

# Синтез фотореалистичных трехмерных изображений в современных системах презентаций

С.В. Андреев, Е.Ю. Денисов, Н.Е. Кирилов  
Институт Прикладной Математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва  
e-mail: esa@gin.keldysh.ru, eed@spp.keldysh.ru

## Аннотация

В статье представлена технология, предназначенная для синтеза объемных изображений с использованием современных систем презентаций, которая позволяет производить физически аккуратное моделирование глобальной освещенности сцен и получать высококачественные изображения, в том числе изменяющихся в режиме реального времени, без использования дополнительных дорогостоящих аппаратных решений. На базе этой технологии создан презентационный комплекс, назначение которого — демонстрация трехмерных презентаций с физически аккуратной картиной глобальной освещенности объектов. Рассматриваются аппаратные и программные решения, обеспечивающие точность и синхронность изображения при приемлемой (обеспечивающей непрерывность восприятия) частоте обновления кадров.

**Ключевые слова:** машинная (компьютерная) графика, синтез изображений, физически аккуратное моделирование освещенности, распределенные вычисления, объемное изображение.

## 1. Введение

В современном мире огромную роль играют системы презентаций, используемые для доведения информации зрителю в графическом виде. Особое место в таких системах занимают компьютерные системы генерации трехмерного представления иллюстрируемых объектов, работающие в режиме реального времени.



Рис. 1. Зрительный зал Terminal V

Одним из примеров презентационной системы является комплекс Terminal V (рис. 1), находящийся в Австрии и описанный на сайте [3]. Он представляет собой демонстрационный зал со зрительными местами, обращенными к трем соединенным экранам, стоящим под углом в 120 градусов — фронтальному, левому и правому (рис. 2).

Этот комплекс управляется системой из семи компьютеров, объединенных в локальную сеть. Два из них управляют выводом стереокадра на фронтальный экран: первый компьютер выводит правый канал стереокадра фронтального экрана, второй — левый канал стереокадра фронтального экрана. Соответственно, два следующих компьютера выводят стереокадр на левый экран, и еще два — на правый. Все эти шесть серверных компьютеров, выводящие изображения на экраны комплекса, управляются основным мастер-компьютером, подключенным к обычному монитору (место оператора презентационного комплекса).

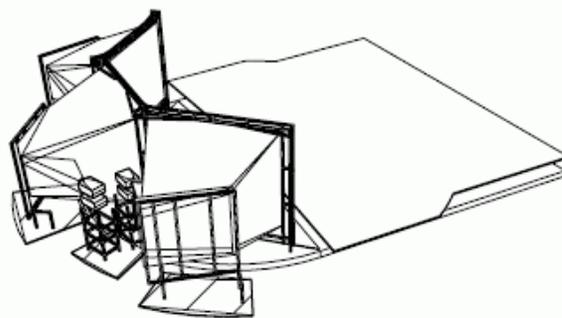


Рис. 2. Техническая схема трех экранов Terminal V

Таким образом, система предназначена для показа протяженных панорамных стереокадров, где каждый результирующий стереокадр состоит из трех частей (левый, правый и фронтальный экран соответственно) и управляемого оператором с помощью компьютера с обычным монитором (рис. 3).



Рис. 3. Проведение стерео презентации в зале Terminal V

Какие же специфические проблемы встают при разработке программного обеспечения для системы Terminal V? Это, во-первых, разделение стереокадра на три составляющие и во-вторых, синхронизация вывода изображения. В то время, как решение первой проблемы достаточно очевидно в данном случае, рассмотрим специфику второй подробнее.

Известно, что при генерации кадра системами, работающими в режиме реального времени, используется так называемая система с двойной буферизацией, когда расчет и отображение каждого последующего кадра происходит в так называемом «заднем буфере» (back buffer), невидимом на экране. Таким образом, зритель не наблюдает промежуточных состояний неоконченного расчета и отображения кадра (которые могут занимать достаточно продолжительное время). И только когда кадр полностью рассчитан, происходит практически мгновенный обмен буферов (swap buffers) и содержимое заднего буфера мгновенно выдается на экран. Тем временем система начинает расчет следующего кадра, и так далее.

В случае расчета частей одного и того же кадра несколькими компьютерами (семи в случае Terminal V) возникает проблема синхронизации процесса обмена буферов. Время расчета части кадра напрямую зависит от сложности участка сцены, попавшего в эту часть. В общем случае все компьютеры закончат расчет своих участков кадра в разное время. И если не производить контроль обмена буферов для всей системы, мы получим хаотически рассогласованную картину смены кадров правого, фронтального и левого экранов, причем несогласованность возрастает, учитывая наличие стерео каналов (правый/левый на каждый экран).

## 2. Методы решения для комплекса Terminal V

Как отмечается в [1], основным требованием, предъявляемым к программному обеспечению подобных систем, является высокая скорость графической обработки, интерактивная визуализация сложных сцен, а также эффективная синхронизация параллельно исполняемых процессов. К сожалению, каждая из систем, описанных выше, обладает совершенно различными особенностями. Каждый комплекс управляется достаточно уникальным и индивидуальным аппаратным обеспечением. Таким образом, решения, выработанные для одних систем (например, для VeonPC), как правило, не могут быть использованы при решении проблемы управления другими системами (например, комплексом Terminal V). Уникальностью Terminal V является управление системой с помощью семи отдельных компьютеров, объединенных в локальную сеть. Тем не менее, некоторые решения могут найти применение при разработке программного обеспечения для новых систем презентации, построенных аналогично Terminal V.

Какие же существуют пути решения возникающей проблемы генерации результирующего стереокадра в комплексе Terminal V? Их, фактически, два: это аппаратный и программный.

### 2.1. Аппаратное решение

Компанией nVidia разработано семейство видеокарт Quadro G-Sync [4].

NVIDIA Quadro G-Sync является дополнительной видеокарткой, которая предоставляет функциональность Framelock/Genlock, синхронизацию вывода изображения из буфера кадров с частотой обновления, обеспечивая высокие уровни реалистичности, визуализации и совместных возможностей.

*Frame lock* синхронизирует каналы отображения из многочисленных рабочих станций, а также создает один большой виртуальный дисплей, который управляется

многосистемным кластером для возможности масштабирования производительности.

*Genlock* синхронизирует графический выход с внешним источником, обычно это необходимо для фильмов и телевещательных приложений.

Использование видеокарт NVIDIA Quadro FX 4400G и Quadro FX 3000G позволяет синхронизировать вывод кадров на нескольких мониторах, а также синхронизировать одну или несколько систем с общим источником синхронизации.

Передача сигнала для синхронизации отображения осуществляется в NVIDIA Quadro FX, поэтому задержка минимальна. Это гарантирует, что все используемые графические карты синхронизируются к одной и той же скорости передачи данных, и что пиксели выводятся одновременно.

Таким образом, используя возможности G-Sync, проблема синхронизации обмена буферов может быть успешно решена. Однако есть довольно существенный недостаток такого решения. Это высокая стоимость продуктов линии G-Sync. Например, стоимость только одной видеокарты G-Sync достигает в среднем 4—5 тысяч долларов. При условии, что в данной системе нам необходимы семь видеокарт, стоимость такого решения увеличивается на десятки тысяч долларов. Это также ограничивает применимость данного подхода к более дешевым системам презентации, построенным на аналогичном принципе (расчет кадра несколькими компьютерами, объединенными в локальную сеть). Поэтому хотелось бы иметь и другое решение данной проблемы.

### 2.2. Программное решение

Можно решить эту проблему программным путем. Принцип решения довольно прост: мастер-компьютер информирует каждый из серверных компьютеров, какую часть кадра предстоит рассчитать каждому из них.

Каждый из серверных компьютеров вычисляет свою часть результирующего стереокадра и посылает сообщение на мастер-компьютер, не производя более никаких действий, а только ожидая ответной команды.

Как только мастер-компьютер получит сигнал, что все части кадра рассчитаны, он выдает команду всем серверам об обмене буферов. И результирующий стереокадр появляется без рассогласования на всех трех экранах.

Весь обмен информацией (данные, синхронизация) происходит через локальную сеть по стандартным протоколам обмена.

Такой подход удешевляет систему, позволяя отказаться от дорогостоящего дополнительного оборудования класса high-end, и соответственно, увеличивает области применения данного решения. Даже относительно дешевые видеокарты вполне применимы при данном подходе. Однако описанный подход накладывает определенные требования на подсистему обмена сообщениями. В частности, ее характеристики (в том числе пропускная способность) должны быть достаточными, чтобы обеспечить максимальную синхронность передачи команды обмена буферов от мастер-компьютера к серверным компьютерам. Иначе отображение различных частей кадра может произойти не одновременно, что будет сразу же замечено наблюдателями.

### 3. Практическое воплощение решения

В большинстве современных систем презентаций пользователю предоставляется интерфейс достаточно высокого уровня, позволяющий ему работать со сложными сценами, не задумываясь о деталях взаимодействия с графикой нижнего уровня и системными программными интерфейсами. Разработчик отгорожен от деталей взаимодействия с низкоуровневой графикой и системными программными интерфейсами и может сконцентрироваться на разработке собственно приложения. Одной из таких высокоэффективных сред разработки является Аванго [5], используемый в комплексе VEonPC [2].

Широко распространено также использование IRIS Performer [6] и IRIS Inventor [7], особенно в комплексах под управлением компьютеров SGI. Все эти высокоуровневые средства разработки являются надстройками над OpenGL [8], что позволяет эффективно использовать возможности аппаратного ускорения встроженных видеосистем.

Однако в нашем случае в качестве такой основы был взят разработанный в отделе машинной графики ИПМ программный комплекс FLY [9], позволяющий отображать сцены со сложной геометрией, оптически сложными материалами и разнообразными источниками освещения, включая дневной свет. Комплекс FLY поддерживает не только специфические для OpenGL атрибуты материалов сцены, необходимые для интерактивного показа в режиме реального времени (используя аппаратное ускорение), но также и оснащен модулем трассировки лучей для генерации фотореалистичных изображений. Имеющийся в этом комплексе модуль распределенных вычислений был расширен подсистемой визуализации и подсистемой синхронизации отображения.

#### 3.1. Общая идея

Общая идея визуализации состоит в следующем: одна и та же сцена (набор объектов со своими характеристиками поверхностей, набор источников освещения и т.д.) обрабатывается и визуализируется каждым из серверных компьютеров независимо. Разница между ними состоит в том, что каждый сервер-компьютер использует для визуализации свое положение камеры (передаваемое мастер-компьютером), соответствующее положению рассчитываемого участка на общем большом экране. Стереоразложение является частным случаем многоэкранной визуализации и реализуется так же — два сервер-компьютера рассчитывают два изображения, каждый свое, соответствующие левому и правому глазам. Для этого мастер-компьютер передает серверам положение камер, слегка смещенных друг относительно друга — раздвинутых на расстояние стереобазы. В процессе показа система презентации автоматически синхронизирует показы левого и правого кадров со специальным устройством в очках, обеспечивающим попеременное закрывание левого и правого глаза. Таким образом, левый глаз всегда видит только левые кадры, а правый — правые.

#### 3.2. Особенности решения

- Поскольку в общем случае сервера могут быть оснащены различными видеокартами, необходим механизм адаптации мастер-компьютера к возможным различиям

видеосистем серверных компьютеров (разрешение, частота, глубина цвета и т.д.) для обеспечения работоспособности системы в целом.

- Мастер-компьютер должен обеспечить отображение полного набора элементов управления, позволяющих оператору производить манипуляции как с объектами сцены, так и с камерой, что необходимо для интерактивности процесса презентации. Серверы, напротив, должны показывать только результирующее изображение без элементов управления.

- Необходимо обеспечить самовосстановление системы визуализации после сбоя сети и/или серверов без необходимости полного ее перезапуска.

#### 3.3. Реализация

После загрузки сцены мастер-компьютер передает каждому серверу эту сцену со всеми атрибутами (текстуры, свойства поверхностей, источники освещения и т.д.), так что каждый сервер имеет полную копию сцены и способен ее обчислить независимо от других. Также передача сцены новому серверу происходит после изменения списка серверов (в случае добавления сервера).

Затем для визуализации каждого кадра выполняются три основных этапа:

- Мастер-компьютер передает каждому серверу новые параметры камеры — ее координаты, координаты точки назначения (куда фактически направлена камера), угол поля зрения. Эти новые параметры могут быть либо рассчитаны мастер-компьютером как результат воздействия оператора на координатное устройство ввода, или вычислены автоматически как результат движения камеры по заранее заданной траектории.

- Каждый сервер рассчитывает следующий кадр, соответствующий индивидуальным параметрам камеры, в «заднем буфере» и по окончании расчета информирует мастера о готовности кадра.

- Мастер по получении сигнала готовности от всех серверов выдает им всем синхронную команду на отображение готового кадра.

При тестировании выяснилось, что при использовании стандартного для Windows протокола обмена RPC, используемого в 100-мегабитной сети TCP/IP, слишком велики задержки в передаче команд и данных, обусловленные стандартом и особенностями протокола TCP/IP. Так, максимальная скорость для двух серверов (то есть при использовании только стерео режима) составила 10 кадров в секунду, что недопустимо мало для обеспечения гладкого воспроизведения. Кроме того, эта скорость падает еще больше с увеличением числа серверов. Для решения проблемы обмен командами для высокоскоростной синхронизации серверов был организован на основе протокола UDP, используемого в той же 100-мегабитной сети TCP/IP. Недостатками UDP по сравнению с TCP/IP (отсутствие подтверждения приема данных, т.е. возможная потеря пакетов) можно пренебречь при условии работы в локальной сети, где потери пакетов минимальны.

### 3.4. Детали реализации

Задание серверов, участвующих в процессе визуализации, происходит в два этапа. На первом выбираются сервера, участвующие в совместной визуализации. Программа проверяет, способен ли указанный сервер участвовать в визуализации (т.е. что на нем установлен и активирован соответствующий программный модуль), и в случае положительного результата, указанный сервер добавляется в список. На втором этапе выбираются параметры стереоизображения. Пользователь (оператор) указывает соответствие серверов каналам, задает разрешение и частоту обновления экрана для каждого сервера, а также величину стереобазы.

После завершения процесса настройки серверов все изменения в сцене, производимые на мастер-компьютере, синхронно рассчитываются и отображаются на экранах, связанных с серверными компьютерами.

### 4. Заключение

Основная цель данной работы была сформулирована исходя из специфики использования презентационного комплекса Terminal V: осуществить демонстрацию на комплексе трехмерных изображений, смоделированных с физически аккуратной картиной глобальной освещенности объектов, без использования дополнительных дорогостоящих аппаратных средств.

Для достижения этой цели было разработано и воплощено программное решение, позволяющее осуществить требуемую демонстрацию на оборудовании, штатно входящем в комплект презентационного комплекса.

Система была успешно опробована на оборудовании комплекса Terminal V. На рис. 4 приведено стереоизображение компьютерной модели автомобиля (показано изображение только левого канала), «встроенной» в реальный природный ландшафт. В качестве источника освещения используется изображение сцены с большим динамическим диапазоном [10].



Рис. 4. Стереоизображение компьютерной модели автомобиля

Версия статьи с цветными иллюстрациями размещена по адресу:

[http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/publications/cgd\\_publ.htm](http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/publications/cgd_publ.htm)

Работа была частично поддержана компанией INTEGRA Inc. (Япония).

### 5. Библиография

- [1] «Разработка и создание системы виртуального окружения на кластере персональных компьютеров для задач атомной науки и техники». МФТИ, Москва — Долгопрудный, 2004. <http://www.sim-mipt.ru/content/972/repAtom04.html>
- [2] Труды 1-ой Межд. Конф. По Системам Виртуального Окружения На Кластерах Персональных Компьютеров. VE on PC 2001. Протвино, 22-25 сент. 2001 г.
- [3] <http://www.terminalv.at>
- [4] [http://www.nvidia.ru/products/QuadroFX/qfx\\_g\\_sync.shtml](http://www.nvidia.ru/products/QuadroFX/qfx_g_sync.shtml)
- [5] H. Tramberend, Avocado: A Distributed Virtual Reality Framework, Proc. of the IEEE Virtual Reality, 1999.
- [6] J.Rohlf and J.Helman. IRIS Performer: A High Performance Multiprocessing Toolkit for Real Time 3D Graphic. In A. Glassner, editor, Proceedings of SIGGRAPH '94, pp. 381-395.
- [7] Strauss, P. S. IRIS Inventor, A 3D Graphics Toolkit. In Proc. of 8th Annual Conference on Object-Oriented Programming Systems, Languages and Applications (Washington, DC, USA, 1993), ACM Press, pp. 192-200.
- [8] Neider, J., Davis, T., and Woo, M. OpenGL Programming Guide. Addison-Wesley, Reading MA, 1993.
- [9] Ignatenko A., Barladian B., Dmitriev K., Ershov S., Galaktionov V., Valiev I., Voloboy A. A Real-Time 3D Rendering System with BRDF Materials and Natural Lighting. Proc. GraphiCon-2004 -14-th International Conference on Computer Graphics and Vision, Moscow, 2004, pp.159-162.
- [10] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов, Л.З. Шапиро Моделирование естественного дневного освещения, задаваемого изображением с большим динамическим диапазоном. - Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, № 111, Москва, 2005.

## Synthesis of photorealistic 3D images using modern presentation systems

### Abstract

The paper describes a technology of 3D images synthesis on modern presentation systems which allows performing a physically accurate lighting simulation and high quality image rendering, including images which are changed in real time (animation), without usage of additional expensive hardware solutions. A presentation complex was developed on the base of this technology with the purpose of demonstration 3D presentations with physically accurate global objects illumination. The paper reviews hardware and software solutions which provide accuracy and synchronism of image display with refresh rate acceptable for continuous visual perception.

**Keywords:** computer graphics, image synthesis, physically accurate lighting simulation, distributed calculations, 3D image.

### About the author(s)

Sergey Andreev, Eugene Denisov and Nickolay Kirilov are researchers at Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS, Moscow.