

# Моделирование отражения радиоволн от сложных полигональных моделей

Ефремов Андрей Сергеевич

xx.xx.xxxx

## Аннотация

ааааааа

## Введение

—введение про cuda— Проведем простые предварительные расчеты. Если наша модель содержит 10 000 полигонов, то для того, чтобы определить, какие грани являются первичными для всей модели нам потребуется обработать порядка  $10^8$  полигонов (без оптимизаций). Это число внушительно, требуются большие мощности. Поэтому для расчетов будем использовать вычисления на графических ускорителях и технологию CUDA.

Графические ускорители выросли из задач обработки и формирования изображения на экране компьютера постепенно переродившись в массивно-параллельные процессоры общего назначения. Сам термин GPU (Graphics Processing Unit) относительно новый и впервые был использован корпорацией Nvidia, в качестве обозначения того, что графические ускорители стали мощными программируемыми устройствами пригодными для решения более широкого класса задач, не связанных с графикой. [\*боресков основы работы с cuda]

Первые графические ускорители представляли из себя простые растеризаторы, однако эту простую задачу делали быстрее универсального процессора, что и привело к распространению графических ускорителей. Основная причина этого – ускоритель мог обрабатывать хоть и простую, но зато масштабную работу – обрабатывать сразу много отдельных пикселей. [\*боресков]

По мере развития функциональность увеличивалась. Фактически графические ускорители стали представлять из себя SIMD-процессоры (Single Instruction Multiple Data), то есть параллельные устройства, способные одновременно выполнять одну и ту же операцию над многими данными. Экспоненциальный рост производительности и функциональности дал развитие направлению GPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing Units).

Все это открывает новые возможности при реализации приложений, требующих больших объемов специфических вычислений. И если раньше ресурсоемкие задачи и можно было решить, то только с использованием су-

персональных компьютеров и кластеров, то теперь это представляется возможным на обычном пользовательском компьютере.

На сегодняшний день существуют несколько технологий для разработки приложений, использующих для вычислений графические ускорители: OpenCL, CUDA, ATI Stream Technology. В нашей работе мы остановимся на технологии Nvidia CUDA и будем использовать её.

Тому причин несколько. Nvidia CUDA хорошо зарекомендовала себя при решении многих ресурсоемких задач: моделирование гидродинамики [\*бег-резин], волн цунами [\*курако], ускорение вычисления нейронных сетей [\*парубец].

## Модели отражения

### 2. ———- Виды отражения ———-

Радиоволна, как и любая другая электромагнитная волна, отражается от препятствий, причем препятствием является любая неоднородность электрических или магнитных параметров среды, то есть объект отражает электромагнитную энергию, в случае если проводимость, диэлектрическая или магнитная проницаемость отличается от соответствующих параметров среды. Так как от поверхности в результате процесса отражения отходит электромагнитная энергия, то можно считать, что отражатель сам является источником (вторичным) электромагнитного излучения. Это явление можно также представить себе следующим образом: при попадании волны на поверхность предмета, она в нем порождает вынужденные колебания зарядов, которые синхронны с колебаниями падающей волны. Колебания зарядов создают токи смещения и токи проводимости, и сами становятся источниками излучения. Каждый такой элементарный ток в рамках достаточно малого точечного объема можно считать источником новой сферической волны. Общий их результат таких элементарных токов (в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля [\*]) суммируется с различными фазовыми соотношениями и может принимать разные значения, а падающая волна отражается во всех направлениях. Значит, энергия переизлучается в различных направлениях неравномерно. [\*]

Радиоволны и световые волны имеют одну и ту же физическую электромагнитную природу, поэтому многие модели поведения света известные из оптики (кстати как и способы получения фотореалистических изображений компьютерной геометрии) применимы в нашем случае. Рассмотрим основные модели отражения радиоволн: зеркальное, диффузное и резонансное. Подробнее информацию об этом можно найти в [\*].

Зеркальное отражение.

Условие возникновения: линейные размеры отражающей поверхности много больше длины волны ( $l \gg \lambda$ ), а сама поверхность является достаточно гладкой ( $h \ll \lambda$ ), где  $l$  – наименьший линейный размер цели;  $\lambda$  – длина волны;  $h$  – высота неровностей поверхности.

Свойства зеркального отражения известны еще с давних времен и являются следствиями применения принципа Ферма к отражающей поверхности [\*]: - луч отраженный, луч падающей, а также нормаль отражающей поверхности, проведенная к точке падения, лежат в одной плоскости; - угол падения равен углу отражения.

«тут типа картинка такая»

Интенсивность отражённого света характеризуется коэффициентом отражения и зависит от соотношения показателей преломления сред, от угла падения и поляризации падающего пучка лучей. Количественно эту зависимость выражают формулы Френеля [\*].

Диффузное отражение.

Условие возникновения: линейные размеры отражающей поверхности много больше длины волны ( $l \gg \lambda$ ), а неровности поверхности имеют порядок длины волны (или больше) и расположены хаотично, то есть поверхность является шероховатой (матовой) ( $h \geq \lambda$ ).

При диффузном отражении энергия рассеивается во всех направлениях. Для матовых поверхностей применимы законы Ламберта [\*]: для потока излучения, падающего нормально к матовой поверхности, мощность вторичного излучения под углом  $\gamma$  к нормали пропорциональна  $\cos\gamma$ .

$$P = P_0 \cdot \cos\gamma \quad (1)$$

«<Тут типа много других картинок»>

Если поток излучения падает под углом  $\alpha$  к поверхности, то

$$P = P_0 \cdot \cos\alpha \cdot \cos\gamma \quad (2)$$

где  $P_0$  – мощность, которую принимал бы приемник, если бы облучение шло с "зенита" то есть с увеличением  $\alpha$  уменьшается перехватываемый поверхностью падающий поток, отчего уменьшается освещенность и яркость.

Условия зеркальности и диффузно отражающих поверхностей являются расплывчатыми. Здесь [\*] дается строгая формулировка и вывод критерия различия зеркальных и матовых поверхностей. Скажем лишь, что тип поверхностей зависит сразу от трех факторов: высота неровностей поверхности  $h$ , длина волны  $\lambda$  и угла падения  $\phi$ .

«очередной рисунок можно из Википедии про то как в разные стороны отражается можно картинку из Фуко»

Закон Ламберта – закон идеального рассеивания света, то есть это некоторая модель, которой можно приблизиться, но которой не существует в естественных условиях. В реальной жизни поверхности обычно дают отражение, представляемое смесью диффузной и зеркальной составляющих.

«<Про компьютерную геометрию какие способы при моделировании используют, то есть про смешанный способ и про ДФО»>

Резонансное отражение.

Список моделей отражения был бы не полон если не упомянуть резонансное отражение. Как уже было отмечено, падающая волна создает вынужденные колебания свободных или связанных зарядов в поверхности предмета. Тело, способное переизлучать электромагнитную волну, обладает собственной частотой колебаний частиц, несущих электрический заряд. Причем, если частота колебаний падающей волны совпадает с собственной частотой колебаний в поверхности, то имеем не что иное как явление резонансного отражения. В этом случае появляется ярко выраженная направленность вторичного излучения. Подробнее об этом явлении можно прочитать в [\*]

Модель отражения в работе

При моделировании распространения сигнала в космосе и его отражения от космического корабля была использована диффузная модель отражения.

## Математическая постановка задачи

«<излучает на 360 - антенная решетка»>

Предположим, у нас есть ненаправленная антенна, представляемая точечным источником (расстояние до площадки значительно больше размеров антенны) с излучающей мощностью  $P_0$ . Тогда вся энергия распределяется равномерно по всей поверхности некоторой сферы радиуса  $R$ , площадь поверхности которой равна  $4\pi R^2$ . Таким образом, источник электромагнитного излучения создает плотность потока мощности

$$J = \frac{P_0}{4\pi R^2} \quad (3)$$

Следовательно, каждая точка поверхности  $M(x, y, z)$ , которая располагается в зоне прямой видимости, получает от источника излучения в секунду энергию мощности на единицу площади равную

$$dP_{in} = \langle \vec{J}(x, y, z) \cdot \vec{d\sigma} \rangle = J(x, y, z) \cdot d\sigma \cdot \cos\phi, \quad (4)$$

где  $d\sigma$  – окрестность точки  $M(x, y, z)$ , а  $\phi$  – угол между вектором  $\vec{J}(M)$  и нормалью к поверхности  $d\sigma$ , направленной в противоположную сторону от источника излучения.

Значит, учитывая (4), первично-освещенная поверхность получает в секунду энергию мощности, равную

$$P_{in} = \iint_S \langle \vec{J}(x, y, z) \cdot \vec{d\sigma} \rangle, \quad (5)$$

где  $S$  – первично-освещенная поверхность.

Часть энергии попадаемые в точки первично-освещенных поверхностей поглощается, часть отражается. Точки, отражающие электромагнитные волны ведут себя как вторичные источники электромагнитного излучения, а значит вышепроделанные умозаключения к ним тоже применимы.

После многократного отражения и переотражения получаем, что для каждой точки  $M(x, y, z)$  справедливо

$$J_{out}(x, y, z, \omega) = \int_{\Omega} J_{in}(x, y, z, \theta) \cdot f(x, y, z, \omega, \theta) \cdot d\theta, \quad (6)$$

где  $J_{out}$  – поток из точки  $(x, y, z)$  в направлении  $\omega$ , а  $J_{in}$  – поток входящего в точку  $(x, y, z)$  излучения из направления  $\theta$ . В данном уравнении интеграл взят по  $\Omega$  – совокупности входящих направлений в точку  $M(x, y, z)$ . Способ отражения от поверхности, а также соотношение отраженной энергии и поглощенной задано в общем случае двунаправленной функцией распределения отражения  $f(x, y, z, \omega, \theta)$  [wiki?].

Уравнение (6) является частным случаем более общего уравнения, называемого уравнением рендеринга [\*]. Существует несколько подходов к его решению. Рассмотрим их.

# Обзор методов решения уравнения рендеринга

## Алгоритм излучательности (radiosity)

### Алгоритм «бросания лучей» ray-casting

Фактически, данный метод учитывает только первично-освещенные точки поверхности. Из точки выпускается луч по направлению к источнику. Если этот луч имеет пересечения с каким-либо фрагментом поверхности, то значит, что точка, из которой был выпущен луч, находится в тени. В ином случае, рассчитываем долю энергии получаемую точкой. [\*история рендеринга]

«красивая картинка»

## Алгоритм visibility ray-tracing и трассировка фотонов

Предыдущий алгоритм учитывал только первично-освещенные точки. Повысив количество

### Метод Монте-Карло (на базе трассировки лучей)

Все пространство разбивается равномерной сеткой. Количество узлов в трехмерном пространстве при этом равно  $N^3$ . Узлы, по которым ведется интегрирование, выбираются случайно. Соответственно, при увеличении числа узлов интеграл, вычисленный методом Монте-Карло, приближается к точному значению. Но при недостаточном количестве узлов получаем шумы.

## Метод распределенной трассировки лучей

### Блок-схема алгоритма

### Реализация

#### 1. ———Трассировка лучей ———

Для определения видимости полигона  $\alpha$  из точки  $L$ , рассматривается отрезок  $LP$ , где  $P$  – центр полигона. Находятся все пересечения отрезка с полигонами модели (разумеется, многоугольник  $\alpha$  не подлежит рассмотрению). Если таких граней не нашлось, то грань  $\alpha$  считается видимой из точки  $L$ , иначе – невидимой.

Задача определения пересечения отрезка и многоугольника разбивается на следующие этапы.

1. Определить точку пересечения  $M$  плоскости многоугольника и прямой, содержащей отрезок.
2. Находится ли точка пересечения  $M$  внутри многоугольника.
3. Находится ли точка пересечения  $M$  внутри отрезка.

Несмотря на то, что для достаточно детализированной модели с количеством полигонов в несколько тысяч, данный процесс достаточно трудоемок, в работе программе исходной статьи никакие способы оптимизации не использовались. Способов оптимизации действительно много и сравнение самых популярных можно прочитать в [\*].

## Результаты

## Выводы

## Список литературы

- [1] *N. Nikitin*, Finite-difference method for incompressible Navier–Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates // J. Comput. Phys. 217 (2006) 759–781.
- [2] *Etienne Non, Roger Pierre, and Jean-Jacques Gervais*, Linear stability of the three-dimensional lid-driven cavity // Physics of Fluids 18, 084103 (2006)