

# Интеграция моделирования освещенности методом трассировки лучей в системы автоматизированного проектирования

Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, Л.З. Шапиро  
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва

## Аннотация

В статье рассматриваются проблемы интеграции программ физически аккуратного моделирования распространения света методом трассировки лучей в системы автоматизированного проектирования. В качестве примера рассматриваются системы Autodesk 3DS Max и CATIA. Интегрируемые алгоритмы моделирования освещенности используются во многих, разработанных авторами, системах компьютерной графики для генерации высокореалистичных изображений и анализа освещенности. Рассмотрен вопрос ускорения расчетов освещения при модификации геометрии в системе автоматизированного проектирования, используя объектно-ориентированной, двухуровневой подход к трассировке лучей.

*Ключевые слова:* метод трассировки лучей, системы автоматизированного проектирования, 3DS Max, CATIA, моделирование освещенности.

## 1. Введение

Проблема генерации реалистичных изображений связана не только с разработкой корректных алгоритмов визуализации. Важным аспектом реалистичности является задание достаточно детальной цифровой модели изображаемых объектов. Задание такой модели требует использования существующих программ автоматизированного проектирования, где механизм создания и позиционирования объектов достаточно развит. Такие системы моделирования как Autodesk 3DS Max [1], CATIA (Dassault Systems/IBM) [2] или Maya (Alias/Wavefront) позволяют создать «с нуля» сложные цифровые модели, полностью описывающие, например, здание со всеми помещениями и интерьерами или автомобиль в мельчайших деталях.

Однако интегрирование систем физически аккуратного моделирования распространения света, используемых для построения реалистичных изображений, с современными пакетами автоматизированного проектирования является трудной задачей. Известно несколько попыток решения этой задачи. Наиболее известными среди них являются подгружаемые, встроенные модули (plugins), разработанные компаниями Lightscape [3], Mental Images [4] и Chaos Group (VRay) [5] для 3DS Max. Для системы автоматизированного проектирования CATIA V5 компанией OPTIS был выпущен встроенный модуль физически аккуратного моделирования освещенности SPEOS CAA V5 Based [6]. Компания Mental Images интегрировала свою программу моделирования освещенности со всеми наиболее известными системами автоматизированного проектирования – Autodesk 3DS MAX, Maya и CATIA (Photo Studio).

Основной проблемой, с которой сталкиваются разработчики программ физически аккуратного

моделирования распространения света при интегрировании своих модулей с системами автоматизированного проектирования, является отсутствие в этих системах физически корректных моделей, описывающих взаимодействие света со средой распространения и поверхностью объектов. Часто материалы поверхностей в САД системах задаются исходя из их внешнего восприятия (например, «дерево, дуб» или «металл, серебро»), чем через спецификации их физических свойств (например, количество света, отраженного и преломленного по закону Френеля), которые необходимы для корректного моделирования распространения света. Модели источников света в таких системах, как правило, не могут быть непосредственно использованы в системах физически аккуратного моделирования распространения света потому, что не содержат необходимых физических характеристик.

При этом разработчикам приходится учитывать запросы двух несколько различных категорий пользователей таких систем. Первая категория – это в основном пользователи такой системы как Autodesk 3DS Max. Как правило, это архитекторы или дизайнеры, которым надо визуально представить своим заказчикам различные варианты дизайна разрабатываемых помещений, салонов автомобилей и самолетов до их реальной реализации. Во многих случаях сами объекты еще физически не существуют к моменту подготовки такой презентации. Для этих пользователей физически аккуратное моделирование распространения света служит в основном способом создания фотореалистичных изображений разрабатываемых объектов. Это могут быть как отдельные помещения, так и целые архитектурные комплексы.

Для таких пользователей важно, чтобы используемый модуль требовал от них минимальных усилий по адаптации описания сцены, ранее подготовленной для получения изображения в "родном" 3DS Max (scanline) визуализаторе. Подготовка таких сцен, которые могут состоять из сотен тысяч треугольников и использовать сотни сложных текстурированных материалов, требует значительных усилий. Поэтому, как правило, пользователи согласны только на минимальные усилия по адаптации ранее подготовленных описаний сцен при использовании нового модуля.

Вторая категория пользователей – это пользователи, для которых физически аккуратное моделирование распространения света является основной целью. Такими пользователями часто являются разработчики оптически сложных светопроводящих и осветительных систем, таких как жидкокристаллические панели, автомобильные фары, приборы и пр. Физически аккуратное моделирование является критичным в тех случаях, когда архитекторам или конструкторам автомобилей и самолетов необходимо обеспечить требуемые уровни освещенности и контраста в интерьере или салоне. В ряде случаев пользователи могут интересоваться точными величинами и распределение освещенности в определенных областях сцены, например, на

рабочем столе или экране дисплея. Физически аккуратное моделирование является необходимым при расчете сложных условий освещенности, таких как смесь искусственного и естественного освещения, прямого освещения солнцем приборной панели автомобиля или самолета. Интерес представляет также задача моделирования освещения пешехода или дорожных знаков фарами автомобиля.

Для этой категории пользователей необходимым является физически корректное задание источников света и оптических свойств поверхностей и сред. Большинство систем автоматизированного проектирования не предоставляют таких возможностей. Поэтому дополнительные модули, предоставляющие интерфейс для задания характеристик, должны быть разработаны либо внутри системы, либо в программе моделирования освещенности.

Таким образом, решение задачи интеграции программ физически аккуратного моделирования распространения света с системами автоматизированного проектирования требует нескольких различных подходов для описанных выше двух групп пользователей.

Авторским коллективом было разработано несколько систем компьютерной графики [7]. В настоящей работе рассматриваются два примера интеграции наших систем физически аккуратного моделирования распространения света с системами Autodesk 3DS Max и CATIA (Dassault Systems). Интеграция с 3DS Max рассчитана, в основном, на получение изображений фотореалистичного качества. Интеграция с CATIA предполагает получения точных результатов моделирования освещенности.

## 2. Интеграция с 3DS Max

Как уже было сказано выше, основной целью при интеграции с 3DS Max являлось расширение моделей собственных (встроенных) 3DS Max источников света и материалов таким образом, чтобы они обеспечивали физически аккуратное моделирование распространения света. При этом предполагалось, что изменения в описании сцены, которые необходимо сделать пользователю, должны быть минимальны. Также важным было обеспечить максимальную поддержку различных эффектов (таких, как линзовые эффекты, размывание и др.), предоставляемых встроенными 3DS Max моделями материалов и источников света.

*Расширение моделей источников света.* На момент интеграции нашего модуля моделирования освещенности система 3DS Max2 поддерживала Omni (точечный, всенаправленный), Spot (Target and Free) и Direct (Target and Free) модели источников света. Основным недостатком этих моделей источников света (а точнее – недостатком их интерфейса, поскольку реальное моделирование обеспечивается встроенным модулем) являлось отсутствие каких либо параметров, которые можно было бы использовать как энергетические. Для использования точечного источника света в физически аккуратной системе моделирования распространения света необходимо задать интенсивность его излучения для всех направлений. Параллельный источник света характеризуется освещенностью площадки, перпендикулярной направлению его излучения. Эта проблема была решена добавлением специальных множителей для каждого типа источника света, которые позволяли вычислить энергетические характеристики для всех источников света.

В собственной визуализации 3DS Max поддерживает три вида зависимости освещенности как функции расстояния для всех видов источника света: отсутствие затухания,  $1/R$  и  $1/R^2$ , где  $R$  – расстояние от источника до объекта. Физически оправданным является только отсутствие затухания для параллельного источника и квадратичное ( $1/R^2$ ) для точечного источника. Способ вычисления вторичной (глобальной) освещенности в нашем модуле принципиально использует только физически корректные модели затухания для источников света.

Непосредственно для получения фотореалистичных изображений используется метод обратной трассировки лучей от камеры до объекта. Здесь при вычислении прямой освещенности объекта принципиально может быть использована любая модель затухания, в том числе и модели, определенные в 3DS Max. Для обеспечения максимальной совместимости с используемыми в 3DS Max подходами было решено разрешить использование любой модели затухания при вычислении прямой освещенности. Однако по умолчанию используется физически корректное затухание для данного типа источника света. Если же пользователь хочет использовать вид затухания, которое он определил с помощью интерфейса 3DS Max, то он должен установить переключатель "Use Decay Settings" в положение включено.

Важными объектами моделирования во многих случаях являются источники света с неоднородной диаграммой излучения (гониодиаграмм). Даже получение фотореалистичных изображений невозможно без учета гониодиаграмм источников света с отражателями. 3DS Max2 не обеспечивал возможности описания таких источников. Поэтому интерфейс 3DS Max2 был расширен источником света с гониодиаграммой. Следует отметить, что хотя более поздние версии 3DS Max включили в себя поддержку таких источников, непосредственное их использование в нашем модуле оказалось невозможным. Дело в том, что программный интерфейс 3DS Max SDK рассчитан только на вычисление прямой освещенности поверхности источником света. Используемый в нашей программе метод вычисления глобальной освещенности основан на прямой (от источника света) трассировке лучей методом Монте-Карло. Этот метод требует, чтобы были известны распределения интенсивностей излучения по всем направлениям. Эта информация, содержащаяся внутри «Photometric lights» источников, поддерживаемых более поздними версиями 3DS Max, отсутствует в 3DS Max SDK интерфейсе. В силу этих причин мы сочли целесообразным сохранить модели источников света разработанные для 3DS Max2 без изменений в последующих версиях.

При разработке интерфейса источников света мы придерживались принятого подхода – только минимально необходимое количество параметров должно быть добавлено к уже существующим источникам света. В результате разработанный интерфейс является для пользователя лишь небольшим расширением уже существующего и привычного для пользователя интерфейса. Для 3DS Max источника света был добавлен интерфейс для выбора и визуализации гониодиаграммы и для задания полного потока излучения для точечных источников (Spot и Omni) и освещенности площадки, перпендикулярной направлению излучения источника для параллельных источников (Direct).

*Расширение моделей материалов.* Стандартный материал, используемый в 3DS Max, обеспечивает визуализацию материала на уровне, близком к OpenGL. Для обеспечения более сложных оптических эффектов

различными компаниями (Blend, Composite, Raytrace, Top/Bottom, Lightscape, Shelac и др.) было разработано большое количество специальных моделей материалов. Большая часть этих материалов лишь имитирует различные оптические эффекты и рассчитана на использование в 3DS Max визуализаторе. Поэтому нам, также как и Lightscape, пришлось добавлять собственные модели, которые обеспечивают физически аккуратное моделирование диэлектрических материалов (закон Френеля), материалов с диффузной прозрачностью, с зеркальным отражением, излучающие поверхности. Некоторые базовые 3DS Max материалы, такие как диффузный или зеркальный цвет, легко преобразуются в физические атрибуты поверхности.



Рис. 1. Реалистичные изображения, полученные нашим модулем моделирования освещенности в среде 3DS Max.

На рис. 1 представлены результаты моделирования освещенности и синтеза реалистичных изображений для моделей, созданных в среде 3DS Max. Высокий реализм достигается благодаря высокой степени детализации геометрической модели, подготовленной дизайнерами в CAD системе, и физически аккуратному моделированию распространения света, поддерживаемому нашим модулем.

### 3. Интеграция с CATIA (Dassault Systems)

Как уже было упомянуто выше интеграция с CATIA (Dassault Systems) предполагает получения точных результатов моделирования освещенности. Такое моделирование требует введение источников света, отсутствующих в CATIA, задание оптических свойств

используемых материалов, расчета освещенностей различных объектов сцены и использование для анализа полученных результатов различных видов виртуальных измерительных приборов. При этом из информации, содержащейся в CATIA, используются данные о геометрии моделируемой сцены, положении и ориентации камеры, некоторые данные о свойствах, такие как диффузный и зеркальный цвет, индекс рефракции, прозрачность и т.д.

Было принято решение сконцентрировать основные вопросы моделирования освещения и анализа его результатов в собственной системе Inspirer2, построенной на базе системы реалистичной визуализации реального времени Fly [8]. Модуль, встроенный в CATIA, должен обеспечивать только извлечение данных о геометрии сцены в виде, необходимом для последующего моделирования. Назначение оптических свойств поверхностей и материалов, источников света для дальнейшего моделирования происходит в системе Inspirer2. Также она обеспечивает анализ результатов моделирования: получение итоговых изображений, использование тоновой заливки и изолиний на различных видах виртуальных сенсоров и т.д.

Важным условием интеграции, которое необходимо было принимать во внимание, является обеспечение максимальной интерактивности при взаимодействии двух систем. Эффективность физически аккуратного моделирование распространения света в Inspirer2 существенно зависит от эффективности работы базовых алгоритмов трассировки лучей. В действительности полное время моделирования определяется не только непосредственно временем трассировки лучей, но и временем подготовки вспомогательных структур данных, необходимых для ускорения трассировки. Как правило, чем более эффективный алгоритм трассировки лучей используется, тем большее время необходимо для подготовки вспомогательных, ускоряющих структур. Трассировка лучей в Inspirer2 использует пространственное разбиение пространства сцены в виде BSP (Binary Splitting Planes) дерева. Подготовка эффективного BSP дерева требует значительного времени, которое может быть в некоторых случаях сравнимо или даже превосходить непосредственно время трассировки. Такое возможно, например, при получении фотореалистичных изображений, когда используются распараллеленные алгоритмы трассировки (несколько процессоров) и ускорение с помощью SSE инструкции. Использование алгоритмов объектно-ориентированной, двухуровневой трассировки делает взаимодействие CATIA и Inspirer2 более быстрым, приближающимся к интерактивности.

Основная идея двухуровневой трассировки лучей состоит в том, что на верхнем уровне трассируются только параллелепипеды, ограничивающие объекты сцены. На втором, нижнем уровне луч трассируется уже непосредственно объектами. Подход позволяет обеспечить эффективную трассировку объектов различной сложности. В настоящее время реализована только трассировка объектов, состоящих из массивов треугольников.

При изменении сцены в CATIA модуль интеграции должен обновлять только те объекты сцены в Inspirer2, геометрия которых была изменена или объект был целиком заменен (удален или добавлен). Геометрия остальной части сцены должна остаться без изменения, что позволит обновить ускоряющие структуры за существенно меньшее время, чем, если бы они создавались заново.

В такой постановке модуль, встроенный в CATIA, должен решать два вопроса:

- извлечение из САТІА данных о геометрии моделируемой сцены в виде, подходящем для последующего оптического моделирования,
- идентификация одних и тех же геометрических объектов в САТІА и в Inspire2.

Решение первой задачи – это создание конвертера из одного геометрического представления в другое, который бы поддерживал структуру дерева сцены (документа) в САТІА. Геометрия из САТІА, включая дерево сцены, преобразуется в объекты, ограниченные триангулированными поверхностями с заданным уровнем разбиения, и в таком виде передается в Inspire2.

Решение второй задачи необходимо для того, чтобы отследить изменения в геометрии сцены после редактирования ее в САТІА. Это позволяет сохранить источники света и свойства поверхностей и материалов у ранее существующих геометрических объектов в Inspire2, а изменить только реально модифицированную часть сцены. Вторая задача была решена введением для всех узлов дерева сцены и геометрических объектов уникальных идентификаторов, единых как для системы САТІА, так и для программы моделирования освещенности. Эти идентификаторы сохраняются в сценах обеих систем, передаются при копировании геометрических объектов и позволяют идентифицировать между собой геометрические объекты, имеющиеся в обеих сценах одновременно. Таким образом, изменение геометрии объектов, произведенное в САТІА, переносится в Inspire2 с сохранением источников света и назначения оптических свойств поверхностей ранее введенных объектов. Такие изменения не затрагивают геометрические объекты, добавленные непосредственно в Inspire2, например объектов из существующих библиотек.

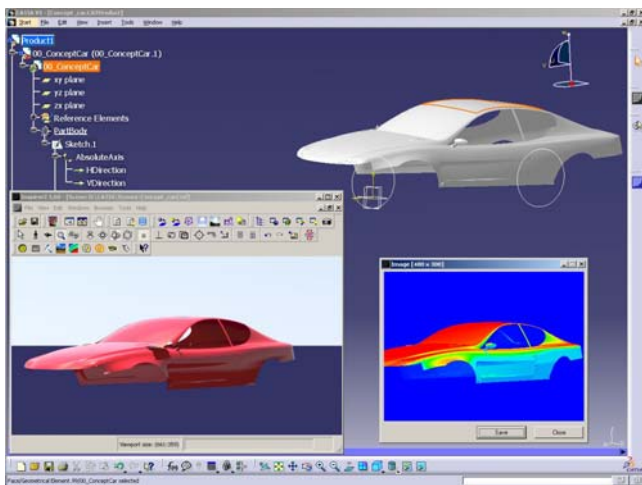


Рис. 2. Результаты интеграции системы моделирования освещенности Inspire2 и системы САТІА.

На рис. 2 представлены результаты моделирования освещенности для моделей, созданных в среде САТІА. Представлена реалистичная визуализация модели и распределение освещенности в виде тоновой заливки.

#### 4. Заключение

Интеграция созданного ранее моделирования освещенности и систем автоматического проектирования позволяет решить проблему задания детальной цифровой модели изображаемой сцены. Современные модели

насчитывают сотни тысяч и миллионы объектов, и не могут быть созданы без развитого механизма, предлагаемого САД системами. Разработанные нами модули интеграции в системы 3DS Max и САТІА позволяют успешно решать как задачи генерации высокореалистичных изображений, так и анализа освещенности и оптического дизайна.

Работа поддержана грантом РФФИ № 06-07-89165, а также компанией Integra Inc. (Япония).

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).

#### Список литературы

- [1] Autodesk 3DS Max  
<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/index?id=5659302&siteID=123112>
- [2] Dassault Systems, <http://www.3ds.com/home/>
- [3] <http://www.lightscape.com/>
- [4] mental images, <http://www.mentalimages.com/>
- [5] Chaos Group home page, <http://www.chaosgroup.com>
- [6] Гольдовский П., Кокова А., Моделирование оптических явлений и свойств задаваемых изделий. «САПР и графика», №8, 2004, с. 46-47.
- [7] Волобой А.Г., Галактионов В.А., Машинная графика в задачах автоматизированного проектирования. «Информационные технологии в проектировании и производстве», № 1, 2006, с. 64-73.
- [8] 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. The 14-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2004, Moscow, 2004, pp. 159-162.

## Integration of the ray tracing lighting simulation system with CAD systems

### Abstract

The paper discusses the integration of lighting simulation modules based on ray tracing into CAD systems. The original 3DS Max plugin and integration with CATIA are presented as examples. Physically accurate lighting simulation elaborated by authors is used in several rendering systems for generation of photorealistic images and illumination analysis. Also the problem of fast lighting simulation after scene modification in CAD system is considered. Object oriented, two-level ray tracing is used here.

**Keywords:** ray tracing, physically accurate lighting simulation, CAD systems, 3DS Max, CATIA.

### Authors:

Boris H. Barladyan, PhD, senior researcher of the Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS.  
 E-mail: [obb@gin.keldysh.ru](mailto:obb@gin.keldysh.ru)

Alexey G. Voloboy, PhD, senior researcher of the Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS.  
 E-mail: [voloboy@gin.keldysh.ru](mailto:voloboy@gin.keldysh.ru)

Lev Z. Shapiro, PhD, senior researcher of the Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS.