing // Compugraphics' 93. – 1993. – Pp. 145-153.
- [5] Jensen H. W. Global illumination using photon maps // Eurographics workshop on Rendering techniques. – Springer, Vienna, 1996. – Pp. 21-30.
- [6] Jensen H. W., Christensen P. High quality rendering using ray tracing and photon mapping // ACM SIGGRAPH 2007 courses. – 2007. – 116 p.
- [7] Havran V., Herzog R., Seidel H. P. Fast Final Gathering via Reverse Photon Mapping // Computer Graphics Forum. – Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishing, Inc, 2005. – Vol. 24. – No. 3. – Pp. 323-332.
- [8] Veach E., Guibas L. J. Optimally combining sampling techniques for Monte Carlo rendering // Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1995. – Pp. 419-428.
- [9] Bentley J. L., Friedman J. H. Data structures for range searching // ACM Computing Surveys (CSUR). – 1979. – Vol. 11. – No. 4. – Pp. 397-409.
- [10] Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.:

Изд-во Юрайт, 2019. – 479 с.

- [11] Zhou K., Hou Q., Wang R., Guo B. Real-time kd-tree construction on graphics hardware // ACM Transactions on Graphics (TOG). – 2008. – Vol. 27. – No. 5. – Pp. 1-11.
- [12] He H., Wang T., Xu Q., Xing Y. Multi-core parallel of photon mapping // Visual Information Communication. – Springer, Boston, MA, 2009. – Pp. 365-374.
- [13] Günther J., Wald I., Slusallek P. Realtime Caustics using Distributed Photon Mapping // Rendering Techniques. – 2004. – Vol. 4. – Pp. 111-122.
- [14] Bolosky W., Fitzgerald R., Scott M. Simple but effective techniques for NUMA memory management // Proceedings of the twelfth ACM symposium on Operating systems principles. – 1989. – Pp. 19-31.

Оглавление

1. Введение	3
2. Метод обратных фотонных карт	6
3. Сочетание прямых и обратных фотонных карт	9
4. Оценка точности вычислений	11
5. Параллельная обработка обратных фотонных карт	12
6. Результаты	19
7. Заключение	22
Список литературы	22
Оглавление	23