

УДК 004.93

С.А. Зори, канд. техн. наук, доц.  
Донецкий национальный технический университет  
[zori@pmi.dgtu.donetsk.ua](mailto:zori@pmi.dgtu.donetsk.ua)

## 3D-визуализация сцен методом трассировки лучей на параллельном графическом процессоре

*В работе рассмотрена реализация подхода к пространственной 3D-стереовизуализации трехмерных сцен с использованием параллельного GPU. Проведенные эксперименты реализации синтеза изображений трехмерной сцены методом трассировки лучей на GPU с CUDA показали, что: около 60% времени тратится на решение вычислительной задачи, значительная часть времени (около 40%) тратится на пересылку данных между ЦП и GPU для вычислений и организации процесса визуализации. Исследования влияния увеличения размера вычислительной сети на скорость вычислений показали важность правильного задания структуры формирования параллельной вычислительной сети и общего механизма распараллеливания.*

**Ключевые слова:** 3D-визуализация, стерео 3D-визуализация, трассировка лучей, параллельные вычисления на графическом мультипроцессоре, CUDA.

### Введение

Задачи реалистичной визуализации и генерации статических и динамических реалистичных изображений объектов и сцен окружающей обстановки компьютерными системами сегодня по-прежнему не только не теряют своей актуальности, но и постепенно переходят на новый качественный уровень – объемную визуализацию. Современные компьютерные системы синтеза и визуализации окружающей обстановки требуют качественного и эффективного применения и совмещения методов реалистичной трехмерной графики как с традиционным механизмом визуализации, так и пока еще нетрадиционной объемной (3D-) визуализацией, самым распространенным и доступным на сегодняшний день решением которой является стерео 3D-визуализация.

К сферам применений объемной визуализации относятся как традиционные для компьютерной графики области, так и любые другие области научной, исследовательской и практической деятельности человека, потенциально требующие на сегодняшний день улучшения и качественно нового уровня отображения результатов компьютерной симуляции и моделирования.

Все это актуализирует и порождает новые направления прикладных исследований в направлении создания эффективных архитектур программно-аппаратных комплексов для решения задач реалистичной объемной визуализации.

Задача реалистичной пространственной визуализации на устройствах объемного отображения является сегодня активно обсуждаемой, имеющиеся результаты ее решения интенсивно внедряются в практическую область. Разработке

эффективных методов и средств объемной (пространственной) 3D-визуализации посвящено множество работ [1-5]. Но, несмотря на это, единого и эффективного подхода к качественной реализации объемного отображения, как и фактически устройств, их реализующих, на сегодняшний день пока не существует [1, 5].

Целью работы является определение эффективности 3D-стереовизуализации трехмерных сцен с использованием метода трассировки лучей на параллельном графическом процессоре с использованием технологии CUDA.

### Основные особенности объемной визуализации

Классическая трёхмерная графика обычно имеет дело с виртуальным трёхмерным пространством (сценой), изображение которого (ракурс) рассчитывается (синтезируется) в зависимости от положения наблюдателя и отображается (визуализируется) на плоской двухмерной поверхности экрана (дисплея). При этом синтез изображения по сути состоит в расчете проекции сцены на плоскость экрана, а само синтезированное изображение, как и способ его отображения (визуализации), является плоским, двумерным.

В настоящее время используются два основных способа отображения трехмерной информации в объемном виде (пространственной 3D-визуализации) – пространственная объемная 3D-визуализация (3D- volumetric visualization) и стереоскопическая 3D-визуализация (3D- stereoscopic visualization) [1, 5].

Главное их отличие состоит в том, что для пространственной объемной 3D-визуализации

фактически не требуется выполнение проецирования сцены на плоскость экрана и выполнения традиционного набора процедур компьютерной трехмерной графики, а расчет сцены состоит по сути в создании дискретизированных объемно-пространственных моделей ее трехмерных объектов - визуальных объемных образов объектов сцены, которые в дальнейшем визуализируются на специализированных устройствах пространственного отображения - 3D- объемных дисплеях.

Стереоскопическая 3D- визуализация по сути использует модифицированные процедуры классической трехмерной компьютерной графики, которые состоят в расчете двух проекций сцены (стереопары изображений) на плоскость экрана дисплея с двух камер, соответствующим глазам наблюдателя, - двойной рендеринг сцены, с дальнейшим отображением полученных изображений на стереоскопических 3D- дисплеях.

Необходимо отметить, что существующие сегодня объемные 3D- системы пространственной визуализации, способные демонстрировать трехмерное изображение, не позволяют пока создавать полноценной и качественной физической, осязаемой копии математической модели, создаваемой методами трехмерной графики, и имеют очень высокую стоимость при фактически единичных произведенных экземплярах для ограниченного круга пользователей. Кроме того, одной из важных причин малой распространенности устройств на базе объемных технологий визуализации является отсутствие стандартизации представления 3D информации для них.

Подавляющее же большинство объемных трёхмерных изображений пространственно визуализируется в настоящее время при помощи метода стереоскопической 3D- визуализации, как наиболее лёгкого в реализации, и базовыми методами построения объемных (пространственных) изображений для устройств 3D- визуализации на современном этапе являются методы, основанные на стереоскопии [1-5].

Необходимо, также, отметить следующую особенность - для получения корректных и качественных визуальных результатов сегодня при построении компьютерных систем как пространственной объемной, так и стереоскопической 3D- визуализации преимущественно используют методы рей-трейсинга (Ray tracing methods) - «классический» Ray-tracing и Ray-casting в системах «классической» компьютерной 3D- графики и стереоскопической 3D- визуализации, и «объемный» метод Volume Ray-casting для организации объемного рендеринга в воксельных системах пространственной объемной 3D- визуализации [6, 7].

### Стереο визуализация методом трассировки лучей на параллельном GPU

Трассировка лучей (ray tracing) - метод машинной графики, позволяющий создавать фотореалистичные изображения любых трехмерных сцен, используется в машинной графике давно и успешно. Современные алгоритмы трассировки лучей являются оптимизацией базовых алгоритмов, при этом используя (как правило) алгоритм обратной трассировки луча (ray casting) из-за большой вычислительной нагрузки классического метода [6, 8, 9, 10]. Известно множество оптимизационных реализаций трассировки лучей, характеристики некоторых популярных методов, оптимизации трассировки лучей приведены в таблице 1 [9, 10].

Таблица 1 - Сравнительная характеристика современных методов рэй-трэйсинга

Метод	Преимущества	Недостатки
Kd-деревья	- позволяет использовать бинарный поиск для нахождения примитива, пересекаемого лучом; - простой и эффективный алгоритм траверса; - хорош для GPU; - занимает мало памяти.	- трудоемкое построение, а именно, поиск разбиения с минимальным SAH. - имеет большую глубину, чем BVH. Больше шагов при построении.
Пакетная трассировка	- комбинируется с другими методами; - групповой трэйсинг, уменьшающий количество вычислений	- нет возможности провести трэйсинг отдельного луча
BVH-деревья	- обладают высокой скоростью и адаптивностью и построения; - довольно простой траверс как для трассировки лучей, так и для определения столкновений; - хорош для GPU	- сложность структур данных

Однако, даже с использованием модифицированных и оптимизированных методов трассировки, без применения высокопроизводительных параллельных вычислительных систем решение задачи синтеза в реальном времени не представляется возможным [11-15].

Вследствие большого объема однотипных вычислений рендеринг можно разбивать на потоки (распараллелить). Поэтому для визуализации весьма актуально использование многопроцессорных систем [14, 15].

Метод как прямой, так и обратной трассировки лучей хорошо масштабируется по числу процессоров. Поскольку лучи и фотоны могут трассироваться практически независимо друг от друга, то каждому узлу (процессору) параллельной системы можно выделить свою часть изображения для обработки - например, разделить картинку на  $N$  одинаковых частей и поручив каждому процессору рендеринг своей части [14, 15] (рис. 1).

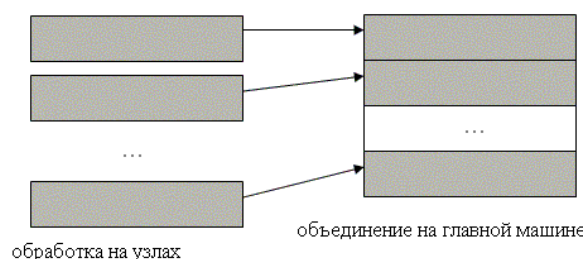


Рисунок 1 – Схема параллельной трассировки лучей

Современным направлением реализации ресурсоемких вычислений является применение возможностей высокопроизводительных специализированных параллельных вычислительных систем на базе графических видеоадаптеров. Одной из таких технологий является технология CUDA (Compute Unified Device Architecture) на графических видеокартах NVIDIA.

Таким образом, базовой процедурой синтеза стереоизображения есть подготовка (расчет) стереопары (левое изображение - для левого глаза наблюдателя, а правое - для правого) [5, 14-17]. В силу того, что расчет изображений может осуществляться абсолютно независимо для левого и правого изображения, процесс может быть распараллелен во времени и хорошо отображен на параллельные архитектуры вычислительных систем.

В виду высокой популярности, доступности и мощности современной технологии CUDA, использующей мощь параллельного высокопроизводительного графического мультипроцессора, процесс компьютерного синтеза стереопары можно организовать на нем следующим образом:

- параллельная независимая реализация синтеза «левый канал» - «правый канал» на мультипроцессоре (параллельный уровень 1);
- параллельная «внутриканальная» реализация рендеринга методом трассировки лучей на ядрах мультипроцессора, выделенных под каждый канал (параллельный уровень 2).

Далее, с помощью GPU также может быть проведен процесс постобработки кадров стереопары (преобразование кадров для вывода на устройство пространственной визуализации – сборка стереопары - например, анаглиф- преобразование, анаморфирование или получение основного и зависимого (разностного) кадра) и собственно визуализация.

Схема реализации синтеза стерео приведена на рис. 2.

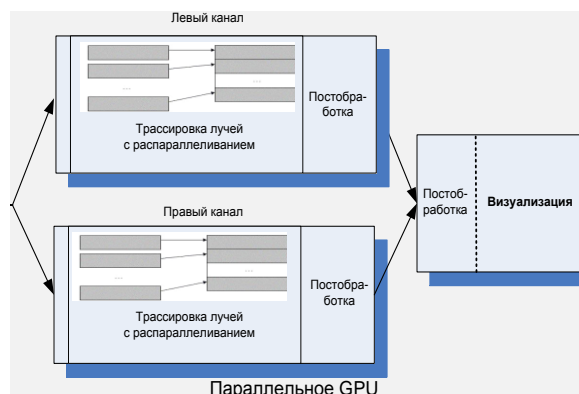


Рисунок 2 – Процесс стерео синтеза с использованием GPU

### Экспериментальное исследование системы визуализации методом трассировки лучей на базе GPU

Эксперименты проводились для исследования зависимости временных характеристик синтеза от параметров, определяющих сложность генерируемой сцены - количества источников освещения, количества объектов, составляющих сцену, их сложность (количество аппроксимирующих граней) и др., а также параметров вычислительной среды - размера вычислительной CUDA- сети и некоторых других параметров. Исследуемыми характеристиками системы являются: время выполнения вычислительной части, время, необходимое для визуализации сцены, и общее время синтеза сцены.

Во время экспериментов также определялся объем времени, который система тратит на каждый из этапов синтеза, для выявления потерь времени на пересылку данных из оперативной памяти компьютера в память мультипроцессора и синхронизацию работы частей системы.

Эксперименты по синтезу изображения трехмерной сцены проводились на графической видео карте NVIDIA с использованием разработанного прототипа программной системы [14-17]. На рис. 3 и 4 представлены данные эксперимента по синтезу изображения сцены, состоящей из одного и двух объектов, и одного источника освещения.

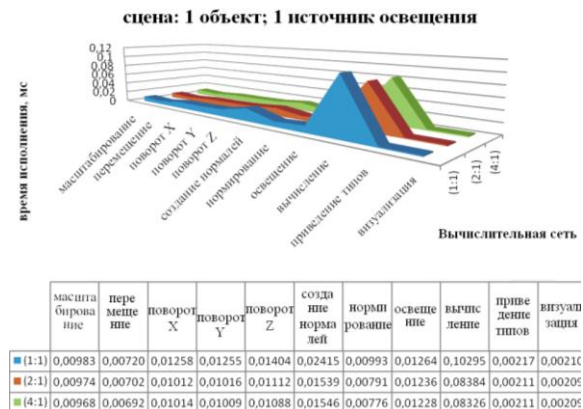


Рисунок 3 – Временные зависимости синтеза трехмерной сцены - 1

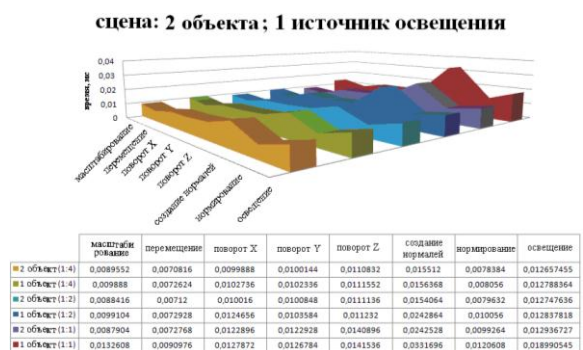


Рисунок 4 - Временные зависимости синтеза трехмерной сцены – 2

На рис. 5 приведен график, иллюстрирующий зависимость времени выполнения основных этапов синтеза при организации вычислительной сети различного размера (сцена из трех объектов и одного источника освещения).



Рисунок 5 - Временные зависимости синтеза трехмерной сцены - 3

На рис. 6 приведены затраты времени для расчетов сцены, состоящий из 5 объектов (два объекта имеют по 8 вершин и 12 полигонов, еще два объекта состоят из 12 вершин и 20 полигонов, один объект состоит из 20 вершин и 36 полигонов) и одного источника освещения. Для расчетов использовалась вычислительная сеть

размера (1:1). Результаты иллюстрируют влияние размера объекта на скорость расчетов.



Рисунок 6 - Временные зависимости синтеза трехмерной сцены - 4

На рис. 7 показаны относительные затраты времени на основные процедуры при синтезе изображения трехмерной сцены из 6 объектов различной сложности и 1 источника освещения. Можно видеть, что вычисления занимают наибольшую часть времени. В категорию «другое» попадает время, затраченное на копирование данных между ЦП и GPU, и время, затраченное на управление вычислениями и визуализацией.

**сцена: 6 объектов; 1 источник освещения**

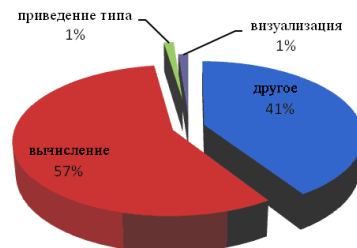


Рисунок 7 - Затраты времени на основные процедуры при синтезе изображения

Рисунок 8 иллюстрирует зависимость времени, которое тратится на вычисления на CUDA-сети, для некоторой сцены, в зависимости от выделенной конфигурации сети.

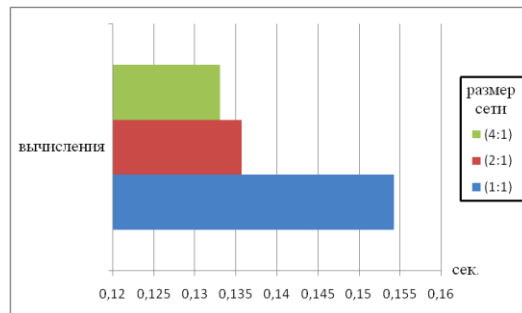


Рисунок 8 – Зависимость времени вычислений от конфигурации сети

**Выводы**

В работе рассмотрена задача 3D- пространственной визуализации трехмерных сцен и основные подходы к ее решению.

Показано, что подавляющее большинство объемных трёхмерных изображений пространственно визуализируется в настоящее время при помощи метода стереоскопической 3D- визуализации, как наиболее лёгкого в реализации.

Показано, что на современном этапе основными методами, используемыми при синтезе качественных изображений, вне зависимости от выбранного способа визуализации являются методы трассировки лучей. Однако, даже с использованием модифицированных и оптимизированных методов трассировки, без применения высокопроизводительных параллельных вычислительных систем решение задачи синтеза в реальном времени не представляется возможным, поэтому, для визуализации является актуальным использование параллельных вычислительных систем.

Рассмотрена реализация подхода к пространственной 3D- стерео визуализации трехмерных сцен методом трассировки лучей с использованием параллельного GPU.

Получены экспериментальные характеристики процесса. Проведенные эксперименты показали, что разработанный прототип системы решает задачу синтеза изображений несложной трехмерной сцены методом трассировки лучей за несколько миллисекунд. При этом:

- около 60-ти процентов времени тратится на собственно вычисления при синтезе сцены;

- значительная часть времени при решении задачи (до 40%) тратится на пересылку данных между центральным и графическим процессорами сначала для вычислений, а затем для организации процесса визуализации;

- при увеличении вычислительной сложности сцены время для ее обработки тоже увеличивается, зависимость имеет почти линейный характер;

- решение тестовой задачи на вычислительной CUDA- сети размера (4:1) сокращает время вычислений на 20-25% по отношению к сети размера (2:1) и в 2,5 раза по отношению к сети (1:1);

- при организации процесса важно правильное задание структуры формирования параллельной вычислительной CUDA-сети и общего механизма распараллеливания.

**Список литературы**

1. 3D-визуализация [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/3D-визуализация>
2. Ray Zone, Stereoscopic cinema & the origins of 3-D film (University Press of Kentucky, 2007) ISBN 0-8131-2461-1, p. 110
3. 3D Videocommunication - Algorithms, concepts and real-time systems in human centred communication // Edited by Oliver Schreer, Peter Kauff, Thomas Sikora John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.-2005. - 340 p.
4. Башков Е.А. Современное алгоритмическое и аппаратное обеспечение виртуальных систем трехмерного моделирования окружающей обстановки / Башков Е.А., Зори С.А., Ковальский С.В. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка. – 2009. - 11 с.
5. Башков Е.А. Реалистичная визуализация трехмерных объектов и сцен с использованием технологий объемного отображения / Е.А. Башков, С.А. Зори // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск "Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении". – 2012. – №5(130). – С. 133-137.
6. Wald I. Realtime Ray Tracing and Interactive Global Illumination. PhD thesis, Saarland University, 2004.
7. Volume\_ray\_casting [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Volume\\_ray\\_casting](http://en.wikipedia.org/wiki/Volume_ray_casting)
8. Обратная трассировка лучей. Преломление [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://www.ray-tracing.ru/articles202.html>
9. Hierarchical grid для быстрой трассировки лучей [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://www.ray-tracing.ru/articles201.html> Monday, 20 December 2010 13:21:12.
10. Interactive k-d Tree GPU Raytracing [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://graphics.stanford.edu/papers/i3dkdtree/> Friday, 2 May 2010 15:25:12.
11. Распределенная трассировка лучей [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://www.ray-tracing.ru/articles208.html> Monday, 20 December 2010 13:21:12.
12. Алгоритм быстрой трассировки лучей на графических процессорах для динамической сетки с применением геометрии изображения [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://graphics.cs.uiuc.edu/geomrt/> Monday, 20 December 2009 11:21:12.

13. Popov S. Stackless KD-Tree Traversal for High Performance GPU Ray Tracing / Popov S., Günther J., Seidel H.-P., Slusallek P. // In Proceedings of the EUROGRAPHICS conference – vol. 26 (2007) – № 3.

14. Иванова Е.В. Применение технологий параллельных вычислений для реализации реалистичной 3D-графики / Е.В. Иванова, С.А. Зори // Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг (ІУС та КМ-2010): матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 19-21 травня 2010 р. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – т.2, С.206-208.

15. Запороженко И.А. Анализ методов уменьшения вычислительной сложности алгоритма трассировки лучей и способов их параллельной реализации / Запороженко И.А., Григорьев М.А., Зори С.А. // Моделювання та комп'ютерна графіка : матеріали 5-ї міжнародної науково-технічної конференції, м. Донецьк, 24-27 вересня 2013 р. – Донецьк, : ДонНТУ, Міністерство освіти та науки України, 2013. – С.98-100.

16. Гуров А.В. Реалистичная стерео-визуализация трехмерных сцен методом трассировки лучей на специализированных параллельных вычислительных системах / А.В. Гуров, С.А. Зори // Моделювання та комп'ютерна графіка : матеріали 4-ї міжнародної науково-технічної конференції, м. Донецьк, 5-8 жовтня 2011 р. – Донецьк: ДонНТУ, Міністерство освіти та науки, молоді та спорту України, 2011. – С. 109-113.

17. Зори С.А. Синтез стереоизображений на параллельных графических вычислительных системах / С.А. Зори // Комп'ютерна графіка та розпізнавання зображень: збірник наукових праць науково-практичної конференції. – Вінниця: Вінницький обласний інститут післядипломної освіти, травень 2012 року. – С. 75-79.

*Надійшла до редакції 10.03.2014*

#### **С.А. ЗОРИ**

Донецький національний технічний університет

#### **3D-ВІЗУАЛІЗАЦІЯ СЦЕН МЕТОДОМ ТРАСУВАННЯ ПРОМЕНІВ НА ПАРАЛЕЛЬНОМУ ГРАФІЧНОМУ ПРОЦЕСОРІ**

У роботі розглянута реалізація підходу до просторової 3D-стереовізуалізації тривимірних сцен з використанням паралельного GPU. Проведені експерименти реалізації синтезу зображень тривимірної сцени методом трасування променів на GPU з CUDA показали, що: близько 60% часу витрачається на рішення обчислювальної задачі, значна частина часу (близько 40%) витрачається на пересилання даних між ЦП і GPU для обчислень і організації процесу візуалізації. Дослідження впливу збільшення розміру обчислювальної мережі на швидкість обчислень показали важливість правильного завдання структури формування паралельної обчислювальної мережі й загального механізму розпаралелювання.

**Ключові слова:** 3D-візуалізація, стерео 3D-візуалізація, трасування променів, паралельні обчислення на графічному мультипроцесорі, CUDA.

#### **S.A. ZORI**

Donetsk National Technical University

#### **3D-VISUALIZATION BY RAY-TRACING IMAGE SYNTHESIS ON GPU**

This work is devoted to the research of approaches to volumetric 3D-visualization of three-dimensional scenes. In computer systems both volumetric 3D-visualization and stereoscopic 3D-visualization for obtaining correct and qualitative visual results mainly use Ray tracing methods. To increase the efficiency of their realization a high-efficiency specialized parallel computing systems on GPU basis is used. The article considers the realization of 3D-visualization by ray-tracing image synthesis on GPU. The experiments of realization of image synthesis of 3D-scenes by Ray tracing method on GPU with CUDA have shown that about 60% of time is spent for solving a computing task, the significant part of time (about 40%) is spent for transfer of data between the CPU and GPU for computing and visualization organization, and correct formation of structure of the parallel computer network on GPU and choice of the common mechanism of parallel realization of the task is very important.

**Keywords:** volumetric 3D-visualization, stereo 3D-visualization, Ray tracing, parallel computing on GPU, CUDA.