

Подход к высокореалистичной визуальной имитации разновысотных облаков в условиях плавной смены времени суток и погодных условий

С.М.Козлов, Н.А.Елыков, И.В.Белаго,

Лаборатория программных систем машинной графики ИАиЭ СО РАН. Новосибирск, Россия

{smk, nicolas, bel }@sl.iae.nsk.su

Аннотация

Статья посвящена обсуждению подходов к визуализации динамических атмосферных явлений в системах реального времени, проведен анализ существующих методов отображения небосвода, эффектов атмосферного рассеяния и общей картины неба. В работе предложен алгоритм просчета эффектов рассеяния и «высоких облаков» на видеокарте с использованием «текстуры коэффициентов», формируемой на этапе подготовки, и обеспечивающей полную динамику времени суток и погодных условий в реальном времени. Кроме того, описана модель освещения, позволяющая использовать предложенный алгоритм вместе с методом визуализации облаков, основанным на системе частиц.

Keywords: skylight, atmospheric scattering, cloud rendering,

1. ВВЕДЕНИЕ

Визуализация динамических атмосферных явлений с качеством, близким к фотографическому, становится важной задачей в системах отображения реального времени. Фактически, без этого невозможна реалистичная визуализация открытых пространств. Кроме того, все чаще требуется полная динамика таких явлений при изменении погоды и времени суток. Большинство существующих методов визуализации плохо приспособлены к динамическим условиям, так как требуют сложных вычислений при изменении положения небесных источников, погодных условий и картины облачности. В работе предлагается модель реалистичной визуализации атмосферных явлений на основе комбинации двух методов – текстуры с коэффициентами ключевых параметров для «высоких» облаков и эффектов атмосферного рассеяния и облака на основе систем частиц для более низких облаков. Предложена система освещения, позволяющая интегрировать два этих метода в единую систему.

2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ПРОСЧЕТА АТМОСФЕРНОГО РАССЕЯНИЯ.

2.1 Введение.

В настоящий момент для расчета и визуализации небесного купола и эффектов атмосферного рассеяния используются следующие методы:

- Использование фотографий реального неба
- Физические модели. [1,2]
- Аналитические приближенные модели. [3,4,5]

- Рассеяние в реальном времени. [6]

Далее приводится краткий обзор этих методов, и анализ присущих им достоинств и недостатков.

2.2 Фотографии реального неба.

Одно из возможных решений – напрямую использовать фотографии реального неба, что дает картину и облаков, и небосвода. Недостатки – фотография соответствует статичной картине, и возможности для динамики крайне ограничены. Во-первых, для произвольного времени суток и произвольных погодных условий необходимо держать большое количество фотографий, во-вторых, очень плохо выглядит переход между разными фотографиями всего неба. Также разнообразие получаемых картин неба прямо зависит от количества фототекстур в наборе, что, вообще говоря, налагает существенные ограничения, в виду больших затрат памяти.

2.3 Использование физических моделей.

Физические модели расчета освещения атмосферы основаны на учете множественного рассеяния луча в атмосфере

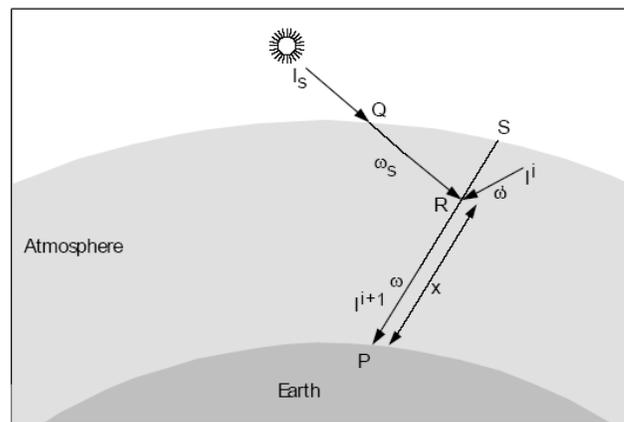


Рисунок 1. Физическая модель освещения атмосферы

Расчет цвета неба проводится в направлении ω , R – одна из точек на отрезке PS , RQ – направление солнечного света. Луч может быть поглощен на отрезке RQ , рассеивается на частице в точке R проходит расстояние RP , на котором тоже может быть поглощен (рис.1).

Количество света, дошедшего до точки P по пути QPR , выражается формулой

$$dI = E_s e^{-\beta L_{QR}} \beta(\omega, \omega_s) e^{-\beta L_{RP}} dx,$$

Где L_{AB} – оптическая длина между точками A и B , E_s – поверхностная плотность потока солнечного излучения вне атмосферы, β – суммарный коэффициент рассеяния, $\beta(\omega, \omega_s)$ – плотность рассеяния из направления ω_s в направление ω .

Всего в точку P в направлении ω приходит количество света

$$I^1(\omega) = \int_P^S E_s e^{-\beta L_{QR}} \beta(\omega, \omega_s) e^{-\beta L_{RP}} dx$$

Этот интеграл соответствует первому порядку рассеяния. Для вычисления следующих порядков вводится величина

$$S(\omega, x) = \int_0^{4\pi} I^i(\omega') \beta(\omega, \omega') d\omega',$$

соответствующая количеству света после i рассеяний, рассеянному в направлении ω в точке x со всех направлений.]

Количество света, доходящее до земли через $i+1$ рассеяний, выражается формулой

$$\begin{aligned} I^{i+1}(\omega) &= \int_S^P e^{-\beta L_{RP}} S(\omega, s) dx = \\ &= \int_S^P e^{-\beta L_{RP}} \int_0^{4\pi} I^i(\omega') \beta(\omega, \omega') d\omega' dx \end{aligned}$$

а суммарная интенсивность –

$$I(\omega) = I^1(\omega) + I^2(\omega) + \dots$$

Полученная формула может быть расширена для разных типов частиц в атмосфере, отличающихся различными β и $\beta(\omega, \omega_s)$.

Разные физические модели используют различные распределения плотности атмосферы, различные коэффициенты рассеяния, количество учитываемых порядков рассеяния и т.д. [1,2].

Даже из такого поверхностного описания моделей ясно, что они требуют огромных по сложности вычислений, и неприменимы в условиях полной динамики. Обычно использование таких моделей ограничивается предварительным расчетом нескольких картин неба для фиксированных параметров. При таком подходе этому методу присущи все недостатки использования статических текстур неба.

2.4 Аналитические приближенные модели.

Так как физические модели слишком сложны для практического использования, строятся модели, основанные не на физических законах, а на многолетней статистике наблюдений небес в различных условиях. Существуют как модели, в которых выделяются случаи ясного и полностью затянутого облаками неба [3], так и модели, в которых при разных параметрах получается небо в разную погоду [4,5].

Фактически, такие модели представляют собой некоторую аппроксимацию картины неба в зависимости от вводимых моделью параметров (к примеру, «густота», плотность, спектральные распределения и т.д.).

Такие модели все еще требуют существенных вычислительных ресурсов, но уже могут быть просчитаны в реальном времени при плавном изменении параметров, хоть и с существенными ограничениями – большим временем расчета на процессоре и необходимостью проводить расчеты маленькими порциями за большое количество кадров (сотни и тысячи).

Недостатками таких моделей являются как существенные ресурсы процессора, необходимые для расчета, так и ограниченный круг явлений, описываемых каждой моделью. Кроме того, подбор параметров для визуализации конкретной виртуальной обстановки далеко не тривиален – комбинация параметров, которая выдаст требуемые цвета в разное время суток, может быть подобрана только экспериментами с конкретной моделью. Отладка и подбор затруднены тем, что необходимо всегда следить за поведением модели во всех возможных ситуациях – изменение одного из параметров для отстройки, например, картины для одного времени суток, может привести к неожиданным изменениям в других временах.

2.5 Модели рассеяния в реальном времени.

Дальнейшее упрощение моделей рассеяния позволяет перенести вычисления на видеокарту, снимая нагрузку с процессора и обеспечивая динамику теперь уже в полноценном реальном времени.

В модели, предложенной в [6] рассматривается простейшее одиночное Mie и Rayleigh рассеяние, без попыток учета других эффектов, как в аналитических методах.

Вычисления проводятся на вершинном уровне, которого достаточно в виду плавных градиентов цвета, и позволяет учитывать эффект рассеяния луча в атмосфере для удаленных объектов.

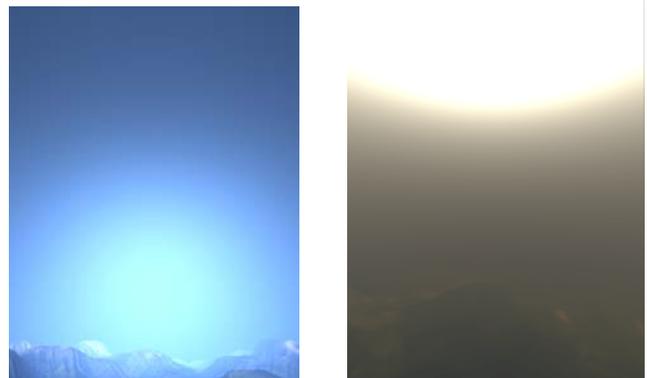


Рисунок 2. Модели просчета рассеяния в реальном времени

На рисунке показаны результаты применения этого метода. К сожалению, спектр явлений, описываемых методом, крайне ограничен и плохо применим для получения фотореалистичных изображений (рис.2.).

3. МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ АТМОСФЕРНОГО РАССЕЙНИЯ И «ВЫСОКИХ» ОБЛАКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕКСТУРЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ.

В работе предлагается новый метод визуализации описанных явлений в условиях полной динамики движения небесных светил и изменения погодных условий. Метод целиком просчитывается на видеокarte, учитывает особенности современных графических ускорителей, позволяя таким образом полностью освободить процессор от расчетов атмосферных явлений. Кроме того, метод применим как к визуализации широкого спектра различных атмосферных явлений, так и к удобству настройки под конкретное виртуальное окружение.

Описываемый метод использует особую текстуру, описывающую вклад различных составляющих результирующей картины неба. Такими составляющими являются вклад чистого неба и вклад «высоких» облаков, разделяющийся на три составляющих – освещенные части, плотные неосвещенные части, и разреженные границы облаков. Кроме того, подготавливается особая карта нормалей, задающая эффект направленности источника для освещения облаков. На рисунке 3 изображен каждый канал текстуры в отдельности, результирующая текстура и карта нормалей.

Дальнейшее описание метода в основном касается процесса отображения и зависимостей, используемых для каждой из составляющих финального изображения, В работе не рассматривается вопрос подготовки начальных данных, так как он носит скорее практический характер и является эмпирическим процессом. Тем не менее, предложенный алгоритм способен демонстрировать качество, близкое к фотореалистичному, что и показано в работе.



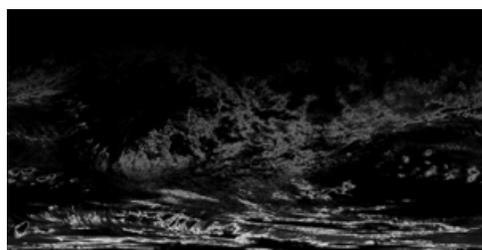
Тонкие освещенные части облаков



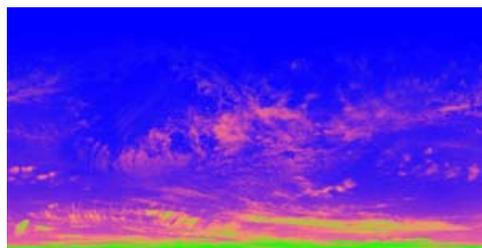
Плотные части облаков



Вклад чистого неба



Разреженные границы облаков



Результирующая текстура



Карта нормалей

Рисунок 3. Составляющие текстуры коэффициентов

Для каждого из слоев строится вершинная карта цветов.

- Для вклада чистого неба это модель, во многом похожая на [4], но с более простыми законами смешивания, адаптированными под расчет на видеокарте (аналогично [6]) и заменой формул для длин оптических волн на конкретные цвета, подбираемые на этапе подготовки.
- Для освещенных частей облака – вычисление на основе карты нормалей по законам попиксельного освещения.
- Для плотных частей облаков – градиент цветов в зависимости от направления луча (представляет собой фазовую функцию анизотропии рассеяния света на частицах облака [7])
- Разреженные граничные части облаков дают вклад с учетом дополнительной функции яркости, сконцентрированной вокруг солнца.

Далее приведены формулы для каждой составляющей.

3.1 Вклад чистого неба.

Упрощенная модель атмосферного рассеяния задается цветами источника, среднего цвета неба, цвета тумана на горизонте, и величины области вклада источника.

$$l = s \max(V \cdot S, 0)^2$$

$$h = \min\left(\frac{z}{h_{max}}, 1\right)$$

$$C = (C_{sky} h + C_{fog} (1 - h))(1 - l) + C_{sun} l$$

где C – результирующий цвет, C_{sky} – средний цвет неба, C_{fog} – цвет тумана, C_{sun} – цвет источника, h_{max} – верхняя граница тумана, z – высота вершины, s – величина области вклада источника. V – направление на вершину из камеры, S – направление источника.

Фактически, вклад источника представляет собой функцию $\cos^2(\vec{V}, \vec{S})$, представляет собой модель атмосферного рассеяния по Рейлею. Также в модели участвует вклад тумана, соответствующий изменению цвета при увеличении оптической длины пути луча.

3.2 Освещенные части облаков.

Освещение облаков приближено картой нормалей и классическими законами попиксельного освещения [8].

Солнце и луна считаются направленными источниками.

$C = C_{light}(N \cdot S')$, где C_{light} – цвет источника, N – нормаль из карты нормалей, S' – направление источника, переведенное в касательное пространство объекта.

3.3 Плотные части облаков.

Цвета для плотных частей облаков считаются подверженными закону анизотропии получения освещения для облаков, описанному в [7].

$$p(\omega) = 3/4(1 + \cos^2(\omega))$$

Эта фазовая функция используется как коэффициент интерполяции между цветами облаков на освещенной и не освещенной частях неба.

$$C = C_1(1 - p(\omega)) + C_2 p(\omega)$$

3.4 Разреженные границы облаков.

Разреженные части дают дополнительный цветовой вклад, когда находятся напротив источника.

$C = C_{light} f(\omega, l)$, где C_{light} – цвет, l – характерная величина диапазона дающих вклад ω , управляя которой можно регулировать угол, в котором участвует вклад разреженных границ.

Все описанные формулы могут быть эффективно реализованы на вертексных и пиксельных шейдерах видеокарты, что обеспечивает полную разгрузку центрального процессора и высокую производительность метода.

Каждая из цветовых карт модулируется соответствующим каналом в текстуре коэффициентов, и смешивается между собой. Ниже приведены закатные картины по солнцу и против солнца для разных погод (рис. 4)





Рисунок 4. Метод текстуры коэффициентов.

Каждая цветовая карта задается конкретными цветами и коэффициентами, близко связанными со значениями, видимыми в результате работы алгоритма, что облегчает настройку системы. Например, на основе набора фотографий реального аналога требуемой виртуальной обстановки легко построить и карту коэффициентов, и подобрать и отладить цветовые параметры, требующиеся для цветковых карт.

4. ОБЛАКА, ОСНОВАННЫЕ НА СИСТЕМАХ ЧАСТИЦ.

В предложенном подходе используются трехмерные облака, основанные на системах частиц, для создания основной

облачной картины неба. Принципы использования этого метода и его важных оптимизаций были описаны в [9], в настоящей же статье будет затронут только вопрос освещения таких облаков, с учетом интеграции алгоритма в единую систему с методом, основанным на текстуре коэффициентов.

Фактически, для облаков на основе системы частиц принципы, описанные в предыдущем методе, применимы более явно. Для каждой частицы есть в явном виде ее позиция, результат применения фазовой функции (см. пункт 3.3), количество дошедшего до нее света и так далее. Рассматриваются те же три основных цветовых фактора – рассеянное освещение в облаке, освещение на основе множественного рассеяния, и разреженные части, пересвечивающиеся источником.

Механизмы расчета цветковых карт аналогичны расчету соответствующих параметров текстурного метода, но выражены более явно.

- Для освещенных частей облака не нужно использовать приближение карты нормалей – освещение частиц явно просчитывается по законам рассеяния.
- Функции анизотропии применимы напрямую к позиции частицы.
- Разреженные части автоматически формируются при отрисовке облака.

На рисунке 5 показано освещение таких облаков в различных условиях.



Рисунок 5. Модель освещения трехмерных облаков.

5. КАРТА ОБЛАЧНОСТИ.

Кроме визуализации неба и отдельных облаков, важен также механизм формирования групп облаков, плавной смены погоды и облачности, появления и исчезновения облаков и т.д.

В описываемой модели эти задачи решаются с помощью задания глобальной карты распределения облаков, которая может быть получена как снимок реальной облачности, нарисована художником для конкретной системы визуализации или создана процедурными методами

(например, фракталами). Карта облачности не участвует в фактической визуализации, а задает общие границы групп облаков и изменения погоды в сцене.

С учетом имеющегося набора форм облаков по этой карте генерируются конкретные экземпляры облаков, погодные условия в сцене вычисляются фильтрацией карты облачности в определенном радиусе порядка нескольких километров.

Такая схема позволяет погоде плавно меняться по ходу времени и движения в сцене, обеспечивает естественную смену облаков на небе и разнообразие возможных картин облачности и небесного купола.

Возможным дополнением может являться задание карты ветров, которая воздействует на изменение карты облачности и движение облаков.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ.

Реалистичное отображение облаков и небесного купола – необходимая задача при разработке систем визуализации реального времени для открытых пространств. Существующие модели расчета эффектов атмосферного рассеяния либо непригодны для использования в реальном времени из-за огромного объема вычислений, либо налагают серьезные ограничения на разнообразие описываемых явлений и требуют существенных ресурсов.

В работе предложена аналитическая модель расчета атмосферного рассеяния основанная на использовании текстуры ключевых коэффициентов, которая включает в себя визуализацию «высоких» облаков. Достоинства предложенной модели заключаются в высоком быстродействии, приспособленности к возможностям современных видеокарт, возможностях прозрачной настройки параметров для конкретного виртуального окружения.

Кроме того, предложена общая модель освещения разных типов облаков, которая позволяет использовать облака, основанные на системах частиц, вместе с предложенным алгоритмом визуализации высоких облаков, использующим текстуру коэффициентов.

Система, реализованная на основе приведенных методов, демонстрирует скорость генерации кадра около 10 мсек на системе Pentium 4 2.4 Ghz, Geforce 5900 256 mb в наиболее сложном по вычислениям варианте (небо, целиком затянутое облаками), эта скорость вполне приемлема в многих системах визуализации реального времени.

В настоящее время система используется в компьютерной игре «Дальнобойщики 3» и системе визуализации профессионального авиатренажера.

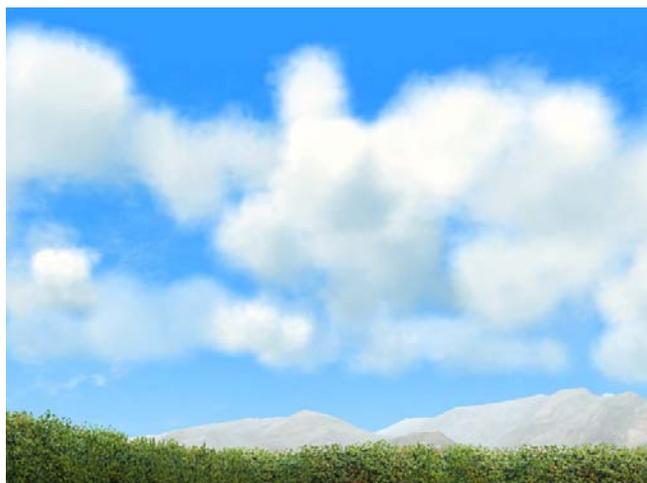
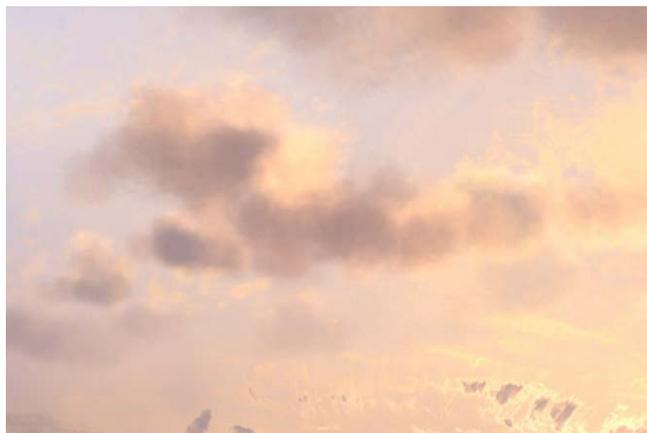




Рисунок 6. Результаты.

An approach to high realistic multi-layer cloud rendering in dynamic day time and weather conditions.

Abstract

The article discusses rendering of complex dynamic atmospheric effects in real-time visualization systems. Based on the analysis of the modern approaches for skylight and scattering effects, the authors propose an algorithm for rendering such effects entirely on videocard using static "layer map" to build a completely dynamic skydome picture. Also, article discusses lighting model for the particle-based cloud rendering that allows integrating it with the proposed algorithm.

Keywords: skylight, atmospheric scattering, cloud rendering,

7. REFERENCES

- [1] Kaneda K., Okamoto T., Nakame E., Nishita T., "Photorealistic image synthesis for outdoor scenery under various atmospheric conditions", *The Visual Computer*, 1991
- [2] Nishita T., Dobashi Y., Kaneda K., Yamashita H., "Display method of the sky color taking into account multiple scattering", *In Pacific Graphics*, 1996.
- [3] CIE-110-1994. Spatial distribution of daylight - luminance distributions of various reference skies. *Tech. Rep., International Commission on Illumination*, 1994
- [4] Perez, R., Seals, R., Michalsky, J., "All weather model for sky luminance distribution - preliminary configuration and validation", *Solar Energy*, 1993
- [5] Preetham, A.J., Shirley, P., Smits, B.E. "A practical analytical model for daylight", *In Proceedings of Siggraph*, 1999.
- [6] Hoffman, N., Preetham, A. "Rendering outdoor light scattering in real time", *Game Developers Conference*, 2002.
- [7] Harris M., Lastra A., "Real-Time Cloud Rendering", *Eurographics '2001*, 2001
- [8] Everitt C., "Mathematics of Per-Pixel Lighting Mathematics of Per-Pixel Lighting", *Tech. Note*, 2001
- [9] Елыков А., Белого И., Козлов С., Кузиковский С., Лаврентьев М., "Практическая модель динамических атмосферных явлений при визуализации открытых пространств в системах визуализации реального времени", *Графикон*, 2004.

Об авторах:

Все авторы работают в лаборатории - Программных систем машинной графики ИАиЭ СО РАН.

e-mail:

С.М. Козлов - smk@sl.iae.nsk.su

Н.А. Елыков - nicolas@sl.iae.nsk.su

И.В.Белого - bel@sl.iae.nsk.su

About the authors:

Kozlov Semyon - Institute of Automation and Electrometry SB RAS E-mail: smk@sl.iae.nsk.su

Elykov Nikolay - Institute of Automation and Electrometry SB RAS. E-mail: nicolas@sl.iae.nsk.su

Belago Igor- Institute of Automation and Electrometry SB RAS. E-mail: bel@sl.iae.nsk.su