Метод квазизеркальных элементов для снижения стохастического шума при моделировании яркости

С.В. ЕРШОВ[1], Д.Д. ЖДАНОВ[2], А.Г. ВОЛОБОЙ[1], Н.Б. ДЕРЯБИН[1]*

[1]Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва
[2]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
*E-mail: measure@spp.keldysh.ru

Аннотация

При моделировании распространения излучения яркость[1] каждого пучка лучей рассчитывается с учётом оптических свойств объектов виртуальной сцены, с которыми он взаимодействует. По оптическим свойствам объекты могут грубо подразделяться на диффузные и зеркальные. Обычно используемая при моделировании трассировка лучей на основе методов Монте-Карло позволяет рассчитывать яркость пучка после встречи с диффузной поверхностью. При встрече же его с зеркальной поверхностью он отражается (или преломляется) до тех пор, пока не достигнет диффузной поверхности, где только и рассчитывается его яркость. В предлагаемом подходе диффузные элементы разделяются на истинно диффузные и квазизеркальные. Наиболее естественный критерий для последних – рассеяние в узком конусе «вокруг» чисто зеркального направления рассеяния. Элементом сцены может быть также суперпозиция обоих типов рассеяния, когда её двулучевая (двунаправленная) функция отражательной способности (*BRDF*) трактуется как сумма истинно диффузной и квазизеркальной частей. В работе показано, как разные компоненты освещённости[2] взаимодействуют с квазизеркальными объектами, и описано, как это реализуется в двунаправленной стохастической трассировке лучей. Предложенный подход позволяет значительно снижать стохастический шум для ряда сцен, включая и те, для которых не удаётся достигать хороших результатов при любых настройках стандартного метода. Он также применим к моделированию объёмного рассеяния, трактуя фазовую функцию среды как квазизеркальную. В этом случае выделение квазизеркальных объектов не основано на характере *BRDF*: квазизеркальной трактуется среда, в то время как поверхности, даже если их *BRDF* уже, остаются истинно диффузными. В статье показывается преимущество такого подхода.

Ключевые слова: расчёт освещённости, реалистичная визуализация, двунаправленная трассировка лучей, стохастическая трассировка лучей, понижение шума, индикатриса рассеяния.

1. Введение

Метод двунаправленной трассировки лучей с использованием фотонных карт является одним из эффективных для построения «виртуальной фотографии» [1]. Трассировка лучей от источников света создаёт фотонную карту, которая позволяет вычислять освещённость поверхностей сцены. Затем луч трассируется из камеры, и при попадании на диффузную поверхность встречи берёт освещённость из фотонной карты, свёртывает её с двулучевой функцией отражательной способности (*BRDF*[3]) в этой точке и прибавляет результат (яркость) к яркости пикселя. Эта идея реализована в ряде модификаций данного метода [2–5].

Важным параметром в таком подходе является число операторов (событий на трассе луча) в произведениях интегральных операторов рассеяния, вычисляемых с помощью метода Монте-Карло трассировкой из камеры. Обычно учитываются только диффузные события, максимально допустимое число которых обозначается как *BDD*[4]. *Эффективность подхода, т.е. скорость сходимости (или уровень шума, что более или менее то же самое), сильно зависит от BDD*, оптимальное значение которого своё для каждой сцены.

Лучшим выбором будут разные *BDD* в разных частях сцены [5] и даже смешение вычислений с разными *BDD* [5]. Часто найти оптимальное *BDD* (автоматически или вручную) возможно, и тогда вычисления оказываются весьма эффективны. Однако так бывает не всегда, и в некоторых случаях изменение *BDD* не помогает, т.е. какое бы значение его мы ни взяли, изображение оказывается сильно зашумлённым.

Мы предлагаем простой метод, помогающий в таких случаях. Его идея в том, что те объекты сцены, которые дают хоть какую-то толику диффузного рассеяния, разбиваются на две группы: истинно диффузные и квазизеркальные. Обычно последними будут те, у которых *BRDF* узкая и лежит вблизи зеркального направления, хоть, в принципе, критерий может быть произвольным, вплоть до того, что ламбертовская поверхность будет трактоваться как квазизеркальная. Как правило, разбиение трактует *BRDF* (для поверхности) или фазовую функцию (для объёма) как сумму квазизеркальной и истинно диффузной компонент, притом отличных от нуля.

Квазизеркальное рассеяние не увеличивает счётчик событий (при превышении которым *BDD* луч убивается). Кроме того, квазизеркальная часть *BRDF* не свёртывается с диффузной компонентой освещённости (от излучения источника, испытавшего истинно диффузное рассеяние). Это изменение в трассировке лучей от камеры может быть применено как к поверхностному, так и к объёмно-

[1] В том числе подразумевается энергетическая яркость.

[2] В том числе подразумевается облучённость (энергетическая освещённость).

[3] *Biderectional Reflection Distribution Function*.

[4] *Backward Diffuse Depth* – специфический параметр двунаправленной трассировки лучей: луч из камеры обрывается после *BDD* диффузных рассеяний.

му рассеянию для снижений шума и объёма используемой памяти.

Более привлекательным кажется альтернативный подход, в котором нет ни фиксированного *BDD*, ни различения прямых, каустических и диффузных освещающих лучей. В каждой точке встречи камерного луча с диффузной поверхностью собираются все освещающие лучи, и вклад от разных точек суммируется с весом, зависящим от полной траектории (соединения участков из источника и из камеры) и вычисляемым по формулам *MIS*[5] *[6]. К сожалению, несмотря на убедительные картинки в [6], предложенный метод предполагает вовсе не использование фотонных карт, а последовательную трассировку одного луча из камеры и одного луча из источника, затем вычисление вклада от их слияния (который есть ноль, если ни в одной точке они не прошли в пределах радиуса интегрирующей сферы) и затем выбрасывание или забывание обоих. При использовании же фотонных карт одна и та же траектория луча из источника сливается с каждым лучом из камеры*. На первый взгляд это одно и то же, так как при использовании разных участков от источника вклады даже при одном и том же участке от камеры независимы. На самом же деле это не так [7]: шум (т.е. дисперсия накопленной яркости пикселя) вычисляется по формулам, отличным от таковых для простого *MCMC*[6]. *В эти формулы входят не только BRDF* по трассе луча и кривые силы излучения источника, как в [6], но и геометрические факторы (расстояния между поверхностями и пр.). Поэтому предложенный в [6] метод не удаётся использовать непосредственно, без доработки. Между тем он требует расстановки интегрирующих сфер во всех точках встречи для камерного луча, что увеличивает требования к памяти, и, кроме того, фотон (луч из источника) проверяется на пересечение со всеми ними, что замедляет обработку. Поэтому производительность предлагаемого нами метода, основанного на ограниченном *BDD*, выше.

Существуют варианты метода [6], постепенно отказывающиеся от фотонных карт, см., напр., [8], где в добавление к *vertex merging*, мало отличающемуся от фотонных карт, используется *vertex connection*, когда концы трасс из камеры и из источника не близки и соединяются третьим отрезком конечной длины, изначально отсутствовавшим в обеих трассах. Точки, которые выгодно соединять, можно выбирать вероятностно [9]. Подробный обзор можно найти в диссертации [10]. Во всех этих методах используется *MIS*, когда слияние траекторий из источника и из камеры делается в разных точках, и все эти возможные варианты смешиваются с весами. Помимо того, в [8] *MIS* применяется к двум возможным подходам – *vertex connection* и *vertex merging*.

К сожалению, как и в [6], в этих работах формулы для вычисления весов применяются к фотонным картам или их аналогу, когда один и тот же набор трасс от источника переиспользуется для всех камерных лучей.

[5] *Multiple Importance Sampling* – множественная выборка по значимости.

[6] *Markov Chain Monte-Carlo* – метод Монте-Карло по схеме цепей Маркова.

2. Уравнение глобальной освещённости и вычисление его ряда Неймана двунаправленной трассировкой лучей

Световое поле в сцене описывается самосогласованным уравнением, которое можно записывать в разных формах, например как уравнение глобального освещения (УГО) [11] и т.д. Идея в том, что в сцене есть некое световое поле, и оно освещает поверхности, которые рассеивают его. При этом преобразование облучённости E (от излучения, падающего на поверхность в точке $\boldsymbol{x}$ в направлении $\boldsymbol{v}'$) в яркость L (излучения, выходящего с точки поверхности $\boldsymbol{x}$ в направлении $\boldsymbol{v}$) определяется *BRDF* поверхности f:

$$L(v;x) = \int f(x;v,v')E(v',x)d^2v' .$$

Затем это излучение, исходящее от поверхности, распространяется далее по сцене и в конце концов освещает её поверхности. Это преобразование описывается оператором переноса. Поскольку явная форма операторов рассеяния и переноса нам не важна, мы будем пользоваться компактной записью:

$$L = \hat{F}E, \tag{1}$$

$$E = \hat{T}L. \tag{2}$$

Заметим, что здесь $\hat{F}$ включает только диффузное рассеяние, поэтому каустика считается нерассеянным светом, т.е. частью прямого освещения.

Также заметим, что L есть яркость **поверхностей сцены**; яркость же **изображения в камере** будет $\hat{S}L$, где $\hat{S}$ описывает *чисто зеркальное* преобразование между сценой и камерой (и чаще всего это единичный оператор). Здесь и ниже мы будем вычислять только L. Затем, если необходимо, можно её преобразовывать в яркость изображения.

Полная освещённость состоит из прямой и диффузной компонент:

$$E = E^{(0)} + E^{(i)}. \tag{3}$$

Объединяя эти три уравнения, приходим к используемому ниже самосогласованному УГО в форме уравнения рендеринга [11]

$$E = \hat{T}\hat{F}E + E^{(0)}. \tag{4}$$

В вычислительной оптике широко применяется комбинация прямой и обратной трассировок лучей, когда прямая часть вычисляет освещённость диффузных поверхностей и запоминает её как, например, фотонную карту [1], и затем обратная трассировка превращает её в видимое камерой изображение. Заметим, что полученная стохастической трассировкой освещённость зашумлена и шум этот передаётся в изображение, а его окончательная амплитуда сильно зависит от того, как именно работает трассировка от камеры.

Простейший способ состоит в том, что мы трассируем лучи из камеры до первой диффузной поверхности, где вычисляется яркость от *всех компонент* освещения ($\hat{F}E$),

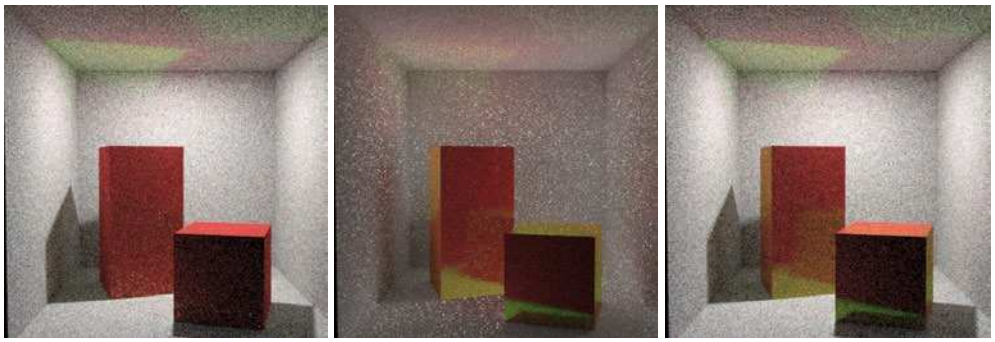

Рис. 1. Изображения для модифицированной сцены «*Cornell Box*», полученные за одинаковое время расчёта (200 с) при *BDD* = 0 (слева), *BDD* =1 (в середине) и с использованием квазизеркального метода при *BDD* = 0 (справа)

которая затем добавляется к яркости пикселя. Это обеспечивает оценку яркости поверхности, согласно (1), хотя результат и не идеален, т.к. вычисленная трассировкой от источника E обычно подвергается фильтрации (пространственной) для снижения шума. Из-за этого мелкомасшабные детали освещения, такие как блики, обыкновенно теряются.

Вместо этого можно применить к освещённости N-ую итерацию (4), что приводит к уравнению для яркости

$$L = (\hat{F}\hat{T})^N \hat{F}E + \sum_{k=0}^{N-1} (\hat{F}\hat{T})^k \hat{F}E^{(0)} . \qquad (5)$$

Для точного поля освещённости E это, естественно, даёт тот же самый результат, как и простое $\hat{F}I$ выше, однако для фактически используемой зашумлённой E эта вторая форма часто оказывается лучше из-за более низкого уровня шума благодаря свёртке со степенью $(\hat{F}\hat{T})$. При этом N есть не что иное, как описанная в п. 1 величина *BDD*.

Член $\hat{F}E^{(0)}$ есть яркость поверхности под *прямым* (включая каустику) освещением. Диффузная же компонента освещения учитывается только в *последней* точке встречи камерного луча: это член $(\hat{F}\hat{T})^N \hat{F}E$.

Интегральные операторы могут вычисляться методом Монте-Карло: мы выстреливаем лучи из камеры через данный пиксель изображения, они попадают на поверхность, рассеиваются ею (левый оператор $\hat{F}$), распространяются по сцене (оператор $\hat{T}$)[7] и так далее, пока не достигнут N-й диффузной поверхности, на которой и остановятся. В k-й диффузной точке встречи (т.е. непосредственно *перед* k-м диффузным рассеянием) мы вычисляем яркость поверхности при прямом (ну и каустическом) освещении $(\hat{F}E^{(0)})$, если $k < N$, и при полном освещении $(\hat{F}E)$, если $k = N$. Затем результат (яркость) масштабируется с учётом ослабления излучения из-за зеркальных преобразований в $\hat{T}$, и наконец прибавляется к яркости пикселя. Среднее по ансамблю камерных лучей сходится к L.

3. Идея квазизеркального метода

Рассмотрим модификацию широко распространённой тестовой сцены «*Cornell Box*». Она представляет собой открытую со стороны камеры коробку, на полу которой стоят два параллелепипеда. Источник света – **прозрачный** квадратик, расположенный очень близко к потолку коробки и светящий только вверх. Стенки коробки имеют ламбертовское отражение с альбедо 50 %, а параллелепипеды – *BRDF*, являющуюся суммой ламбертовской и узкой (почти зеркальной) компонент. Чтобы видеть, какая из них и какой вклад даёт в изображение, ламбертовская компонента *чисто* красная (нормированный цвет (1, 0, 0)), а узкая компонента *почти чисто* зелёная (нормированный цвет (0,1; 1, 0,1)). Альбедо для максимальной из цветовых компонент – 50 и 25 % соответственно.

В сцене практически нет первичного освещения (за исключением маленького квадратика потолка над источником).

Рассмотрим случай *BDD* = 0. Луч из камеры, попавший на любую поверхность сцены, тут и останавливается (поскольку зеркальных индикатрис в сцене нет) и берёт яркость точки как свёртку *BRDF* с *полной* освещённостью поверхности от всей полусферы. На поверхности параллелепипедов есть узкая *BRDF*, а освещение в основном – вторичное от стенок коробки. Свёртка узкой *BRDF* с *флуктуирующей* освещённостью из фотонных карт даёт большой шум (см. «зелёное» отражение внизу параллелепипедов на рис. 1).

В случае *BDD* = 1 в первой точке попадания камерного луча берётся только первичное (и каустическое) освещение, которое в этой сцене отсутствует (кроме маленького квадратика на потолке над источником). Дальше камерный луч отражается и или покидает сцену, или попадает на одну из её поверхностей, где собирает уже *полное* освещение. При этом очень малая часть лучей попадает на квадратик потолка, расположенный прямо над источником, где освещённость на порядки выше. Соответственно, и приносимая этими лучами в пиксель яркость будет на порядки выше средней. Прочие же лучи попадают на стенки коробки или параллелепипедов, где освещённость невелика, и, соответственно, их вклад в яркость пикселя тоже невелик. В результате получается, что яркость пикселя в основном создаётся малым числом лучей, приносящих зато большую яркость. Это неизбежно приводит к большому шуму (рис. 1). Заметим, что шум на параллелепипедах в основном *не зелёный*, т.к. узкая часть *BRDF* «посылает» отражённый луч в примерно одно и то же место сцены, т.е. или уж почти все лучи попадают в яркий квадратик на потолке, или уж ни один.

Большие значения *BDD* положения не улучшают. Можно было бы попробовать использовать *BDD* = 0 для камерных лучей, отражённых согласно ламбертовской части *BRDF*, и *BDD* = 1 для лучей, которые (сперва) были рассеяны согласно узкой компоненте *BRDF* поверхности. Однако это не работает [5, 12]. То есть, когда лучи,

[7] Заметим, что в *обратной* трассировке порядок событий от камеры соответствует порядку операторов слева направо, т.е. крайний левый оператор соответствует преобразованию в левом от камеры сегменте луча.

рассеянные почти по зеркальному направлению и лучи, рассеянные далеко от него, собирают освещение по-разному, мы получаем неверную яркость изображения. Необходим более изощрённый выбор того, какие освещающие лучи в какой точке встречи использовать, а какие игнорировать.

Ключевая идея подхода остаётся всё той же: рассеяние согласно узкой части диффузной *BRDF* трактуется специфически, не как истинно диффузное, а как в некотором смысле сходное с зеркальным. Поэтому такую узкую *BRDF* и весь способ обработки рассеянных согласно с ней лучей в трассировке от камеры называют квазизеркальными. Результату вычислений для той же модельной сцены с помощью этого метода соответствует правая часть рис. 1 (см. также п. 7.1).

4. Операторные последовательности в присутствии квазизеркальных *BRDF*

Перейдём теперь к формальному выводу того, что делать с камерным лучом, когда диффузная *BRDF* разбита на истинно диффузную и квазизеркальную части:

$$\hat{F} = \hat{F}_d + \hat{F}_{qs} \tag{6}$$

Разбиение это *произвольно* (хотя некоторые способы с точки зрения уменьшения разбиения оказываются выгоднее других), т.е. яркость изображения всё равно сходится к точному решению.

Яркость точки поверхности x с учётом (6) выражается как

$$L(\boldsymbol{v},\boldsymbol{x}) = (\hat{F}_d E)(\boldsymbol{v},\boldsymbol{x}) + (\hat{F}_{qs} E)(\boldsymbol{v},\boldsymbol{x}). \tag{7}$$

Освещение также разделяется теперь на *три* составляющие: **прямое** (которое не было рассеяно вовсе или соответствует чисто зеркальной *BRDF*), **квазикаустика** (рассеянное по крайней мере один раз в соответствии с квазизеркальной *BRDF*, но ни разу – с истинно диффузной *BRDF*) и **диффузное** (рассеянное по крайней мере один раз в соответствии с истинно диффузной *BRDF* поверхности), т.е.

$$E = E^{(0)} + E^{(qc)} + E^{(i)},$$

так что (7) принимает вид

$$L = \hat{F}E = \hat{F}_{qs}(E^{(0)} + E^{(qc)}) + \\ + \hat{F}_{qs}E^{(i)} + \hat{F}_d E. \tag{8}$$

Затем, подставляя наше разбиение освещения в УГО (4), получаем

$$E^{(qc)} + E^{(i)} = \hat{T}\hat{F}_{qs}(E^{(0)} + E^{(qc)}) + \\ + \hat{T}\hat{F}_{qs}E^{(i)} + \hat{T}\hat{F}_d E. \quad .$$

Двучлен $\hat{T}\hat{F}_{qs}E^{(i)} + \hat{T}\hat{F}_d E$ здесь описывает свет, испытавший по крайней мере одно (истинно) диффузное рассеяние, в то время как член $\hat{T}\hat{F}_{qs}(E^{(0)} + E^{(qc)})$ – свет, испытавший по крайней мере одно чисто зеркальное рассеяние, но ни одного диффузного. С учётом нашего разбиения освещения на три компоненты, это означает, что

$$E^{(i)} = \hat{T}\left(\hat{F}_d E + \hat{F}_{qs}E^{(i)}\right), \tag{9}$$

$$E^{(qc)} = \hat{T}\left(\hat{F}_{qs}E^{(qc)} + \hat{F}_{qs}E^{(0)}\right), \tag{10}$$

откуда следует, что

$$E^{(i)} = \left(1 - \hat{T}\hat{F}_{qs}\right)^{-1}\hat{T}\hat{F}_d E, \tag{11}$$

$$E^{(qc)} = \left(1 - \hat{T}\hat{F}_{qs}\right)^{-1}\hat{T}\hat{F}_{qs}E^{(0)}. \tag{12}$$

Мы предполагаем, что если камерный луч испытал квазизеркальное рассеяние, то это *не* увеличивает счётчик диффузных событий, так что луч не обрывается. Выведем теперь, какие компоненты освещённости должны браться в каких точках встречи камерного луча, чтобы математическое ожидание яркости изображения совпало с точным значением.

Объединяя (8) с (11) и (12), мы после громоздких, хотя и тривиальных, преобразований получим, что вычисленная при $BDD = N$ яркость поверхности выражается как

$$L = \hat{F}_{qs}\left(E^{(0)} + E^{(qc)}\right) + \\ + \sum_{k=0}^{N-1}\left((1-\hat{Q})^{-1}\hat{F}_d\hat{T}\right)^k (1-\hat{Q})^{-1}\hat{F}_d\left(E^{(0)} + E^{(qc)}\right) + \\ + \left((1-\hat{Q})^{-1}\hat{F}_d\hat{T}\right)^N (1-\hat{Q})^{-1}\hat{F}_d E, \tag{13}$$

где

$$\hat{Q} \equiv \hat{F}_{qs}\hat{T}. \tag{14}$$

Существует и **альтернативная** форма, которая даёт в точности то же точное решение по яркости L, хотя при использовании реальных, зашумлённых вычислений результат может быть иным (с другим уровнем шума):

$$L = (1-\hat{Q})^{-1}\hat{F}_{qs}E^{(0)} + \\ + \sum_{k=0}^{N-1}\left((1-\hat{Q})^{-1}\hat{F}_d\hat{T}\right)^k (1-\hat{Q})^{-1}\hat{F}_d\left(E^{(0)} + E^{(qc)}\right) + \\ + \left((1-\hat{Q})^{-1}\hat{F}_d\hat{T}\right)^N (1-\hat{Q})^{-1}\hat{F}_d E. \quad . \tag{15}$$

Подробный вывод приведён в [12].

5. Интегрирование по траекториям от камеры

Разлагая $(1-\hat{F}_{qs}\hat{T})^{-1}$ из (13) в ряд Неймана, можем видеть, что, например, при $BDD = 2$

$$L = \hat{F}\left(E^{(0)} + E^{(qc)}\right) + \sum_{k=1}^{\infty}\hat{Q}^k\hat{F}_d\left(E^{(0)} + E^{(qc)}\right) + \\ + \sum_{k,m=0}^{\infty}\hat{Q}^k\hat{F}_d\hat{T}\hat{Q}^m\hat{F}_d\left(E^{(0)} + E^{(qc)}\right) +$$

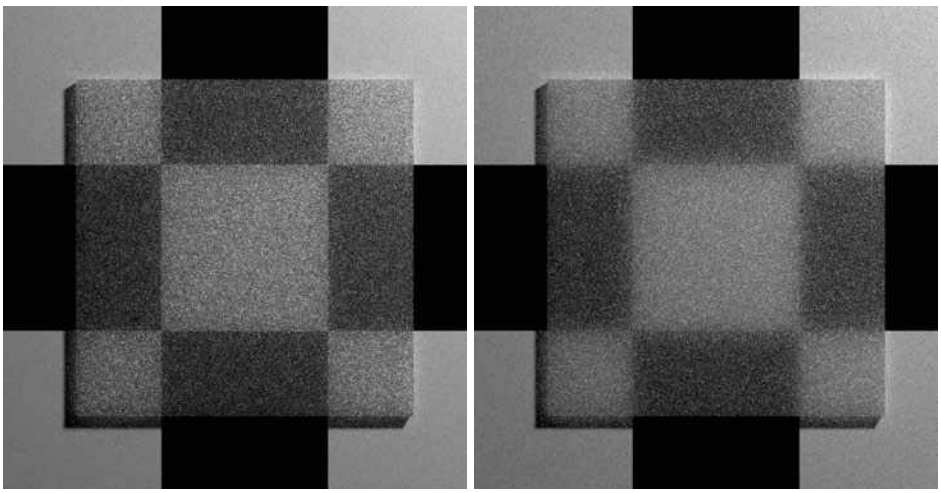

Рис. 2. Изображения, полученные для сцены из пластины рассеивающей среды, положенной на лист бумаги с шахматной текстурой. Слева – стандартный режим, справа – рассеяние в среде, трактуемое как квазизеркальное. В обоих случаях *BDD* =1

$$+\sum_{k,m,n=0}^{\infty}\hat{Q}^k\hat{F}_d\hat{T}\hat{Q}^m\hat{F}_d\hat{T}Q^n\hat{F}_d\left(E^{(0)}+E^{(qc)}\right). \qquad (16)$$

В этом выражении член вида $\hat{Q}^k\hat{F}_d\hat{T}\hat{Q}^m\hat{F}_d\left(E^{(0)}+E^{(qc)}\right)$ означает, что:

1. Завершающее (последнее перед камерой) преобразование света – это $k \geq 0$ квазизеркальных преобразований с соответствующим переносом $\hat{Q}^k = (\hat{F}_{qs}\hat{T})^k$.

2. До того (т.е. дальше от камеры) излучение испытало *истинно диффузное* преобразование с соответствующим переносом $\hat{F}_d\hat{T}$.

3. До того (т.е. ещё дальше от камеры) излучение испытало $m \geq 0$ квазизеркальных преобразований с соответствующим переносом $\hat{Q}^m = (\hat{F}_{qs}\hat{T})^m$.

4. Всё это действует на свёртку *истинно диффузной* компоненты *BRDF* с прямым и квазикаустическим освещением, т.е. на $\hat{F}_d\left(E^{(0)}+E^{(qc)}\right)$.

Действие интегральных операторов $\hat{F}_d$ и $\hat{F}_{qs}$ можно вычислять с помощью метода Монте-Карло, трассируя лучи от камеры. При этом первое преобразование луча (по пути его из камеры) соответствует левому оператору в произведении, а последнее преобразование луча – правому.

Таким образом, наш член $\hat{Q}^k\hat{F}_d\hat{T}\hat{Q}^m\hat{F}_d(E^{(0)}+E^{(qc)})$ оценивается по камерным лучам, которые **сначала** испытали квазизеркальных рассеяний $k \geq 0$, **затем** одно истинно диффузное, **затем** квазизеркальных рассеяний $m \geq 0$ и **после** того взяли яркость согласно истинно диффузной части *BRDF* при прямом и квазикаустическом освещении (т.е. диффузное освещение игнорируется).

Подробный вывод приведён в [12].

Прочие члены уравнения (16) могут аналогичным образом вычисляться с помощью метода Монте-Карло на основе трасс от камеры. Это приводит к алгоритму обработки камерных лучей, в котором яркость точки встречи вычисляется так:

• до (и включая!) первого не чисто зеркального события – $\hat{F}\left(E^{(0)}+E^{(qc)}\right)$;

• после первого квазизеркального события и до второго истинно диффузного – $\hat{F}_d\left(E^{(0)}+E^{(qc)}\right)$;

• после второго истинно диффузного события – $\hat{F}_dE$;

• на третьем истинно диффузном событии луч обрывается.

Описанное относится к случаю *BDD* = 2. Случай другого *BDD*, как и альтернативная форма (13), рассматриваются аналогично. Трассируем лучи от камеры до тех пор, пока они не испытают *BDD* + 1 истинно диффузных рассеяний (или поглотятся ранее); дальше луч не трассируется. Когда луч попадает на поверхность, имеющую диффузную или квазизеркальную *BRDF*, он берёт свёртку части *BRDF* с частью освещённости:

• *Диффузное освещение* – всегда только с диффузным остатком *BRDF*.

• *Квазикаустическое* освещение
  - **Основной вариант**:
    • до первого квазизеркального рассеяния – с полной *BRDF*;
    • после – с диффузным остатком *BRDF*.
  - **Альтернативный вариант:** всегда только с диффузным остатком *BRDF*.

• *Прямое и каустическое* освещение
  - **Основной вариант**:
    • до первого квазизеркального рассеяния – с полной *BRDF*;
    • после – с диффузным остатком *BRDF*.
  - **Альтернативный вариант**:
    • до первого диффузного рассеяния – с полной *BRDF*;
    • после – с диффузным остатком *BRDF*

6. Объёмное рассеяние

6.1. Стандартный метод

В нём всё работает так же, как в случае поверхностей. Предположим для простоты, что *BDD* = 1 и камера находится внутри рассеивающей среды. Тогда камерный луч распространяется в среде. И когда он испытывает первое объёмное рассеяние, мы собираем прямую и каустическую компоненты освещённости и свёртываем результат с фазовой функцией. В точке второго объёмного рассеяния берётся полная освещённость. После

второго диффузного рассеяния камерный луч далее не продолжается.

Рассмотрим теперь модельную сцену, в которой камера смотрит сквозь слой рассеивающей среды на некоторую освещённую диффузную поверхность. Пусть также среда непоглощающая и имеет большой коэффициент рассеяния, так что камерный луч претерпевает *много* актов рассеяния в ней до достижения этой поверхности. Ну и наконец, пусть фазовая функция узкая, так что каждое рассеяние лишь незначительно изменяет направление луча.

В стандартном методе с небольшим *BDD* камерный луч заканчивается недалеко от его входа в среду (т.е. от камеры), и луч вообще не достигает диффузной поверхности за ней. Кроме того, поскольку фазовая функция узкая, то свёртка её с освещённостью от поверхности сцены приводит к сильному шуму (см. п. 3).

Поэтому для снижения шума мы должны использовать большое *BDD*, чтобы камерный луч проходил сквозь среду и достигал поверхности за ней, и, кроме того, не собирать диффузное освещение в точках объёмного рассеяния. Однако это требует хранения всех актов объёмного рассеяния луча на его длинной трассе (поскольку там собираются прямое и каустическое освещение), что обычно весьма обременительно по памяти.

6.2. Квазизеркальная среда

Применение квазизеркального подхода позволяет заметно улучшить ситуацию для сцен этого типа.

Предположим, что поверхность сцены не квазизеркальная (то есть, у неё не выделено квазизеркальной компоненты, обрабатываемой, как описано в конце п. 5). Пусть также *вся* фазовая функция трактуется как квазизеркальная, т.е. её истинно диффузная часть $\hat{F}_d = 0$. Тогда, покуда камерный луч распространяется внутри рассеивающей среды он испытывает только квазизеркальные события, которые не увеличивают счётчика диффузных событий. В результате он распространяется в среде пока не покинет её, и в итоге достигает поверхности сцены.

Диффузное освещение теперь составляет излучение, отражённое от диффузной поверхности сцены; квазикаустика – это свет, испытавший хотя бы одно объёмное рассеяние (и произвольное число зеркальных рассеяний – но ни одного рассеяния на диффузных поверхностях).

Коль скоро $\hat{F}_d = 0$, основной вариант (см. конец п. 5) предполагает, что в точках объёмного рассеяния диффузное освещение (от поверхности сцены) игнорируется, а прямое, каустическое и квазикаустическое освещение используются только в точке первого объёмного рассеяния.

В результате при любом *BDD* камерный луч покидает среду и достигает поверхности сцены. При этом запоминается только одно (первое) объёмное рассеяние, а в последующих точках яркость среды не берётся. Также нет сильного шума от свёртки узкой фазовой функции с диффузной освещённостью (от поверхности), но есть её свёртка с параметрами прямого, каустического и рассеянного лишь внутри среды типами освещения. Однако последние обычно не имеют широкой направленности и потому не приводят к сильному шуму.

Альтернативный вариант (см. конец п. 5) тут менее выгоден, поскольку прямое и каустическое освещение в нём берутся во всех точках объёмного рассеяния. Поэтому необходимо хранить в памяти все точки объёмного рассеяния на длинной трассе, чтобы потом в них брать свёртку фазовой функции с параметрами прямого и каустического освещения из фотонных карт. В случае, если первой делается фаза трассировки от камеры, формирующая обратную фотонную карту, а лучи от источника не запоминаются и обрабатываются на ходу, это потребует неприемлемо большой памяти.

7. Результаты

7.1. Для поверхности

Вычисления для описанной в п. 3 модифицированной сцены «*Cornell Box*» в квазизеркальном режиме выполнены при *BDD* = 0 при равных условиях и за одинаковое время (200 с), как и для стандартного режима. Результаты для стандартного режима и с применением квазизеркального метода показаны на рис. 1.

Видно, что при применении предложенного метода на стенках «*Cornell Box*» удалось добиться такого же пониженного шума, что и при стандартном методе с *BDD* = 0. При этом внизу параллелепипедов мы смогли снизить шум примерно так же, как и при стандартном методе с *BDD* = 1. В определённой мере тем самым получен наилучший результат.

7.2. Для объёмного рассеяния

Модельная сцена представляет собой пластину толщиной 3 мм, положенную на лист бумаги с шахматной текстурой и освещённую самосветящейся сферой над ней. Рассеивающая среда внутри пластины имеет показатель преломления 1,5, показатель рассеяния 7,5 мм$^{-1}$ и фазовую функцию Хеньи-Гринстейна [13] с параметром g = 0,9.

Изображения, вычисленные за равное время и при прочих одинаковых параметрах, приведены на рис. 2. Видно, что при использовании стандартного метода границы текстурных квадратиков *резкие*, а на самом деле они должны размываться. При использовании же квазизеркального представления фазовой функции эти границы размываются, что соответствует тому, что для реальной пластины мы видим в жизни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jensen H.W.* Global illumination using photon maps / in Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques ‘96. – Wien: Springer-Verlag, 1996. – P. 21–30.

2. *Jensen H.W.*, *Christensen P.* High quality rendering using ray tracing and photon mapping / in ACM SIGGRAPH 2007 Courses, SIGGRAPH ‘07, ACM, 2007.

3. *Hachisuka T.*, *Jensen H.W.* Stochastic progressive photon mapping / in ACM SIGGRAPH Asia 2009 Papers, SIGGRAPH Asia ‘09, ACM, 2009. – P. 141:1–141:8.

4. *Pharr M.*, *Humphreys G.* Physically Based Rendering, Second Edition: From Theory To Implementation. – San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2010.

5. *Жданов Д.Д.*, *Ершов С.В.*, *Волобой А.Г.* Адаптивный выбор глубины трассировки обратного луча в методе двунаправленной стохастической трассировки лучей / in Proceedings of 25-th International Conference on Computer Graphics and Vision, September 22–25, 2015. – P. 44–49.

6. *Vorba J*. Bidirectional photon mapping / in Proceedings of CESCG 2011: The 15th Central European Seminar on Computer Graphics, SIGGRAPH ‘86, (Prague), Charles University, 2011.

7. *Ershov S.V*., *Zhdanov D.D*., *Voloboy A.G*. Estimation of noise in calculation of scattering medium luminance by mcrt // Mathematica Montisnigri. – 2019. – Vol. XLV. – P. 60–73.

8. *Georgiev I., Krivanek G.J*., *Davidovic T*., *Slusallek P*. Light transport simulation with vertex connection and merging // ACM Trans. Graph. – 2012. – Vol. 31, No. 6. – P. 192:1–192:10.

9. *Popov S*., *Ramamoorthi R*., *Durand F*., *Drettakis G*. Probabilistic Connections for Bidirectional Path Tracing // Computer Graphics Forum (Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering). – 2015. – Vol. 34, No. 4.

10. *Dodik N*. Implementing probabilistic connections for bidirectional path tracing in the Mitsuba Renderer / Bachelor Thesis. – Wien: Technische Universität Wien, 2017.

11. *Kajiya J.T*. The rendering equation / in Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH ‘86. – 1986. – Vol. 20, No. 4. – P. 143–150.

12. *Ershov S.V*., *Zhdanov D.D*., *Voloboy A.G*., *Sorokin M.I*. Treating diffuse elements as quasi-specular to reduce noise in bi-directional ray tracing // Preprint of the Keldysh Institute of Applied Mathematics. – 2018. – No. 122. – 30 p.

13. *Pomraning G*. On the Henyey-Greenstein approximation to scattering phase functions // JQSRT. – 1988. – Vol. 39, No. 2. – P. 109–113.

Ершов Сергей Валентинович, *кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1988 г. физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Старший научный сотрудник отдела компьютерной графики и вычислительной оптики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика, численные методы математической физики, методы Монте Карло, трассировка лучей, задачи дифракции*

Жданов Дмитрий Дмитриевич, *кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1984 г. ЛИТМО по специальности «Оптическое и оптико-электронное приборостроение». Доцент Университета ИТМО. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика, виртуальная и дополненная реальность*

Волобой Алексей Геннадьевич, *доктор физ.-мат. наук. Окончил в 1988 г. механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Ведущий научный сотрудник отдела компьютерной графики и вычислительной оптики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика, трассировка лучей, моделирование освещённости*

Дерябин Николай Борисович, *математик. Окончил в 1977 г. механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Научный сотрудник отдела компьютерной графики и вычислительной оптики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: компьютерная графика, графические драйверы*

Светочувствительный белок чувствует вкус

Мы видим благодаря светочувствительным клеткам сетчатки глаза, у которых есть специальные светочувствительные белки под названием опсины. Под действием света опсины меняют пространственную форму, из-за чего меняется концентрация ионов по обе стороны клеточной мембраны. В темноте постоянные потоки ионов подавляют активность нейронов (а клетки сетчатки – это нервные клетки); но когда опсины принимают свет и меняют форму, они закрывают некоторые ионные каналы, и нейрон получает возможность сгенерировать сигнал.

Известно очень много разновидностей опсинов: разные их типы настроены на световые волны разной длины, кроме того, они у разных организмов свои. Но до поры до времени никто не думал, что опсины могут делать что-то ещё, кроме как чувствовать свет – пока в 2011 г. Крэйг Монтелл (*Craig Montell*) и его коллеги из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре не опубликовали работу, в которой говорилось, что опсины помогают дрозофилам чувствовать небольшие изменения температуры в пределах, когда температура ещё комфортна для самих мух.

Прошло ещё несколько лет, и вот сейчас в «*Current Biology*» вышла новая статья Монтелла и его сотрудников, которые утверждают, что опсины помогают дрозофилам чувствовать ещё и вкус. Исследователи изучали вкусовые рецепторы дрозофил, действуя на них аристолоховой кислотой (АК) – токсичным и горьким веществом, которое содержится в некоторых растениях.

Высокие концентрации АК включали вкусовые рецепторы *TRPA1*, вызывавшие у насекомых отвращение. Однако мухи явно чувствовали неприятную горечь и при низких концентрациях АК, которых было недостаточно, чтобы подействовать на обычные вкусовые рецепторы. Когда дрозофилам предлагали просто сладкий раствор и сладкий раствор с примесью горького вещества, мухи выбирали первый, без примеси.

Если у дрозофил во вкусовых нейронах молекулярно-генетическими методами отключали гены опсинов – все три типа, что у них есть – то дрозофилы переставали отличать сладкое от сладкого с горькой примесью, но продолжали чувствовать большие концентрации горечи. То есть всё дело было именно в светочувствительных белках. Дальнейшие эксперименты показали, что АК связывается с опсинами в том же месте, где с ними связывается ретиналь – альдегид витамина *А*, который ловит световые волны и помогает опсину менять пространственную форму, чтобы дать клетке возможность сгенерировать импульс. То есть опсины чувствуют горечь без своего светочувствительного модуля, при этом усиливают «горький» сигнал, позволяя обнаруживать горечь даже в очень небольшой концентрации.

Может быть, у светочувствительных белков есть ещё какие-нибудь умения: может, они способны воспринимать разные виды горьких молекул, может, они участвуют и в других вкусовых ощущениях, и т.д. – дальнейшие исследования покажут, так это или не так. Авторы работы полагают, что вкусовая функция была у опсинов эволюционно первой, так как отличать горький яд от безопасной пищи более важно, чем отличать свет от тьмы. Потом, когда живые организмы стали сложнее и всё же возникла необходимость отличать свет от тьмы, к этой работе удалось приспособить уже существующий вкусовой рецептор, снабдив его добавочной молекулой-придатком для улавливания световых волн.

nkj, ru
04.2020