

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ

Суворова И.П.

Кафедра ПМИИ, ДонГТУ

[suvorova@r5.dgtu.donetsk.ua](mailto:suvorova@r5.dgtu.donetsk.ua)

### Abstract

*Suvorova I.P. The modelling of natural phenomena. A number of models for generating clouds have been presented in the computer graphics literature. Some physical models are considered. Blinn used a single scattering model to implement the particles in clouds. Kajiya and von Herzen generated cloud images and suggested a model for multiple scattering. Some methods taking into account anisotropic multiple scattering and sky light are considered.*

### Введение

При построении систем отображения проектных решений, имитаторов визуальной обстановки для тренажеров летательных аппаратов и других транспортных средств возникает необходимость решить задачу синтеза изображения «поверхности» неба. Особую важность для тренажеров полетов приобретает моделирование природных явлений в атмосфере (облака, рассеянный солнечный свет, снег, радуга, туман и другие). Важным и, по видимому, наиболее сложным является моделирование облачного покрова. Важность адекватного отображения топологии, геометрии и динамики отдельных облаков и облачного покрова в целом, связана с тем, что облака для пилота зачастую являются единственным визуально наблюдаемым природным объектом, по которому можно определить ориентацию аппарата и направление его перемещения. Сложность моделирования облачного покрова определяется, во-первых, сложностью и разнообразием геометрии реального облака, и, во-вторых, необходимостью синтезировать изображения в реальном времени.

В настоящее время в основном проработаны вопросы синтеза статических изображений облачного покрова неба. Здесь можно выделить несколько типов моделей для генерации изображений облаков в атмосфере: структурные, импрессионистские и физические. Основная цель настоящей работы заключается в оценке известных алгоритмов моделирования облачного покрова с позиции возможности их использования для генерации динамических изображений.

### 1. Структурные модели

Наиболее часто используются структурные модели, которые основаны на текстурных поверхностях [1,2,3]. Одной из них является модель Гарднера [3]. В этой модели различные типы облаков могут быть показаны с разных расстояний и углов: перистые облака (тонкие облака на большой высоте), слоистые облака (на малой высоте) и кучевые облака (теплые облака на малой высоте). Облачная модель использует три основных этапа: небесную плоскость, эллипсоиды и математическую текстурную функцию.

“Поверхность” неба моделируется плоскостью параллельной плоскости земли. Уравнение небесной плоскости на высоте  $A$  следующее:

$$P(x, y, z) = Z - A = 0.$$

Поверхность одиночного облака представляется трехмерным эллипсоидом и описывается следующим уравнением:

$$Q(x, y, z) = Q_1x^2 + Q_2y^2 + Q_3z^2 + Q_4xy + Q_5yz + Q_6xz + Q_7x + Q_8y + Q_9z + Q_{10} = 0.$$

Математическая текстурная функция аналогична текстурной функции для описания физических особенностей местности:

$$T(x, y, z) = k \sum_i C_i \sin(FX_i x + PX_i) + T_0 + \sum_i C_i \sin(FY_i y + PY_i) + T_0, \quad (1)$$

где  $T_0$  — параметр для контроля контраста текстурного образца,  $k$  — параметр, который имеет максимальное значение 1 для  $T(x, y, z)$ ,  $FX_i$  и  $FY_i$  — частоты,  $C_i$  — коэффициенты, которые выбраны из следующих условий:  $FX_{i+1} = 2F_i$ ,  $FY_{i+1} = 2F_i$ ,  $C_{i+1} = 0.707C_i$ ,  $PX_i$  и  $PY_i$  — функции фазового сдвига, которые представляют неровности. Гарднер предлагает следующие функции:

$$PX_i = \frac{\pi}{2} \sin(FY_{i-1}y) + \pi \sin(FX_i \frac{z}{2}).$$

$$PY_i = \frac{\pi}{2} \sin(FX_{i-1}x) + \pi \sin(FY_i \frac{z}{2}).$$

Интенсивность тени вычисляется как:

$$I = (1-f)\{(1-t)[(1-s)I_d + sI_s] + tI_t\} + f,$$

где  $I_d$  — интенсивность, которая соответствует диффузному отражению,  $I_s$  — интенсивность, которая соответствует зеркальному отражению,  $I_t$  — интенсивность, соответствующая текстурной функции [ $I_t = T(x, y, z)$ ],  $f$  является коэффициентом отражения от поверхности, соответствующему окружающему свету,  $t$  является коэффициентом текстурной тени,  $s$  является коэффициентом зеркального отражения.

Полупрозрачность плоскости неба и эллипсоиды моделируются определением порогового значения для текстурной функции. Для эллипсоидов полупрозрачность возрастает у границы, используя лимб-кривую. Моделируемая полупрозрачность вычисляется как:

$$TR = \frac{I_t - T_1 - (T_2 - T_1)(1 - g(x, z))}{D},$$

где  $T_1$  — это порог в центре лимб-кривой,  $T_2$  — это порог на границе лимб-кривой,  $D$  — это диапазон значений текстурной функции, и  $g(x, y)$  — это нормализованная лимб-кривая.

Т.Нишита и Е.Накамаи для изображения облаков предлагают использовать метод метаболлов [5]. Каждый метаболл определяется центром, радиусом и



плотностью в центре метаболла. Из таких метаболлов составляются изоповерхности, которые потом проецируются на плоскость облака.

## 2. Физические модели

Блинн [2] использовал модель с одиночным рассеиванием для выполнения точного рассеивания от частиц в облаках.

Модель состоит из статистически моделируемого света, проходящего через облака из похожих малых частиц. Основная модель предполагает облако из сферических отражающих частиц радиуса  $r$ , расположенных случайно в слое толщиной  $T$  с  $n$  частицами на единицу объема. На рисунке 2.1 показан такой слой:

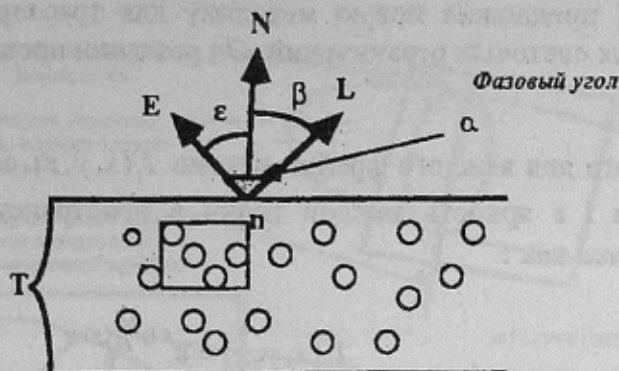


Рисунок 2.1 — Геометрия слоя облака

Угол  $\alpha$  между  $L$  (направлением падения) и  $E$  (направлением эмиссии) очень важен и называется фазовым углом. Функция, которая характеризует общую яркость частицы, является фазовой функцией  $\varphi(\alpha)$ . Следует определить функцию общей яркости нечеткого объекта  $B$ . Блинн сделал серию некоторых допущений и получил следующий результат:

$$B = \frac{\omega}{\mu} \varphi(\alpha) s + Tr Col,$$

где  $\omega$  — альbedo, являющееся величиной отражательной способности поверхности;  $\mu$  — косинус угла эмиссии;  $\varphi(\alpha)$  — это фазовая функция;  $s$  — вероятность рассеивания;  $Tr$  — прозрачность нечеткого объекта;  $Col$  — цвет фона.

Предполагая, что альbedo = 0 (низкое альbedo), Блинн показал, что вероятность рассеивания может быть вычислена как

$$s = \frac{\tau}{\mu} e^{-\tau/\mu},$$

а прозрачность — как

$$Tr = e^{-\tau/\mu} + \omega \varphi(\pi),$$

где  $\tau$  — оптическая глубина. Это означает, что свет, проходя через нечеткий объект оптической глубины  $\tau$  ослабевает на фактор  $e^{-\tau}$ .

Для фазовой функции  $\varphi(\alpha)$  существует несколько вариантов, зависящих от допущений:

1. Постоянная функция:  $\varphi(\alpha) = 1$ .

2. Анизотропная функция:  $\varphi(\alpha) = 1 + x \cos(\alpha)$ , где  $x$  - это свойство материала.
3. Функция Ламберта:  $\varphi(\alpha) = \frac{8}{3} \pi (\sin \alpha + (\pi - \alpha) \cos \alpha)$ .
4. Дифрагирующая функция:  $\varphi(\alpha) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \alpha)$ .
5. Функция Ханей–Гринштейна:  $\varphi(\alpha) = (1 - g^2) / (1 + g^2 - 2g \cos \alpha)^{3/2}$ , которая является уравнением эллипса с эксцентриситетом  $g$  в полярных координатах;  $g$  зависит от материала.

Блинн предположил, что значение альбеда  $\omega \cong 0$ . Для альбеда  $\omega \cong 1$  (высокое альбеда) Кьяджа [4] предложил новую методику для трассировки лучом объемных плотностей без любых световых ограничений. Он разделил процесс изображения на два шага:

На первом шаге для каждого фрейма массив  $I_i(x, y, z)$  содержит вклад каждого светового источника  $i$  в яркость каждой точки в пространстве. Элементы массива  $I_i(x, y, z)$  вычисляются как:

$$I_i(x, y, z) = e^{-\kappa \int \rho(r(y)) dy},$$

где  $\kappa$  — коэффициент поглощения,  $\rho$  — плотность материала в объемном пространстве. Интегрированная оптическая длина пути в направлении луча вычисляется билинейным отбором проб и суммированием массива плотности  $\rho(x, y, z)$  в направлении луча.

Для каждой трассы луча вместо ограничивающей прямоугольной призмы в качестве пространства впервые отобран луч. Яркость  $B$  вычисляется интегралом Ромберга:

$$B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} AC \rho(x(t), y(t), z(t)) dt,$$

где  $\lambda_1$  — начало пути между глазом и наиболее далеким объемным элементом. Это максимальное расстояние между 0 и расстоянием до ближайшего пересечения с ограничивающим пространством;  $\lambda_2$  — это конец пути. Это минимальное расстояние до ближайшей точки пересечения с базой данных и расстоянием до наиболее дальнего пересечения с ограничивающим пространством,  $A$  — это сумма ослабления, соответствующая поглощению и рассеиванию материала, видимая для глаза:

$$A = \exp(-rI'),$$

где  $I' = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(x(t'), y(t'), z(t')) dt'$ ;  $C$  — это яркость вклада каждого светового источника

в яркость одной любой точки:

$$C = \sum_i I_i(x(t), y(t), z(t)) \rho(\cos \theta_i),$$

где  $\rho(\cos \theta_i)$  - это фазовая функция, зависящая от фазового угла  $\theta_i$ .

### 3. Импрессионистские модели

Гарднер предложил использовать импрессионистские модели [1].



Сцена складывается из множества выпуклых объектов, с каждым из которых определяется одна поверхность второго порядка и  $N$  ограничивающих плоскостей, где  $N$  может быть  $= 0$ . Этот подход не требует вычисления пересечений между поверхностями второго порядка.

Ключ к методу Гарднера — это определение частей ограничивающих кривых, которые видны в изображении. Стратегия состоит из проецирования всех поверхностных границ на плоскость изображения. Потом, все ключевые точки на границе и изменения видимости поверхности определяются на каждой границе. Эти ключевые точки потом используются для списка видимых границ и поверхностей (рис.3.1).

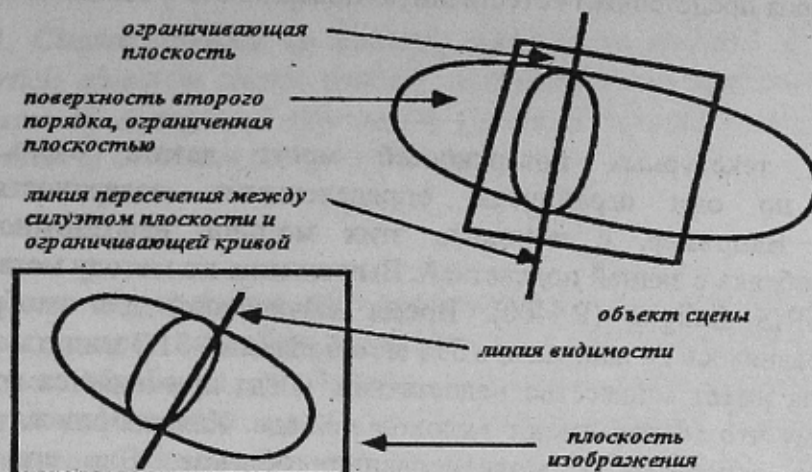


Рисунок 3.1 — Кривые изображения в алгоритме Гарднера

Лимб-кривая — это проекция силуэта поверхности второго порядка. Кривые пересечения между поверхностью второго порядка и ее ограничивающими плоскостями потом проецируются, давая кривые пересечения. Чтобы определить какие граничные сегменты кривой видны, Гарднер ввел концепцию видимой линии. Видимая линия для построительной плоскости определяется как проекция на плоскость изображения линии пересечения между плоскостью силуэта поверхности второго порядка и ограничивающей плоскостью. Эта видимая линия может использоваться, чтобы определить видимость каждой точки на лимб-кривой относительно взятой ограничивающей плоскости, и видимость любой точки на пересечении кривой относительно той плоскости.

Для объектов, с более чем одной ограничивающей плоскостью, вводится линия пересечения. Она определяется как изображение пересечения между двумя ограничивающими плоскостями. Определяя ключевые точки, можно найти, какие сегменты границы являются видимыми, задав все ограничивающие кривые и линии изображения. Ключевые точки видимости границ:

- экстремумы кривой;
- константные точки, которые являются точками касательной между лимб-кривой и кривой пересечения;
- точки пересечения, которые являются точками пересечения между линией пересечения и кривой пересечения, соответствующей общей плоскости;

- триплет-точки, которые являются точками угловых пересечений трех ограничивающих плоскостей изображения.

Видимость определяется тестированием ключевых точек. Алгоритм использует список видимых ключевых точек, отсортированных по глубине. В алгоритме также учитывается определение приоритетов между различными объектами.

Изображение естественных поверхностей производится текстурированием. Поверхности могут быть эффективно построены моделированием теневых интенсивностей поверхности. Из соображений эффективности, Гарднер выбрал текстурные значения, соответствующие простым точкам изображения, только для видимых точек поверхности сцены. Он предложил математическую текстурную функцию, которая представляет естественную поверхность в статистическом виде (1).

### Заключение

Методы текстурных поверхностей могут давать очень реалистичные изображения, но они ограничены определенными поверхностями зрения и расстояниями. Например, с помощью этих методов невозможно сгенерировать реалистичные облака с задней подсветкой. Вычисления по методу метаболлов [5] были сделаны на IRIS Indigo2 (R4400). Время вычислений для изображения с 338 метаболлами равнялось 20 минутам, с 358 метаболлами - 31.3 минуты. Аппроксимация альbedo Блинна имеет множество недостатков, когда применяется к моделированию облаков, потому что облака имеют высокое альbedo. Кьяджа описал приложение его диффузионного алгоритма к моделированию облаков. Для его модели может потребоваться около 20 уравнений сферических гармоник и около 400 коэффициентов. Недостатком всех физических моделей является отсутствие высокочастотной детализации в геометрии облаков. Вычислительные затраты в импрессионистских моделях уменьшаются, так как рисованные формы сводятся к простым формам.

Все, приведенные выше, алгоритмы моделирования облачного покрова не могут использоваться для генерации динамических изображений. Для адекватного отображения облачного покрова в тренажерах полетов требуется воспроизведение нескольких сотен кадров в секунду. Такой скорости изображения можно достичь только при использовании методов параллельного программирования. В настоящее время является актуальной работа по созданию алгоритмов синтеза изображений в реальном времени.

### Литература

1. Magnenat-Thalmann N., Thalmann D. Image Synthesis — Tokyo.: Springer-Verlag, 1987, pp.294—256, 306—311.
2. Blinn J. Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces. Proc. SIGGRAPH '82, Computer Graphics 16(3), pp.21—29.
3. Gardner G.Y. Visual simulation of clouds. Proc. SIGGRAPH '85, Computer Graphics, 19(3), pp.297—303.
4. Kajiya J.T., Herzen B.V. Ray tracing volume densities. Proc. SIGGRAPH '84, Computer Graphics 18(3), pp.165—174.
5. Nishita T., Nakamae E. Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering. Proc. SIGGRAPH '96, Computer Graphics 30 (Annual Conference Series), pp.379—386.