

УДК 629.78; 630.52:587/588

И. М. ДАНИЛИН*, М. Н. ФАВОРСКАЯ**

*Институт леса СО РАН, г. Красноярск

**Сибирский государственный аэрокосмический университет, г. Красноярск

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТНЫХ СЦЕН НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Лазерная локация, совмещенная с цифровой аэрофотосъемкой, является приоритетным направлением для таксации и мониторинга лесных земель. Данное направление опирается на современные технологии цифровой фотограмметрии и геоинформационных систем, а также методы цифровой обработки и моделирования многомерных отраженных сигналов. Одной из основных задач этого направления при таксации леса является трехмерное моделирование структуры леса и рельефа местности. Существующие системы трехмерного моделирования земных поверхностей не учитывают специфики моделирования лесного покрова. Предлагаемые в настоящей статье подходы и вычислительные алгоритмы позволяют адекватно воспроизводить фрактальную текстуру земных покровов и лесной растительности на основе данных лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки, при необходимости выполнять визуализацию природных эффектов (наложение снежного покрова, дождя, тумана), а также моделировать режимы освещенности сцен лесных ландшафтов.

Ключевые слова: *лесная ландшафтная сцена, освещенность, моделирование.*

Laser ranging, combined with digital aerial photography, constitutes a priority line of inquiry dealing with forest land valuation and monitoring. This avenue of investigation builds upon state-of-the-art technologies of digital photogrammetry and geoinformation systems as well as upon digital processing and modeling techniques for multidimensional reflected signals. A primary goal of this research area in forest valuation involves a three-dimensional modeling of the forest structure and topography. The existing three-dimensional modeling systems for land surface fail to account for the specific character of modeling of forest cover. We suggest approaches and computational algorithms enabling an appropriate reproduction of fractal textures of land covers and forest vegetation, based on data from laser ranging and digital aerial photography, a visualization (where necessary) of natural effects (superposition of snow cover, rain and fog) as well as a modeling of illumination modes of forest landscape scenes.

Keywords: *forest landscape scene, illumination, modeling.*

ВВЕДЕНИЕ

Комплексное ландшафтное моделирование лесных земель является одним из важнейших направлений географических исследований, позволяющих оценивать морфологические показатели лесных ландшафтов и древостоев, прогнозировать динамику их развития и геоэкологических ситуаций при воздействии внешних природных и антропогенных факторов. Построение лесных ландшафтных сцен предполагает обработку двух типов синхронизированных данных — данных лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки, и выполняется в виде последовательных этапов, каждый из которых является сложной задачей моделирования.

На первом этапе выполняется построение цифровой модели рельефа (ЦМР) участка земной поверхности на основе данных лазерной локации [1, 2]. В современных географических информационных системах (ГИС) используется несколько типов ЦМР в зависимости от формы представления данных: с регулярным расположением точек на прямоугольных, треугольных и гексагональных сетках; с нерегулярным представлением точек; с изолинейным заданием точек, равномерно расположенных на изолиниях или с учетом их кривизны. Для построения трехмерных моделей рельефа применяются методы интерполяции на основе минимальной кривизны, ближайшего окружения, триангуляции Делоне, регрессионных зависимостей, сферических сплайнов и т. д.

На втором этапе происходит текстурирование ЦМР (построение нижнего яруса лесной растительности), а также осуществляется визуализация деревьев (верхний ярус) с использованием данных как лазерной локации, так и цифровой аэрофотосъемки [3].

На третьем этапе реалистичность созданной 3D ландшафтной модели достигается за счет «наложения» таких природных явлений, как дождь, туман, снег, моделирование дневной освещенности и

т. п. [4]. Вместе с тем следует отметить, что на сегодня не существует программного продукта, который бы отвечал всем требованиям комплексного ландшафтного моделирования лесных земель по данным лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки.

В статье обсуждается комплексный подход реалистичного трехмерного воспроизведения структуры лесного покрова и топографии земной поверхности с визуализацией природных эффектов и режимов освещенности с использованием современных технологий компьютерного 3D моделирования в разработанном программном комплексе «Forest Modeling».

ОБЗОР МЕТОДОВ И СИСТЕМ ЛАНДШАФТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наиболее распространенным векторным методом интерполяции рельефа земной поверхности является триангуляция Делоне. Этот метод вызывает артефакты и из-за невозможности получения производных различных порядков аппроксимируемых поверхностей не обеспечивает выделение конкретных форм земной поверхности с характерными геоморфологическими параметрами. Однако в данной задаче такие ограничения не играют существенной роли, так как не требуется точного воспроизведения поверхности произрастания лесной растительности.

Метод «сферической квадроангуляции» позволяет создавать математическое описание рельефа, наиболее приближенное к реальной действительности, и идентифицировать известные типы поверхностей и структурных линий. Метод активно используется в 3D картографии. Базовой единицей описания является математическая модель элементарной поверхности, выделяемая по геоморфологическим параметрам [5]. В пределах элементарных поверхностей в заданных интервалах неизменными являются крутизна, экспозиция, протяженность, форма склонов и их морфологические характеристики, обуславливающие процессы перемещения водных, воздушных масс, климатических факторов. Однако в данной постановке задачи такая точность визуализации является излишней.

На рынке программного обеспечения имеются продукты, позволяющие выполнять автоматическое создание 3D моделей по данным лазерного сканирования, например «TreesVIS» (ФРГ), «Altexis», «ОРТОЛАЗЕР» (РФ), «EdgeWise», «Geokosmos 3D Modeler» (наземное и воздушное лазерное сканирование), однако визуализация 3D ландшафтных объектов в них не производится. В лучшем случае осуществляется замена объекта упрощенной 3D геометрической моделью кроны деревьев (в виде шара для широколиственных деревьев, в виде конуса для хвойных пород).

Для придания естественного вида на созданные ЦМР необходимо наложить «текстуры» — графические изображения, которые передают структуру, цвет и фактуру моделируемого объекта. Метод текстурирования «тайлами» получил широкое распространение в компьютерной области из-за очевидных достоинств: простоты и невысокой требовательности к вычислительным ресурсам компьютера. Суть данной технологии заключается в том, что участок полигональной сетки покрывается текстурными фрагментами — тайлами (tile) или наборами тайлов — тайлсетами (tileset). Для создания новой текстуры на основе уже существующих, формирования плавных переходов между ними и полупрозрачных текстур используется алгоритм альфа-смешивания (alpha-blending), при котором можно регулировать уровень прозрачности изменением значения альфа-канала текстуры.

Текстуры накладываются на объект с помощью так называемых текстурных координат. Для каждой вершины минимального текстурного полигона определяются текстурные координаты и привязываются к некоторой области на текстурированном объекте в разработанном нами программном комплексе «Forest Modeling». Создание 3D моделей деревьев, кустарников, так же как и моделирование природных явлений, предполагает использование специфических приемов имитационного моделирования. Эти два направления широко применяются в симуляторах, компьютерных играх [2, 4].

МОДЕЛИРОВАНИЕ 3D ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

Информация, получаемая лидарами, включает сведения о непроницаемых и частично проницаемых объектах. Лесной покров в нашем случае считается частично проницаемым объектом. При лазерной и цифровой аэросъемке местности возможно получение точек рельефа земной поверхности под пологом леса, на основе которых вначале строится, а затем интерполируется и визуализируется трехмерная топографическая поверхность [1–4, 6–9].

Данные лазерной локации представляются в виде облака точек с геодезическими или географическими координатами, привязанными к местности. Такое облако обладает определенными характеристиками (равномерность распределения точек, минимальное и максимальное поперечное и продольное расстояние между точками), которые могут настраиваться путем подбора параметров полета и выполнения съемки. Лазерный луч расширяется по мере распространения в воздушной среде, в связи с чем он отражается от непроницаемых преград не точно, а в виде пятна. При наличии частично проницаемых препятствий лазерные данные могут содержать несколько точек отражения одного лазерного импульса [1, 2].

Самый простой способ представления ЦМР — использование набора трехмерных лазерных точек. Для этого применяются алгоритмы, аналогичные моделированию на основе других примитивов. Для уточнения модели рельефа в дополнение к набору трехмерных точек могут загружаться структурные линии. Цифровая модель рельефа может быть представлена в виде регулярной и нерегулярной сеток. В первом случае массивом исходных данных является матрица высот — цифровое картографическое представление поверхности Земли в виде регулярной сетки значений высот. Высоты записываются в узлах матрицы, положение которых отсчитывается от некоторой начальной точки на местности через равные интервалы вдоль осей OX и OY . Во втором случае (при использовании нерегулярной сетки) применяется триангуляционная нерегулярная сеть TIN (Triangulated Irregular Network). Высоты нерегулярной матрицы записываются в узлах, имеющих координаты (x, y) , расстояние между которыми изменяется. Цифровая модель рельефа может быть сгенерирована непосредственно из исходных данных, например при использовании регулярной матрицы (квадратной сетки), регулярных треугольников, или через триангуляцию в случае беспорядочно расположенных данных.

Также нетривиальная задача — это разделение первичных и вторичных лазерных импульсов из обширного облака точек. Такое облако точек содержит не только точки поверхности земли, но и точки разнообразных растительных объектов (деревья, кустарники, травяной и мохово-лишайниковый покров) и их совокупностей.

Нами разработан и предлагается гибридный подход, когда для некоторой области сетки формируется нерегулярное триангуляционное представление, а для более точного описания сложного участка триангуляционной модели выполняется вставка данных из регулярной матрицы, полученных на основе аппроксимации. Реализацию метода можно представить в виде четырех основных этапов. На первом этапе происходит формирование первичной выборки трехмерных точек. Выборка осуществляет отбор всех существенных точек поверхности анализируемого лесного участка на плоскости XOY . Существенные точки должны обладать минимальными значениями по шкале высот.

На втором этапе для однородно распределенных точек из первичной выборки формируются квадратные сеточные структуры, обладающие интерполированными (аппроксимированными) значениями, и вторичная выборка точек из облака. На третьем этапе на основе полученного пространства точек второй выборки и первичной поверхности производится модификация модели с использованием триангуляции Делоне [3]. В ходе выполнения четвертого этапа производится доводка модели путем вставки дополнительных кривых описания, максимального разрежения модели для выполнения условий заданной точности и увеличения плотности в наиболее проблемных участках рельефа. Существенным моментом является ускорение работы алгоритмов за счет распараллеливания или локальных упрощений, незначительно снижающих качество получаемых ЦМР.

ТЕКСТУРИРОВАНИЕ ЦМР

Процесс синтеза оптических (цифровых аэрофотосъемочных) и радиолокационных изображений относится к области обратных задач. При этом необходимо решить, как по заданным значениям признаков синтезировать изображение земного покрова, соответствующие статистики которого будут близки к характеристикам аналогичного изображения естественной поверхности. Существует несколько подходов к решению задач синтеза текстурных полей — на основе моделей Юлеша, линейного программирования, авторегрессионных рядов, условных математических ожиданий, а также теории фракталов.

Моделирование текстур на основе теории фракталов. В большинстве случаев изображения земной поверхности обладают значительной неоднородностью и разнообразием. В связи с этим достаточно трудно сопоставить фрактальную модель броуновского движения с такими изображениями. В качестве адекватной модели предлагается в ряде случаев использовать фрактальную модель движения Леви

[10]. В ее основе лежит симметричное стационарное α -распределение приращений яркости. Однако синтез текстуры по модели Леви требует подбора характеристических параметров и обладает высокой вычислительной сложностью.

Предлагаемый нами подход синтеза реалистичного изображения основан на том, что каждой точке изображения смоделированной поверхности $p(x, y)$ сопоставляется значение, основанное на гауссовом распределении $p'(x, y, z)$ без учета координаты z , имеющей небольшую величину:

$$p'(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где σ^2 — среднеквадратичное отклонение.

Рассмотрим решетку $N \times N$ равномерно расположенных точек в квадрате с линейным размером L . Данные N^2 точек обозначим через h_{nm} , причем значения n и m определяют их расположение по направлениям OX и OY соответственно. Выполним двумерное дискретное Фурье-преобразование массива h_{nm} от N^2 точек данных. Массив $N \times N$ комплексных коэффициентов H_{st} определяется как

$$H_{st} = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} h_{nm} \exp\left[-\frac{2\pi i}{N}(sn + tm)\right], \quad (2)$$

где s — преобразование в направлении x ($s = 0, 1, 2, \dots, N - 1$); t — преобразование в направлении y ($t = 0, 1, 2, \dots, N - 1$).

Используя преобразование (2), получаем набор двумерных коэффициентов Фурье H_{st} из данного набора N^2 случайных значений. Известно, что статистически изотропные поверхности при фиксированном масштабе имеют пространственный спектр фрактального вида, который является степенной зависимостью от волнового числа [10]. В то же время каждый коэффициент преобразования H_{st} определяется радиальным волновым числом $K_{st} = (s^2 + t^2)^{1/2}$. Находим значения фрактальной размерности D одним из известных методов (метод покрытия эталонами, метод дисперсионного масштабирования, метод оценки мощности процесса). Новый набор комплексных коэффициентов рассчитывается как $H_{st}^* = H_{st} / K_{st}^{\alpha/2}$, где спектральный параметр $\alpha = 2H + 1$, H — показатель Херста, связанный с фрактальной размерностью D ($D = 3 - H$) [10]. Затем с помощью обратного Фурье-преобразования получаем новое синтезированное изображение.

Примеры синтезированных лазерно-локационных изображений при $D = 2,6$ выглядят достаточно реалистично в формате топографического представления данных отображения рельефа лесной территории (при истинном значении фрактальной размерности $D = 2,586$) (рис. 1).

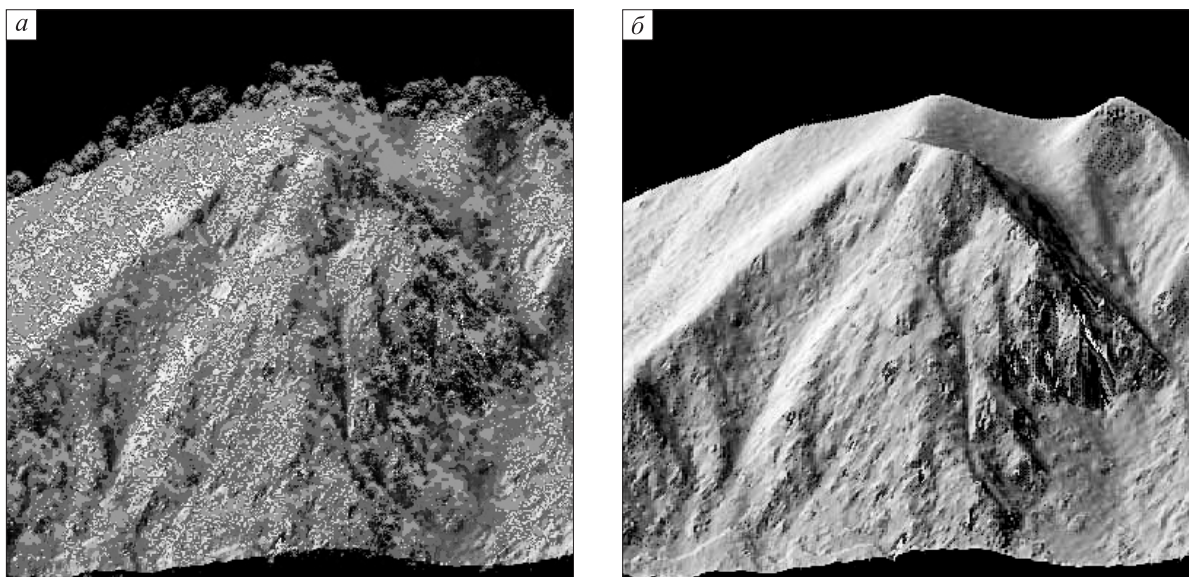


Рис. 1. Синтезированные лазерно-локационные изображения лесного покрова (а) и рельефа местности, «очищенного» от лесной растительности (б), в формате представления лесорастительных и топографических данных программного комплекса Altaxis 2.0 [2].

Статистическое моделирование текстур. В нашем случае требуется решить достаточно сложную задачу синтеза ландшафтных текстур, когда большие текстурные области создаются из небольших текстурных фрагментов. Сложность заключается в том, что к точкам поверхности должны быть привязаны элементы текстурных карт. Положение объекта, близкое к наблюдателю (текстура поверхности видна с высоким разрешением), требует высокого разрешения текстурной карты. Проблема заключается в «стыковке» текстурных фрагментов друг с другом, для чего используются статистические методы дополнения пропущенных пикселей. Пропущенные пиксели вычисляются с применением равномерной случайной выборки из окружающего набора. Критерием сходства текстуры с пропущенными пикселями с эталонной текстурой может служить сумма квадратов разностей яркостей пикселей, не превышающая некоторого порогового значения.

В общем случае текстурируемые поверхности не являются цилиндрическими или сферическими. Для наложения текстуры на объекты произвольной формы применим метод двухступенчатого отображения. На первом шаге двумерная область текстуры отображается на простую трехмерную промежуточную поверхность, например, цилиндрическую (*S-mapping*):

$$T(u, v) \mapsto T'(x_i y_i z_i). \quad (3)$$

На втором шаге полученная трехмерная текстура проецируется на поверхность объекта (*O-mapping*):

$$T'(x_i y_i z_i) \mapsto O(x_i y_i z_i). \quad (4)$$

Комбинация этих операций позволяет текстурировать объекты «естественным» способом. В качестве промежуточной поверхности предлагается использовать произвольно ориентированную плоскость, кубическую, цилиндрическую или сферическую поверхности, выбор одной из которых зависит прежде всего от геометрической формы поверхности текстурируемого объекта. Также реализованы несколько вариантов операции *O-mapping*: при пересечении отраженного от поверхности объекта луча и промежуточной поверхности T' ; при пересечении нормали к поверхности в точке (x, y, z) с поверхностью T' ; при пересечении линии, проходящей через точку (x, y, z) и центр тяжести объекта, с поверхностью T' ; при пересечении линии, идущей из точки (x, y, z) к поверхности T' , ориентация которой задается нормалью к поверхности T' в точке (x_i, y_i, z_i) .

Достоинствами подхода являются относительная простота текстурирования и малое количество текстур, что, соответственно, дает значительную экономию объема данных. Тем не менее ограниченное количество текстур иногда не позволяет воссоздать нужный текстурный рисунок. Фрактальный синтез текстуры, рассмотренный выше, позволяет скомпенсировать указанные недостатки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Одной из самых сложных задач в трехмерной графике является имитация природных объектов. В отличие от промышленных, форма объектов естественного происхождения редко имеет ровные края и характеризуется геометрическими примитивами. Так, для получения фотореалистичного изображения ландшафта требуется воспроизвести множество деталей с тщательно проработанными поверхностями (системность), однако при этом необходимо привнести и фрактальность. Природный ландшафт изобилует деталями, но все их многообразие сводится к различным комбинациям растений, деревьев и камней, расположенных на различных видах почвы. Лес представляет собой некое множество деревьев, обычно нескольких типов, а его разнообразие достигается за счет варьирования типов и форм деревьев, другой лесной растительности.

Известны два типа математических моделей пространственно-временной динамики леса, объясняющих возникновение неоднородного пространственного распределения и неустойчивости характера роста деревьев. Первый подход является аналитическим и строится на основе системы интегрально-дифференциальных уравнений. При построении данной модели учитывается взаимодействие растений, расположенных вблизи друг от друга и оказывающих влияние как на увеличение биомассы (например, новая поросль), так и на ограничение ее роста, вызванное конкуренцией за ресурсы, необходимые для жизнедеятельности (в первую очередь за свет).

Второй подход представляет собой имитационную компьютерную модель динамики сообщества древесных лесных растений. Моделирование динамики древостоя складывается из моделирования роста каждого дерева, входящего в его состав, при этом учитывается его пространственное расположение и влияние со стороны окружающих деревьев. В наших разработках был использован второй

подход моделирования как требующий минимальных компьютерных ресурсов. Моделирование деревьев (с точки зрения создания виртуальной реальности) выполняется на основе L-систем, но с учетом фактора стохастичности, имитирующего жизненный цикл природного объекта [11]. Реализованы процедуры роста и дегенерации широколиственных растений с учетом сезонных факторов и природных явлений (ветер, освещенность).

ИМИТАЦИЯ ПРИРОДНЫХ ЭФФЕКТОВ В 3D СЦЕНЕ

Имитация природных эффектов подразумевает использование различных технологий визуализации в зависимости от выбранного эффекта [4]. Для примера рассмотрим две технологии — имитация тумана и дождя в 3D сцене, которые реализованы в нашем программном продукте. Современные технологии нанесения тумана на изображение учитывают удаленность затуманенных объектов от наблюдателя, а также степень густоты тумана — редкий, средний, густой. Известны два способа имитации тумана: с использованием «выбеливания» цветовых компонент функции, описывающей изображение, и генерация текстур на основе шума Перлина. В нашей работе используется комбинированный метод, на первой стадии выполняющий «выбеливание» цветов, на второй стадии создающий эффект нечеткости и размытости на основе шума Перлина.

Обозначим цветовую характеристику пикселя $p(x, y, z)$ как C_{in} , которая разбивается на две составляющих: C_{const} — постоянная часть цветовой характеристики, переходящая в выходное значение C_{out} , и C_{fog} — часть цветовой характеристики, отвечающая за степень густоты тумана, причем $C_{in} = C_{const} + C_{fog}$. «Выбеливание» цветов происходит за счет входного параметра — «туманного фактора» K_{fog} по линейному закону:

$$C_{out} = K_{fog} \cdot C_{in} + (1 - K_{fog}) \cdot C_{fog}. \quad (5)$$

Отметим, что «туманный фактор» может вычисляться по экспоненциальному закону, по квадратичной экспоненте или по линейной зависимости.

Природные эффекты не являются статическими явлениями, их поведение имеет стохастический характер. Так, туман может изменять форму из-за изменения своей плотности и благодаря ветру и непостоянству воздуха. Поэтому функция генерации шума хорошо описывает данное явление. Входными параметрами такой функции могут быть двух- или трехмерные координаты в пространстве, а результатом являются псевдослучайные величины плотности тумана на этих координатах. Шум, сгенерированный такой функцией, имеет большую частоту и, следовательно, отображает резкие изменения между контрастными значениями, что не типично для распределения плотности тумана. Поэтому он должен быть скомпенсирован смягчающим шумом, созданным путем интерполяции некоторых заданных начальных значений. Метод генерации такого шума был предложен К. Перлином [12]. Основная идея заключается в суммировании нескольких шумовых составляющих с различными частотами и амплитудами (в соответствии с формулой Перлина), в результате чего вычисляется турбулентность $turbulence(p)$ в точке p сцены:

$$turbulence(p) = \sum_{i=0}^{N-1} noise_i(p)/2^i, \quad (6)$$

где $noise_i(p)$ — i -я функция плотности тумана в точке p двух- или трехмерной сцены.

Для достижения максимальной реалистичности генерируется несколько отдельных изображений с разной степенью увеличения шумовой картины, сглаженных при помощи интерполяции. При их суммировании создается общий шум. Большое число таких изображений дает более детализированный шум, что и позволяет создать эффект размытости при наложении эффекта тумана на изображение. В результате достигается распределенная неоднородная плотность тумана. Именно такой подход позволяет достичь максимально реалистичного «наложения» тумана на изображения. Совместно с «туманным фактором» получаются достаточно реалистичные слои тумана с видимым увеличением расстояния от наблюдателя.

Реалистичная имитация капель дождя с отраженным светом и изменением размера в зависимости от удаленности от наблюдателя является сложной проблемой, так как капли изменяют свою форму во время движения. Из-за этих изменений луч, отраженный от капли, и луч, проходящий сквозь каплю, будут изменять свое положение относительно наблюдателя или камеры. Часто предполагается, что капля имеет простую форму треугольника или эллипса, а блик капли является постоянным и неподвижным [13].

В настоящей работе используется алгоритм визуализации капель дождя с учетом отраженного света и изменения размера капли во время движения, также используется заранее созданная база данных капель, которые модифицируются по желанию пользователя. Форма капель создается по принципу наложения колебательных моделей, а колебательные свойства падающей капли описываются следующим уравнением:

$$r = [t, \Theta, \Psi], \quad (7)$$

где r — расстояние точки на капле от ее центра; Θ , Ψ — углы падения относительно координатных осей в плоскости XOY и плоскости XOZ соответственно (ось OZ направлена на наблюдателя); t — время.

Изменения формы капель во время падения вызваны аэродинамическими законами и поверхностным натяжением. Колебательная модель капли составляется из двух моделей: исходной и преобразованной. Интересным является тот факт, что падение капли не имеет четко определенной траектории движения, в частности по горизонтали. Вид капли зависит и от ее размеров, и от степени удаленности от видеокамеры. Нами использован простой алгоритм реализации наложения эффекта дождя на статическое изображение, который заключается в перерисовке капель различных размеров на изображении. Используются капли размером 2×46 пикселей и капли размером 1×24 пикселя, сохраненные в файле формата *.png, что позволяет применить эффект прозрачности капли на фоне исходного изображения. Капли разных размеров перерисовываются на выбранном изображении в тысяче разных мест. Таким образом, имитация эффекта дождя максимально приближена к реальности за счет малого размера капель, поддержки эффекта прозрачности за счет формата изображения капель и их большого количества.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕСНОЙ ЛАНДШАФТНОЙ СЦЕНЫ С УЧЕТОМ ОСВЕЩЕННОСТИ

При реалистичном моделировании поверхности земли и лесной растительности возникают две категории задач, для реализации которых применяются принципиально различные алгоритмы: задачи моделирования равномерной освещенности естественных сцен и задачи имитации солнца и прямого солнечного света на изображении в разных временных диапазонах (восход, полдень, закат). В случае равномерной освещенности сцены общепринятым является подход размещения нескольких неярких точечных источников. При этом от каждого источника света исходит бесконечное множество лучей, часть которых рассеивается в свободном пространстве, а другая часть попадает на объекты. Такие лучи отражаются, поглощаются и преломляются в зависимости от структуры реальных физических объектов, соответственно возникает множество вторичных лучей. Метод, моделирующий процесс прохождения лучей от источника света до некоторой точки сцены, называется прямой трассировкой лучей.

Метод обратной трассировки лучей, когда лучи трассируются в обратном направлении от наблюдателя к источнику света, был предложен Уиттедом и Кеем. Вначале строится первичный луч обратной трассировки через центр схода лучей на некотором расстоянии от плоскости проецирования (например, экрана монитора) и через текущий пиксель плоскости проецирования. Если луч попадает на один или несколько объектов сцены, то выбирается ближайшая точка пересечения. Затем рассчитывается цвет пикселя изображения с учетом свойств объекта и излучения от других источников.

Нами предложена следующая модификация метода обратной трассировки лучей. Изображение разбивается на блоки (в наших экспериментах блок составляет 16×16 пикселей), затем последовательно анализируются блоки, которые пересекает проекция луча на плоскость XOY (в порядке их удаления от наблюдателя). Для каждого блока можно определить, имеется ли пересечение луча с поверхностью в этом блоке или такое пересечение отсутствует. Трассировка текущего луча прекращается, если найдено первое пересечение. При пересечении луча с поверхностью строятся вторичные лучи (отраженный луч и преломленный луч), для которых также выполняется трассировка. Для того чтобы определить, пересекает ли заданный луч поверхность рельефа, а также координаты точки пересечения луча с ландшафтным объектом, необходимо знать высоту поверхности рельефа в любой точке. Поскольку при моделировании трехмерной поверхности достоверно определены координаты точек лазерной локации и проведена интерполяция поверхности, эти данные известны.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанный программный комплекс «Forest Modeling» состоит из четырех основных модулей: модуля проектирования трехмерных поверхностей, модуля природных объектов, модуля визуализации природных эффектов и модуля освещенности сцены [14]. *Модуль проектирования трехмерных поверхностей* позволяет создавать, редактировать и сохранять карту рельефа местности с использованием данных лазерной локации. Имеются функции интерполяции карты и наложения фрактальной текстуры, отображающей лесную растительность. *Модуль природных объектов* включает моделирование отдельных деревьев и моделирование сообщества деревьев с учетом факторов, влияющих на их взаимный рост и дегенерацию. *Модуль визуализации природных эффектов* позволяет пользователю выбирать тип эффекта и настраивать его параметры для выбранной сцены. Основными моделируемыми природными эффектами являются наложение тумана, дождя, снежного покрова. *Модуль освещенности сцены* позволяет задавать и изменять положения и свойства источников света и виртуальной камеры (фокусное расстояние и направление обзора, а также максимальную дальность трассировки лучей), а также настраивать свойства поверхностей ландшафтных объектов.

Для разработки программного продукта выбрана среда «Borland Delphi 7». Главным критерием выбора среды стало наличие мощного графического движка «GLScene», позволяющего быстро и качественно разрабатывать 3D сцены. «GLScene» — графический движок, написанный для использования на языке программирования Object Pascal и использующий библиотеку «OpenGL» в качестве интерфейса программирования приложений.

С помощью разработанного программного комплекса нами проведены эксперименты по моделированию лесных ландшафтов, прогалин, водотоков. На основе набора точек лазерной локации строилась трехмерная лесная ландшафтная сцена, к которой затем применялись различные варианты визуализации природных эффектов и режимов освещенности. В общей сложности сгенерировано около 200 лесных ландшафтных модельных сцен (рис. 2).

Таким образом, результаты экспериментов, проведенных с помощью разработанного программного комплекса, показали работоспособность и эффективность основных алгоритмов. Вместе с тем установлено, что реалистичное воспроизведение лесных ландшафтных сцен требует значительных временных затрат и нуждается в распараллеливании сложных вычислительных процессов в будущем.

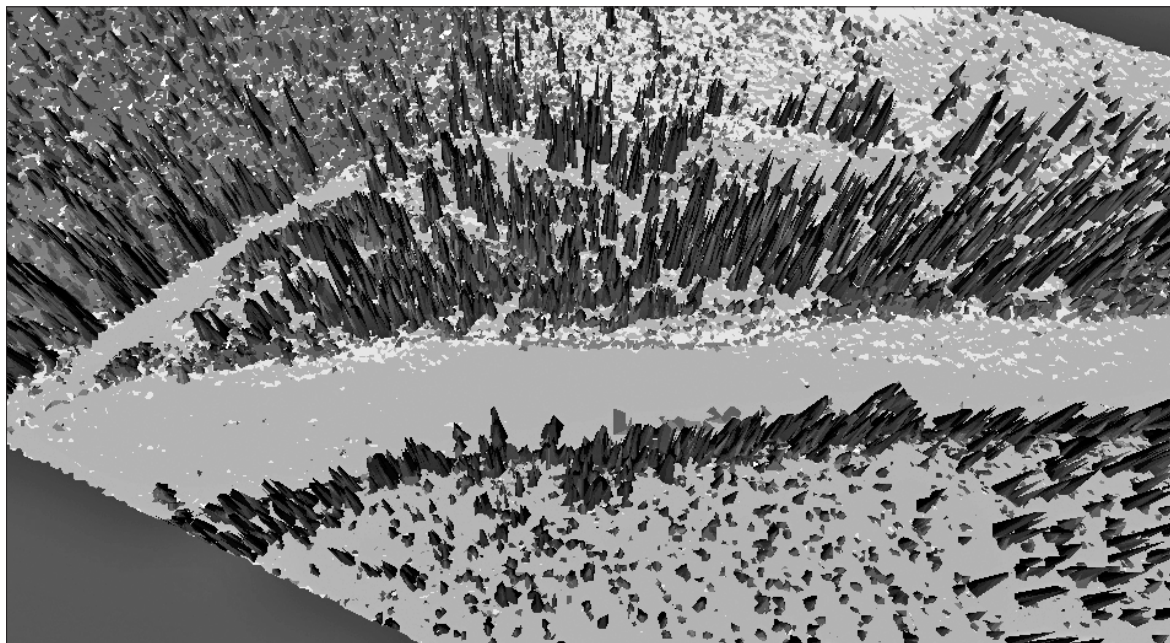


Рис. 2. Трехмерная полигональная модель сцены лесного ландшафта с отображением природного эффекта «освещение в полдень» в формате представления данных программного комплекса «Forest Modeling».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин И. М., Медведев Е. М. Технология мониторинга и инвентаризации лесных ресурсов на основе лазерной локации, цифровой аэрофотосъемки и спутникового геопозиционирования (Technology for monitoring and inventory of forest resources based on laser location, digital aerial photography and satellite geopositioning) // Журн. Сиб. федер. ун-та. Серия «Техника и технологии». — 2011. — Т. 4, № 3. — С. 326–336 (на англ. яз.).
2. Медведев Е. М., Данилин И. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса: Учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Геокосмос; Красноярск: Изд-во Ин-та леса СО РАН, 2007. — 229 с.
3. Korpela I. 3D treetop positioning by multiple image matching of aerial images in a 3D search volume bounded by LIDAR surface models // Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. — 2007. — Vol. 1. — S. 35–44.
4. Favorskaya M. N., Zotin A. G., Danilin I. M., Smolentseva S. N. Realistic 3D-modeling of forest growth with natural effect // Advances in Intelligent Decision Technologies: Proc. Second KES Int. Symp. IDT 2010. Smart Innovation, Systems and Technologies. — Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. — Vol. 4. — P. 191–199.
5. Шикин А. В., Боресков А. В. Компьютерная графика. Полигональные модели. — М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2001. — 464 с.
6. Wulder M. A., Han T., White C. J. et al. Integrating profiling LiDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization // Remote Sensing of Environment. — 2007. — Vol. 110. — P. 123–137.
7. Straub C., Dees M., Weinacker H., Koch B. Using airborne laser scanner data and CIR orthophotos to estimate the stem volume of forest stands // Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. — 2009. — N 3. — S. 277–287.
8. Gatzliolis D., Fried S. J., Monleon V. S. Challenges to estimating tree height via LiDAR in closed-canopy forests: a parable from Western Oregon // Forest Science. — 2010. — Vol. 56, N 2. — P. 139–155.
9. Suvanto A., Maltamo M. Using mixed estimation for combining airborne laser scanning data in two different forest areas // Silva Fennica. — 2010. — Vol. 44, N 1. — P. 91–107.
10. Потапов А. А., Пахомов А. А., Никитин С. А., Гуляев Ю. В. Новейшие методы обработки изображений. — М.: Физматлит, 2008. — 496 с.
11. Чунина А. А., Данилин И. М. Анализ подходов к моделированию лесной растительности // Материалы XV Междунар. науч. конф. «Решетневские чтения». В 2 ч. — Красноярск, 2011. — Ч. 2. — С. 646–647.
12. Perlin K. An image synthesizer // SIGGRAPH, 1985. — P. 287–296.
13. Garg K., Nayar Sh. K. Photorealistic rendering of rain streaks. ACM SIGGRAPH. 2006. — Vol. 25, N 3. — P. 996–1002.
14. Смоленцева С. С., Фаворская М. Н. Система наложения визуальных природных эффектов на статическое изображение (Natural effects imitation) // Свид. № 2009612794. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ, г. Москва, 30 июля 2009 г.

Поступила в редакцию 5 июня 2012 г.