

# Методы машинной графики в автоматизированном проектировании

*В.А. Галактионов, зав. отделом, к.ф.-м.н.,  
А.Г. Волобой, н.с., к.ф.-м.н.,  
Институт прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН, Москва*

## 1. Введение

Наряду с научными исследованиями автоматизированное проектирование являлось одной из основных сфер применения работ по машинной (компьютерной) графике, которые ведутся в ИПМ уже более 30 лет. Графическая библиотека ГРАФОР [4], созданная в ИПМ в основном в первой половине 70-х годов прошлого века для визуализации результатов научных вычислений, нашла широкое применение в автоматизации проектных и конструкторских работ в машиностроении, авиационной промышленности, архитектуре и других областях.

Библиотека позволяла выводить на графопостроитель, а затем и на дисплей, графические примитивы (отрезок прямой, дуга окружности, алфавитно-цифровые символы) и на их базе строить графики функций. В дальнейшем библиотека пополнилась программами аффинных преобразований, штриховки, экранирования, аппроксимации и сплайн-интерполяции, программами визуализации двумерных функций (проекции поверхностей, карты изолиний, скалярные и векторные поля), программами геометрических построений и рядом других функциональностей. Графор был реализован на большинстве существующих в то время в Советском Союзе ЭВМ и операционных систем с выводом практически на все имеющиеся графопостроители и графические дисплеи. В настоящее время интерес к ГРАФОРу поддерживается в связи с его переносом в среды Windows и Unix [1].

## 2. Синтез реалистичных изображений. Физически аккуратные расчеты освещенности

С начала 90-х годов магистральным направлением развития компьютерной графики в институте стало физически аккуратное (т.е. основанное на физических законах) моделирование распространения света в различных средах. Эта задача сводится к решению задачи глобальной освещенности, когда учитывается не только прямая освещенность поверхностей сцены лучами, идущими непосредственно от источников света, но и вторичная освещенность, создаваемая лучами, отраженными или преломленными другими поверхностями.

Была построена технология на основе методов Монте-Карло и трассировки лучей, позволяющая с высокой точностью рассчитывать освещенность моделируемых сцен, строить реалистичные изображения фотографического качества.

Идея метода Монте-Карло прямой трассировки лучей [9, 5] состоит в статистическом воспроизведении механизма распространения света путем моделирования всевозможных траекторий лучей. Траектории световых частиц (фотонов) прослеживаются на всех этапах существования от момента их генерации источниками света до поглощения или выхода из сцены. При генерации световых частиц направление, в котором испускается фотон, длина волны и стартовая позиция на источнике света определяются стохастически согласно фотометрическому распределению энергии источника и его геометрической форме. Затем траектория фотона трассируется до пересечения с поверхностью объекта сцены. После чего дальнейшее поведение фотона определяется светорассеивающими свойствами поверхности.

Метод естественным образом поддерживает все типы поверхностей, включая сочетания диффузных и зеркальных свойств, а также поверхности со сложными оптическими свойствами, описываемыми двунаправленными функциями отражения (преломления) света.

Метод не зависит от положения камеры и не предусматривает вывод изображения на экран, а лишь предоставляет информацию о глобальной освещенности, которая в дальнейшем может быть использована для визуализации и синтеза изображений.

Созданные на основе этой технологии программные комплексы нашли применение в сфере архитектурного проектирования, дизайна интерьеров помещений, салонов автомобилей и самолетов, проектирования систем освещения зданий и других объектов городского строительства. При разработке архитектурных и светотехнических решений графическая система позволяет увидеть как будет выглядеть интерьер, здание или комплекс архитектурных (инженерных, скульптурных) сооружений в существующем ландшафте при различных условиях естественного или искусственного

освещения до начала их реального воплощения. Она позволяет промоделировать, например, несколько вариантов искусственного освещения и/или подбора отделочных материалов для интерьера или здания и выбрать оптимальный (рис.1).

## 2.1. Источники света. Естественное освещение

Программными комплексами поддерживаются разнообразные типы источников света, включая протяженные источники и условия естественного освещения. Точечные и протяженные источники часто описываются гониометрическими диаграммами, описывающими угловое распределение излучаемой световой энергии чаще всего в стандартном формате IESNA.

Для задания естественного освещения можно выбрать подходящий элемент из библиотеки дневного (небесного) и солнечного света. Библиотека содержит предопределенные параметры для различных географических регионов (городов) в разное время суток, например, можно выбрать



Рис.1. Примеры фотореалистичных изображений, построенных с использованием алгоритмов моделирования глобальной освещенности.

режим освещения, соответствующий естественному дневному свету в Новосибирске в 3 часа дня. Можно также с помощью редактора параметров солнечного и дневного освещения задать его в терминах географических координат, даты (времени года) и времени суток, либо в терминах положения солнца (высота над горизонтом и азимут) и освещенности в горизонтальной плоскости. В редакторе также задается степень облачности. Моделирование небесного освещения для случаев 100% облачности и ее отсутствия соответствует стандарту Международной комиссии по освещению CIE. Небесное освещение с неполной облачностью моделируется с использованием интерполяции.

## 2.2. Изображения с большим динамическим диапазоном

Другим методом задания естественного освещения в графических комплексах может служить способ, при котором источником света является изображение с большим динамическим диапазоном яркостей (БДДИ) реальных сцен, или в англоязычной литературе, HDRI – High Dynamic Range Imaging [6]. При этом источником света могут быть сфотографированные особым образом небо или помещение выставочного зала, и мы сможем увидеть как будет освещен тот или другой объект в этих условиях. Задание таких условий освещения обычными способами (набором общепринятых источников света) часто является весьма трудоемким и дорогостоящим процессом, требующим проведения пробных моделирований и корректировки источников света. В результате использования БДДИ появляется возможность интегрировать моделируемые объекты с реальным окружением. На рис. 2 показана компьютерная модель автомобиля, «встроенная» в реальный природный ландшафт. Хорошо заметны отражения окружающих деревьев на лобовом стекле, капоте и фарах автомобиля.

БДДИ получают путем специальной обработки последовательности цифровых фотографий с различной экспозицией или результатов панорамного сферического видеосканирования.

При этом, однако, возникают проблемы, связанные с отображением изображений с большим динамическим диапазоном яркостей в диапазон яркостей, который может быть воспроизведен на стандартных мониторах и принтерах. Динамический диапазон таких устройств (порядка 100:1) существенно уже (иногда на несколько порядков), чем диапазон яркостей реального мира. С этой целью был разработан специальный оператор сжатия (Tone Mapping Operator) [3], который позволяет эффективным образом выполнять такое отображение без потери детальности изображения, с сохранением локального контраста и в отсутствие артефактов. На рис. 3 приведен пример изображения с динамическим диапазоном, превышающим 100 000:1, которое было получено с использованием этого оператора.



Рис.2. Использование изображения с большим динамическим диапазоном яркостей в качестве источника освещения для компьютерной модели автомобиля.



Рис.3. Пример изображения с большим динамическим диапазоном, полученного с использованием разработанного оператора сжатия.

### 2.3. Интернет-сервис синтеза реалистичных изображений

В настоящее время широкое распространение получила практика представления продуктов, изделий, технологий на сайтах Интернет. При этом нередко возникает необходимость изображать объекты при заданных пользователем условиях освещения, окружения или фоновой сцены, опциях внешней или внутренней отделки изделий и др. Как правило, в Web-страницах подобного рода используются подготовленные заранее высококачественные фотографии или изображения, полученные в результате моделирования. Очевидно, что презентации были бы более содержательными и информативными, если предоставить средства для динамического моделирования и синтеза изображений непосредственно в процессе Интернет-сеанса.

Для получения высококачественных изображений используются сцены с высокой степенью детализации геометрии, тщательно подобранными (или даже измеренными) свойствами поверхностей и источников света. Создание таких сцен может занимать недели работы высококвалифицированного персонала, и обычно они являются объектом собственности, не подлежащим свободному распространению. С этой точки зрения важно, чтобы детальное описание самих сцен не передавалось за пределы предоставляющего их Web-сайта.

Была разработана технология и создан программный комплекс, позволяющий создавать активные Интернет-презентации, где посетитель сайта сам может выбрать всевозможные опции визуализации, моделировать сцену, а соответствующие изображения синтезируются в процессе сеанса работы в Интернет [2]. Одно из естественных приложений программного комплекса - это средство предоставления Интернет-сервисов дизайна интерьеров или светотехнического проектирования (рис.4).



Рис.4. Пример физически аккуратной визуализации сцены, выполненной с помощью созданного Интернет-сервиса (с разрешения фирмы Thomas & Gilles GmbH).

Ключевым требованием к подобному программному комплексу является то, что фотореалистическое качество генерируемых изображений должно быть получено в результате физически аккуратного моделирования распространения света. Для получения качественных и достоверных изображений существенна также высокая степень точности и детализации описания геометрии, источников света, оптических свойств материалов в используемых сценах. Такой подход, естественно, требует больших вычислительных затрат при моделировании. В то же время, в условиях доступа к приложениям через Интернет критически важным является обеспечение разумного времени отклика, а это значит, что вычисления должны выполняться достаточно быстро. Достижение этих двух существенно противоречащих друг другу целей потребовало значительных усилий по выработке и реализации соответствующих архитектурных, алгоритмических и программных решений.

### 3. Моделирование сложных оптических систем

Созданная технология расчета распространения света оказалась столь эффективной и точной, что позволила сделать следующий шаг и перейти к моделированию и инженерному проектированию сложных оптических светопроводящих и осветительных систем, таких как жидкокристаллические панели, волоконнооптические устройства, автомобильные фары и приборы и др. На рис.5-а и 5-б показаны схемы одного из таких устройств – системы подсветки жидкокристаллического монитора. Как правило, компоненты таких приборов имеют достаточно сложные оптические свойства и геометрию, включая поверхности с микроструктурами и микрорельефами. Принцип работы таких устройств основан на эффекте полного внутреннего отражения. Для их моделирования практически невозможно использовать обычные детерминистические методы лучевого расчета распространения света, применяемые для расчета линзовых оптических систем. Наиболее эффективным и физически точным подходом в этом случае является трассировка лучей, основанная на методе Монте-Карло.

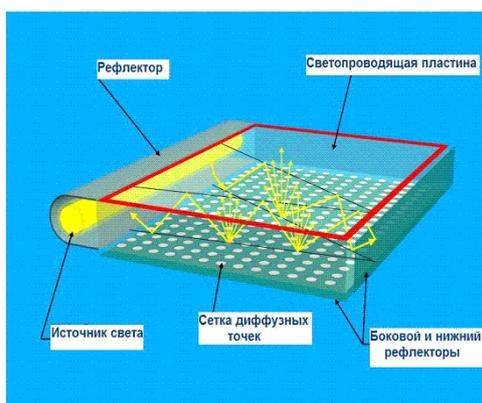


Рис.5-а. Схема системы подсветки жидкокристаллического монитора, построенная на основе акриловой светопроводящей пластины с сеткой диффузных точек.

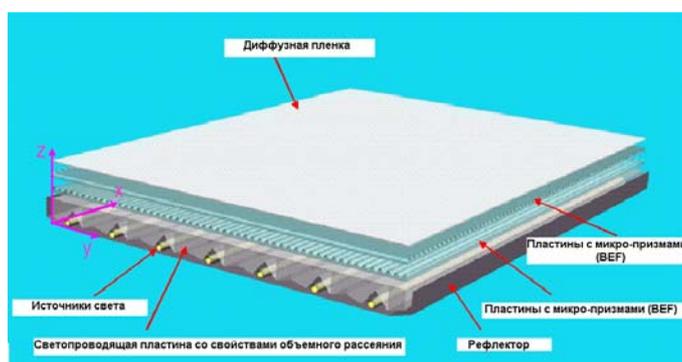


Рис.5-б. Схема системы подсветки жидкокристаллического монитора, построенная на основе светопроводящей пластины с высоким уровнем объемного рассеяния.

Процесс проектирования подобных устройств как правило складывается из следующих составляющих:

- проектирование источников света (как правило, люминисцентные лампы или светодиоды) и рефлекторов для получения максимального светового потока на входе в светопроводящую пластину (СПП);

- проектирование структуры сетки диффузных точек или микроэлементов на нижней, рассеивающей части СПП для получения пространственно равномерного распределения света над ее выходной (верхней) гранью (рис. 5-а); или моделирование оптимальной формы СПП в случае использования материалов с высоким уровнем объемного рассеяния света (HSOT полимеров), как показано на рис. 5-б;
- проектирование одного или нескольких призматических слоев (BEF) для концентрации и усиления светового потока на выходе жидкокристаллического экрана;
- проектирование диффузного и/или поляризационного фильтра (пленки) для еще большего усиления яркости экрана.

Таким образом, конечной целью моделирования подобных систем является расчет пространственного и углового распределений яркости света над выходной гранью устройства. Задача заключается в том, чтобы максимизировать яркость на выходе и сделать ее максимально равномерной.

### 3.1. Поверхности с микрорельефом и микроструктурами

Одной из больших проблем при проектировании и расчетах систем подсветки жидкокристаллических панелей является то, что при их проектировании используются элементы с чрезвычайно сложными оптическими свойствами, такие как поверхности с микрорельефами и микроструктурами. Они могут представлять собой как шероховатые («грубо обработанные») поверхности, так и поверхности с миллионами, миллиардами и триллионами регулярно или стохастически распределенных микроэлементов.

В разработанной системе [7] шероховатые поверхности могут задаваться двояким образом: либо явно - распределением высот микрорельефа в узлах регулярной сетки, которые могут быть непосредственно измерены 3D сканером, либо неявно – распределением плотности нормалей микрограней (рис.6).

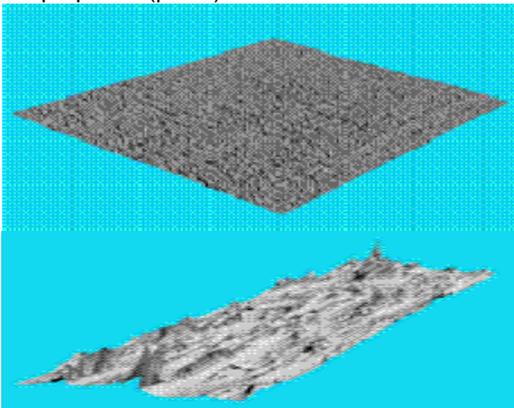


Рис.6. Примеры «шероховатых» поверхностей, использованных при проектировании системы подсветки автомобильной магнитолы.

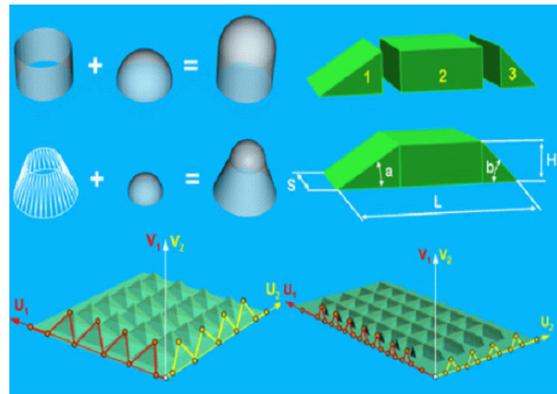


Рис.7. Иллюстрация возможных способов построения элементов микрогеометрии.

Поверхности с элементами микрогеометрии (микро-призмы, микро-бороздки и др.), строятся с помощью операций CSG над примитивными формами: плоскостью, цилиндром, сферическим сегментом, параллелепипедом, конусом, тором, пирамидами, треугольной сеткой и пр., или путем комбинирования других микро-призм и микро-бороздок (например, их CSG пересечением). Примеры возможных способов построения микроэлементов показаны на рис. 7.

Как уже упоминалось, элементы микрогеометрии могут распределяться в пространстве:

- стохастически, когда их положение (и, возможно, размер и ориентация) определяются случайным образом и только плотность распределения контролируется пользователем; или
- детерминистически, когда положение, размеры, ориентация и другие параметры каждого такого элемента явно задаются пользователем (например, как периодическая структура дифракционной решетки).

В зависимости от сложности используемых микроэлементов и выбранного распределения допустимое количество элементов микрогеометрии может варьироваться от десятков миллионов до миллиардов и триллионов. Более того, допускается смешение микроэлементов различных типов с разной ориентацией в пространстве. Пример такой микроструктуры показан на рис.8.

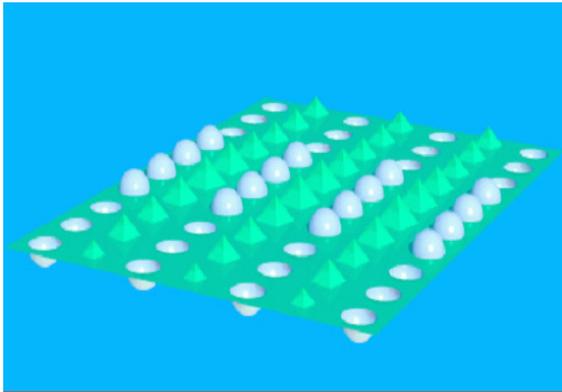


Рис.8. Комбинация различных типов микроэлементов на одной поверхности с микроструктурой.

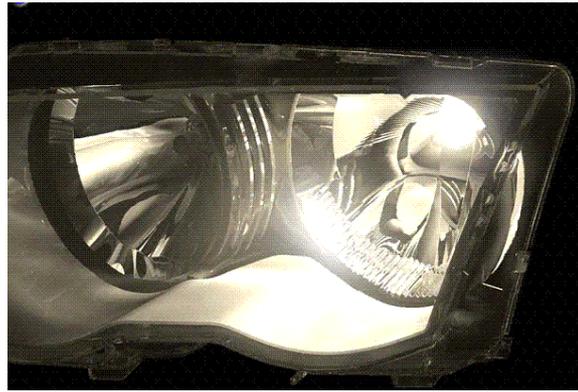


Рис.9. Визуализация компьютерной модели автомобильной фары (с разрешения фирмы *Thomas & Gilles GmbH*)

### 3.2. Моделирование осветительных систем

Как отмечалось выше, разработанные программные комплексы позволяют проектировать не только светопроводящие, но и осветительные системы, такие как фары и фонари автомобилей, прожекторы и др. Основными целями моделирования и дизайна осветительных систем являются создание максимально эффективного светового потока в определенном направлении. Параметрами дизайна, в основном, бывают форма рефлектора, материал из которого он создан, вид и форма непосредственно источника света (лампы).

На рис.9 показано изображение автомобильной фары, спроектированной с использованием созданной системы. В данном случае важным также являлась равномерность распределения интенсивности светового потока. Результаты компьютерного моделирования этой фары полностью совпали с измеренным световым потоком реального устройства.

## 4. Моделирование и визуализация оптически сложных материалов

Еще одним направлением, получившим развитие в последние годы, стало моделирование и визуализация новых оптически сложных материалов, таких как многослойные краски со сложной микроструктурой (типа перламутровых и «металлик»). Внешний вид таких материалов зависит от угла зрения и направления освещения. Разработанные программные средства позволяют моделировать и визуализировать краски, состоящие из плоскопараллельных однородных слоев, каждый из которых составлен из прозрачного лака и взвешенных в нем пигментных частиц и интерференционных чешуек (рис.10) [8].

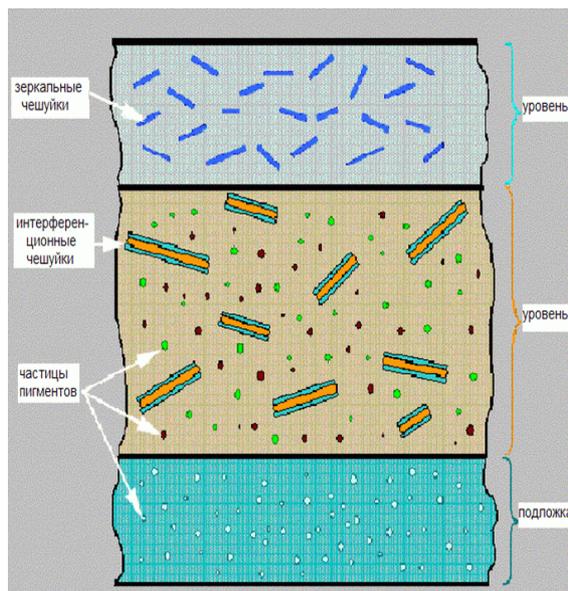


Рис.10. Схема используемой модели краски (поперечное сечение).

Цвет таких красок зависит от угла зрения и направления освещения. Он может резко меняться («переключаться») даже при плавном изменении этих углов. Светорассеивающие свойства таких красок не могут быть заданы скаляр-ными коэффициентами, а требуют более сложного описания с помощью двунаправленных функций отражения (преломления) света (ДФО/ДФП).

На рис. 2 и 11 показаны изображения модели автомобиля, окрашенной краской с ДФО компонентой, при естественном освещении, заданном с помощью БДДИ (разд.2). Если нужной краски с ДФО нет в имеющейся библиотеке красок, новая краска может быть составлена путем вариаций компонент существующей краски, таких как глянец, металлический эффект, интенсивность.

Система позволяет на основе модели двухслойной краски решать задачу восстановления состава краски по ее визуальным (оптическим) характеристикам (цвет, структура, размер и качество глянца при заданном освещении, плотность и размер чешуек и др.), и наоборот, по физико-химической композиции самой краски (тип применяемого металлического порошка, его плотность, ориентация чешуек, свойства наполнителя и пр.) рассчитать оптические параметры краски и ее визуальные характеристики.



Рис.11. Изображение компьютерной модели автомобиля, окрашенной краской с ДФО компонентой, при естественном освещении, задаваемом изображением с большим динамическим диапазоном.

В результате специалист-дизайнер получает возможность проектировать новые композиционно возможные краски в интерактивном режиме, манипулируя исключительно ее визуальными атрибутами и параметрами (которые естественно зависят также от формы поверхности и условий освещения). На выходе системы он получает композиционную информацию о краске, необходимую для ее опытного производства.

И наоборот, внешний вид краски при том или ином освещении можно смоделировать, основываясь на известной информации о ее составе. Технолог получает возможность проектировать и визуально контролировать в интерактивном режиме влияние вносимых им изменений в композицию экспериментального образца краски до начала ее реального изготовления.

## Заключение

В работе дан краткий обзор ряда работ отдела компьютерной графики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, связанных с задачами синтеза реалистичных изображений, моделирования сложных оптических устройств и оптически сложных материалов.

Работа выполнялась при поддержке гранта Президента РФ «Ведущие научные школы» РИ-112/001/278.

## Литература

1. С.Б.Базаров, Ю.М.Баяковский, Ф.Ф.Сейдалиева, А.Ю.Скачков. Адаптация комплекса графических программ ГРАФОР в операционных системах WINDOWS и LINUX. *Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша РАН*, № 27, 2002 г.
2. Б.Х.Барладян, А.Г.Волобой, Н.И.Вьюкова, В.А.Галактионов, Н.Б.Дерябин. Моделирование освещенности и синтез фотореалистичных изображений с использованием Интернет технологий. *"Программирование"*, № 5, 2005.
3. Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов. Эффективный оператор сжатия динамического диапазона яркостей. *"Программирование"*, № 5, 2004, с.35-42.

4. Баяковский Ю.М., Галактионов В.А., Михайлова Т.Н. Графор. Графическое расширение фортрана. М.: Наука, 1985.
5. А.Г.Волобой, В.А.Галактионов, К.А.Дмитриев, Э.А.Копылов. Двухнаправленная трассировка лучей для интегрирования освещенности методом квази- Монте Карло. "Программирование", № 5, 2004, с.25-34.
6. Debevec, P. E., Malik, J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, AddisonWesley, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, 1997, pp. 369–378.
7. Ershov S., Zhdanov D. Efficient application of Optical Objects in light simulation software. Proc. *15-th International Conference on Computer Graphics and Vision - GraphiCon-2005*, Novosibirsk, 2005, p.284-292.
8. Ershov S., Khodulev A., Kolchin K. Simulation of sparkles in metallic paints. Proc. *GraphiCon'99 - The 9-th International Conference on Computer Graphics and Vision*, Moscow, 1999, pp.121-128.
9. Khodulev A., Kopylov E. Physically accurate lighting simulation in computer graphics software. Proc. *GraphiCon'96 - The 6-th International conference on Computer Graphics and Visualization*, St.Petersburg, 1996.