

Российская академия наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша

На правах рукописи

Волобой Алексей Геннадьевич

**Программные технологии автоматизации
построения реалистичных изображений**

Специальность 05.13.11 – математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант –
доктор физико-математических наук
профессор В.А. Галактионов

Москва – 2012

Содержание

Введение	7
Базовые алгоритмы генерации реалистичных изображений	18
Глава 1. Методы автоматизации задания объектов цифровой модели сцены	37
1.1. Автоматизация задания геометрии сцены	37
1.1.1. Конвертация геометрии из распространенных САПР форматов	37
1.1.2. Интеграция с системами автоматизированного проектирования	39
1.1.3. Интеграция с 3DS Max	42
1.1.4. Интеграция с CATIA.....	45
1.1.5. Результаты	49
1.2. Автоматизация задания источников освещения	49
1.2.1. Спецификация источников света	50
1.2.2. Измерение источников и построение их моделей.....	53
1.2.3. Поддержка распространенных форматов.....	56
1.2.4. Результаты	60
1.3. Освещение, задаваемое изображением	61
1.3.1. Изображение с большим диапазоном яркостей.....	61
1.3.2. Создание карт освещения.....	64
1.3.3. Обработка ярких источников света в карте освещения	68

1.3.4. Анализ карт освещения	69
1.3.5. Пути компенсации некорректностей карт освещения	73
1.3.6. Результаты	77
1.4. Автоматизация задания фонового изображения	78
1.4.1. Технология фотомонтажа.....	80
1.4.2. Использование карт освещения в качестве фона	83
1.4.3. Результаты	89
1.5. Выводы.....	90
Глава 2. Методы автоматизации задания оптических характеристик	
объектов и поверхностей сцены	93
2.1. Измерительный комплекс для определения светорассеивающих	
свойств поверхности.....	96
2.1.1. Описание комплекса для измерения ДФО/ДФП	
светорассеивающих свойств поверхностей.....	100
2.1.2. Программная часть комплекса измерений	107
2.1.3. Сравнение с существующими измерительными комплексами.	111
2.1.4. Примеры использования	115
2.1.5. Результаты	119
2.2. Моделирование светорассеивающих свойств поверхности ткани....	120
2.2.1. Характеристики текстильных нитей	122
2.2.2. Расчет оптических свойств нити	123
2.2.3. Расчет ДФО ткани	130
2.2.4. Краткое описание механизма верификации подхода.....	131

2.2.5. Сравнение рассчитанных и измеренных данных	133
2.2.6. Результаты	137
2.3. Выводы.....	137
3. Методы автоматизации задания светоотражающих свойств оптически сложных покрытий	139
3.1. Вычисление оптических свойств многослойных красок.....	140
3.1.1. Существующие решения.....	140
3.1.2. Расчет оптических свойств многослойной краски	142
3.1.3. Структура программного комплекса интерактивного моделирования красок.....	146
3.1.4. Опыт моделирования реальных автомобильных красок	149
3.1.5. Результаты	154
3.2. Моделирование ДФО поверхности, покрытой красящим слоем с высокой концентрацией частиц	155
3.2.1. Постановка задачи моделирования красящего слоя с высокой концентрацией частиц	156
3.2.2. Генерация геометрии красящего слоя	159
3.2.3. Решение задачи дифракции	164
3.2.4. ДФО красящего слоя, расположенного на Ламбертовской подложке	166
3.2.5. Структура программного комплекса расчета красящего слоя с высокой концентрацией пигмента	167
3.2.6. Примеры моделирования чернил	170

3.2.7. Результаты	177
3.3. Выводы.....	178
Глава 4. Повышение производительности генерации реалистичных изображений	180
4.1. Использование графических ускорителей	182
4.1.1. Реалистичная визуализация в реальном времени с применением OpenGL.....	182
4.1.2. Визуализация результатов моделирования освещенности.....	184
4.1.3. Оптимизация качества текстур.....	188
4.1.4. Результаты	191
4.2. Реалистичная визуализация когерентной трассировкой лучей	192
4.2.1. Архитектура базовой системы визуализации	195
4.2.2. Когерентная трассировка лучей	196
4.2.3. Оптические свойства материалов и ДФО.....	199
4.2.4. Источники света.....	203
4.2.5. Оператор сжатия динамического диапазона яркости	204
4.2.6. Результаты	205
4.3. Длительная генерация изображения.....	207
4.3.1. Интернет-приложение построения реалистичного изображения	207
4.3.2. Методы достижения приемлемого времени отклика.....	211
4.3.3. Генерация реалистичного изображения в фоновом режиме.....	216

4.3.4. Прогнозирование времени расчета, необходимого для достижения заданной точности вычислений	220
4.3.5. Результаты	224
4.4. Выводы.....	225
Заключение	227
Список литературы.....	228
Список используемых аббревиатур.....	247

Введение

Компьютерная (машинная) графика¹ изначально зародилась как эффективное и мощное средство связи между человеком и вычислительной машиной. Использование графической формы представления информации, организация диалога между человеком и компьютером с использованием визуальных образов позволили существенно увеличить скорость обработки информации человеком, что привело к повышению эффективности исследований и разработок в самых различных областях науки и техники.

Однако с появлением методов синтеза реалистичных изображений, основанных на физически корректном моделировании распространения света, область применения компьютерной графики существенно расширилась. Созданные алгоритмы и программные средства стали представлять интерес для использования в архитектуре, градостроительстве, проектировании систем освещения, в автомобильной и авиационной промышленности и др.

Рассмотрим несколько примеров практических задач, связанных с построением физически корректных реалистичных изображений, с которыми автор сталкивался в своей работе. Все приведенные ниже изображения были сгенерированы с помощью программных систем компьютерной графики, разработанных в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН при непосредственном участии и/или под руководством автора [1, 2].

Архитектура и ландшафтный дизайн. Архитектура была одной из первых областей применения генерации реалистичных изображений виртуальных сцен. Это связано с относительной простотой виртуального представления архитектурных объектов в памяти, что в свою очередь

¹ Изначальное название «машинная графика» является уже несколько устаревшим, поэтому в данной работе автор будет употреблять только более современное название «компьютерная графика».

снижает требования к ресурсам компьютера. При сильном упрощении здания могут быть представлены прямоугольниками или многогранниками, стены, этажные перекрытия – плоскостями. Практически отсутствуют криволинейные поверхности.

Предварительные расчеты освещения и построение реалистичного изображения виртуальной модели существенно повышают эффективность проектирования и строительства зданий. С помощью таких расчетов заранее возможно определить и согласовать с заказчиком архитектурного проекта следующие факторы:

1. Эстетичность разрабатываемых архитектором интерьеров помещений и внешнего вида, насколько проектируемое здание «вписывается» в существующий ландшафт. Любая переделка или модификация после начала строительства всегда будет стоить дороже. На рис. В1 представлен внешний вид планируемого здания гостиницы, «вписанный» в существующий ландшафт, а на рис. В2 – возможный интерьер одного из его помещений.



Рис. В1. Планируемое здание гостиницы.



Рис. В2. Интерьер холла проектируемой гостиницы.

2. В последние годы важным аспектом строительства любого здания является экономичность (энергосбережение) его системы освещения. Основываясь на точных расчетах освещения помещений дневным и солнечным светом, архитектор может варьировать положение и ориентацию здания относительно сторон горизонта и окружающих строений, расположение и размеры оконных проемов, лоджий и т.д. Основной целью при этом дизайне является максимальное использование естественного света (создаваемого солнцем и небом) для достижения комфортного освещения помещения при минимальных энергетических затратах на его искусственное освещение. На рис. В3 показана проектируемая комната. Видно, что солнечного света вполне достаточно для освещения помещения, и как будет выглядеть интерьер при тех или иных применяемых материалах при заданном времени суток.



Рис. В3. Расчет освещения проектируемого помещения.

3. При проектировании офисных помещений освещенности рабочих мест должны соответствовать существующим стандартам, в которых указаны не только минимально допустимые величины освещенности, но и такие параметры, как доля прямого света от источника в поле видимости человека («комфортность» освещения). Для эффективной проверки соответствия стандартам рассчитанная освещенность может быть представлена в виде световой карты. Световая карта – это такое же реалистичное изображение виртуальной сцены, но только физические значения освещенности представлены в ней заданными цветами («псевдо-цветами»). Правильное задание соответствия значений освещения определенному цвету позволяет сразу увидеть соответствие разрабатываемого проекта стандартам. Пример такой световой карты представлен на рис. В4.

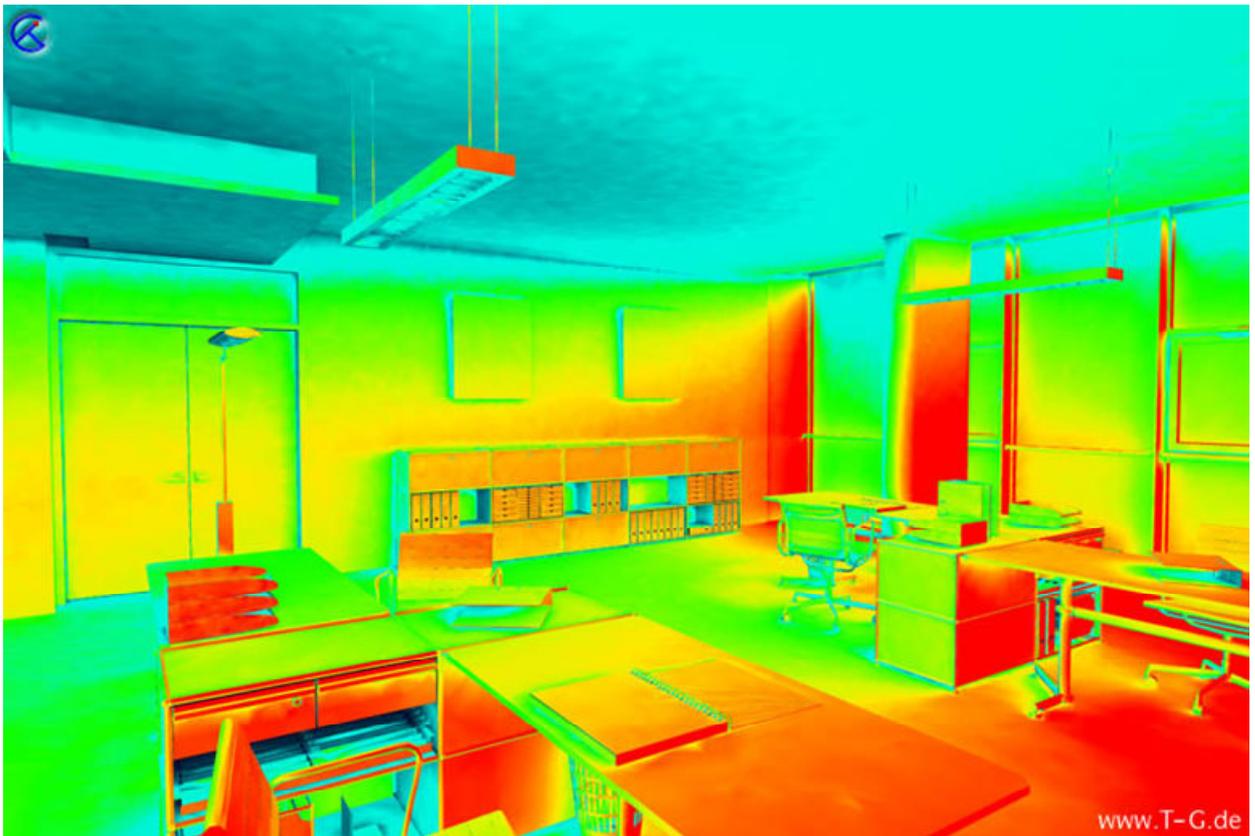


Рис. В4. Распределение освещенности, представленное световой картой.

Таким образом, система реалистичной компьютерной графики становится эффективным инструментом проектировщика, позволяющим еще на этапе создания проекта предложить и проверить ряд архитектурных решений.

Автомобильная промышленность. Алгоритмы реалистичной визуализации, используемые в автомобильной промышленности, значительно сложнее тех, что сначала были разработаны для архитектурных приложений. Основными факторами здесь являются

- наличие большого числа криволинейных поверхностей, обычно представляемых в виде сплайнов в системах САПР;
- сложные оптические свойства поверхностей; для примера достаточно сравнить внешний вид автомобильной краски «металлик», цвет которой меняется в зависимости от направления наблюдения, и стен здания, которые в большинстве случаев являются практически диффузными.

Однако и класс задач, в решении которых применяются алгоритмы компьютерной графики, в автомобильной промышленности значительно шире. Приведем некоторые из них.

1. Задача расчета освещения салона автомобиля является схожей с задачей расчета освещения интерьеров помещений. Здесь также важными факторами являются как эффективность освещения, так и соответствие освещенности принятым стандартам. На рис. В5 проиллюстрирован процесс моделирования освещенности автомобиля, при котором рассчитывается освещенность рабочего места водителя при разных вариантах подсветки для чтения.

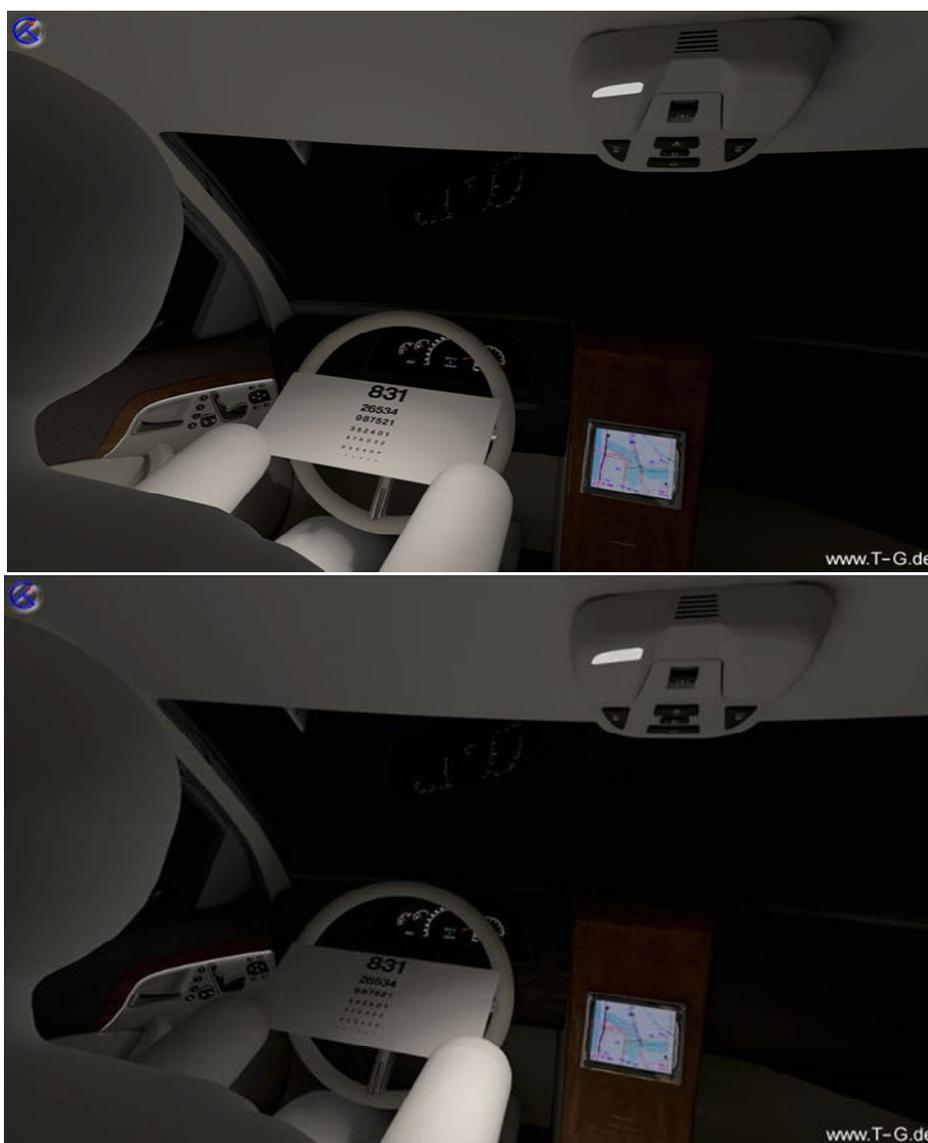


Рис. В5. Два варианта освещенности салона автомобиля.

2. Важным 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») в автомобильной промышленности. 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.

На рис. В6 представлен автомобиль, окрашенный такой краской, при солнечном освещении. Цвет этих красок зависит от угла зрения и направления освещения. Он может резко меняться («переключаться») даже при плавном изменении этих углов.



Рис. В6. Автомобиль, окрашенный оптически сложной краской, при солнечном освещении.

Светорассеивающие свойства таких красок не могут быть заданы скалярными коэффициентами, а требуют более сложного описания с помощью двунаправленных функций отражения света. Другим аспектом визуального восприятия краски является различное освещение, она выглядит различно утром и в середине дня, при солнечной или пасмурной погоде.

Гораздо дешевле смоделировать на компьютере внешний вид краски и исследовать ее при различных условиях освещения (дневной, солнечный свет, искусственное освещение), чем произвести опытную партию краски и покрасить ею реальный автомобиль. В настоящее время такой подход к моделированию красок применяется не только в автомобильной промышленности, но и для окраски большого спектра других товаров (мобильные телефоны, персональные компьютеры, бытовая техника и пр.)

3. Важным аспектом безопасности является отсутствие бликов и отражений салона в стеклах автомобиля. На рис. В7 показана визуальная оценка нежелательных отражений, которые получаются при заданных параметрах материалов и геометрии салона автомобиля.



Рис. В7. Визуальная оценка нежелательных отражений в боковом стекле автомобиля.

4. В современных условиях, когда автомобильный рынок перенасыщен, и каждая фирма вынуждена бороться за покупателя, модификация внешнего вида автомобиля становится практически ежегодной. Одним из наиболее выигрышных элементов являются фары. Поэтому использование инструментов компьютерной графики для разработки внешнего вида как включенных, так и выключенных фар, в дневное и ночное время позволяет существенно снизить затраты и ускорить разработку очередной модификации автомобиля или мотоцикла. На рис. В8 представлены внешний вид разрабатываемой фары в выключенном состоянии при дневном освещении, а также ее восприятие глазом человека, т.е. с учетом психофизиологических особенностей глаза, при включенном ближнем свете днем, вечером и ночью.

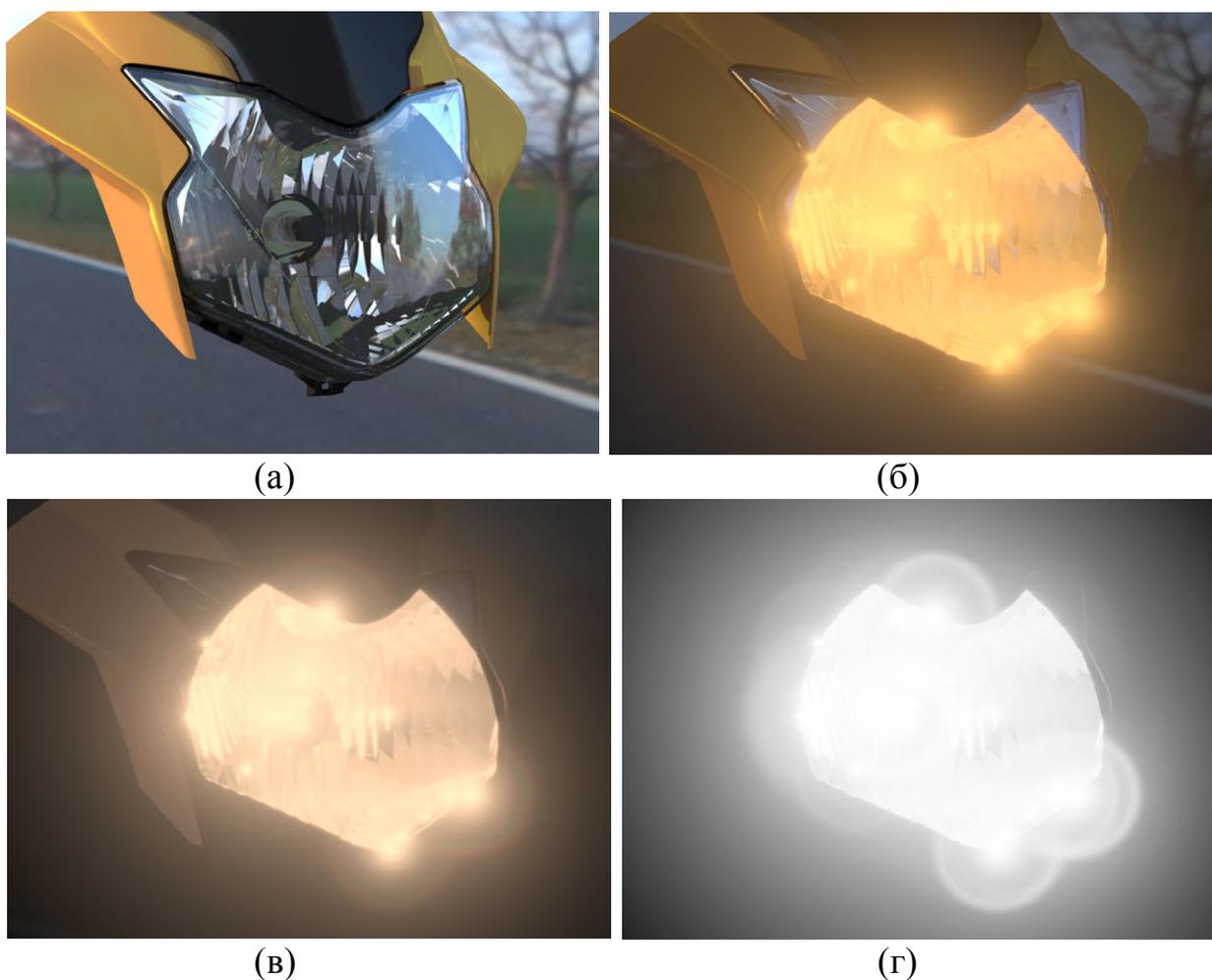


Рис. В8. Внешний вид фары (а), а также восприятие ее глазом человека во включенном состоянии (ближний свет) при дневном освещении (б), в сумерках (в) и ночью (г).

Кроме внешнего вида при моделировании фар также проверяется на соответствие стандартам направление и яркость получаемого светового луча.

Аналогичным образом производится также моделирование задних фонарей, стоп-сигналов и поворотных огней. При этом важным является правильная цветопередача красных и желтых фонарей или стекол лампочек.

Авиационная промышленность. Как и при визуализации автомобиля, в модели салона самолета мы сталкиваемся с большим числом криволинейных поверхностей, материалов и тканей со сложными оптическими свойствами, которые покрывают значительную часть элементов салона. Главной особенностью моделирования освещения салона самолета является практически полное отсутствие прямого света. Правильно рассчитать освещение здесь возможно только с использованием алгоритмов глобального освещения.

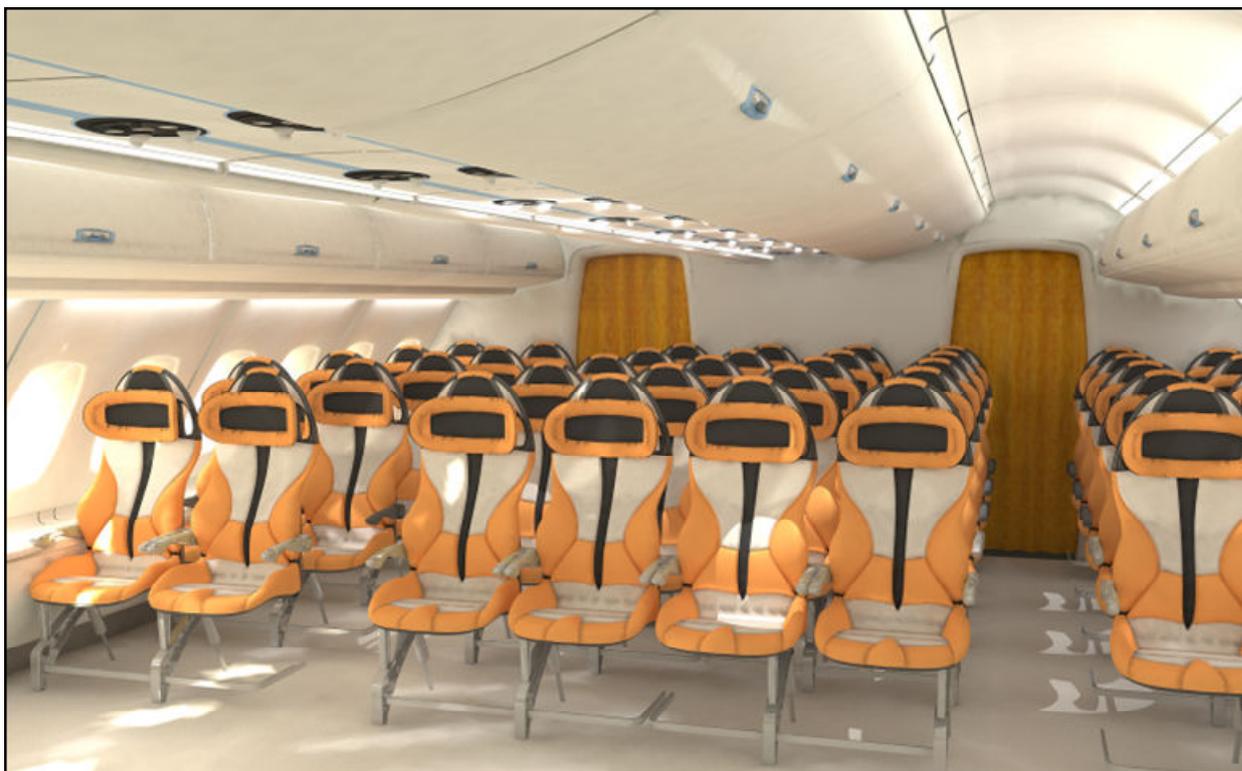


Рис. В9. Виртуальная модель компоновки и внутренней отделки салона самолета Airbus A-380.

По словам представителя фирмы Boeing разработка и создание внутренней отделки пассажирского самолета составляют до 60% его стоимости. Во многих случаях фирма строит прототип салона в натуральную величину, показывает представителям авиакомпаний-заказчиков, и затем модифицирует в соответствии с замечаниями. И только после утверждения прототипа он будет реализован в воздушном лайнере. Компьютерное моделирование освещения и реалистичная визуализация салона позволяет существенно сократить затраты. На рис. В9 показана модификация салона самолета Airbus A-380, созданная дизайнерами с использованием системы реалистичной визуализации еще во время его начальной разработки.

Важным критерием проектирования кабины пилотов является хорошая читаемость приборов и устройств управления при различном освещении.



Рис. В10. Кабина самолета Boeing при солнечном свете (вверху), при облачности (в середине) и ночью (внизу).

На рис. В10 показан вариант компьютерного дизайна кабины самолета Boeing при солнечном и пасмурном дневном свете, а также ночью.

Следует подчеркнуть, что все вышеперечисленные задачи можно решать, только если моделирование основано на физических законах распространения света и позволяет достичь приемлемой точности. Или, другими словами, если реалистичное изображение, сгенерированное компьютером по виртуальному описанию, будет соответствовать восприятию реальности человеком.

Базовые алгоритмы генерации реалистичных изображений

Под понятием *реалистичности* изображений будем понимать близость восприятия синтезированных изображений с восприятием фотографий, т.е. именно фотореалистичность является первым критерием качества синтеза изображений в нашем случае. Мы также будем рассматривать в качестве второго критерия близость рассчитанных физических значений освещенности (или яркости) значениям, либо измеренным (если реальный прототип виртуальной сцены был создан), либо теоретически рассчитанным, что возможно сделать для отдельных, упрощенных случаев. Второй критерий также необходим нам, если мы намерены использовать свои программные системы для задач проверки соответствия стандартам освещения.

«Близость» рассчитанных и теоретических данных – понятие достаточно размытое. Понятно, что расхождение в разы является неудовлетворительным. А вот достаточно ли ошибки в 10-15%? Или даже 2% неприемлемо? Этот вопрос не имеет однозначного ответа, т.к. глаз человека по-разному воспринимает одну и ту же разницу освещенности для светлых и темных цветов, для больших видимых площадей и для отдельных точек. В итоге для разных приложений мы имеем разные пороговые значения

приемлемости точности результатов. Однако для большинства перечисленных выше задач расхождение вычисленных результатов и реальных величин порядка 5-10% можно считать вполне допустимым, и в таком случае можно полагаться на результаты компьютерного моделирования.

Генерацией *реалистичного изображения* будем называть процесс физически корректного моделирования распространения света в виртуальной сцене и последующего отображения результата на плоскость и в цвета графического монитора. Схематично этот процесс изображен на рис. В11.

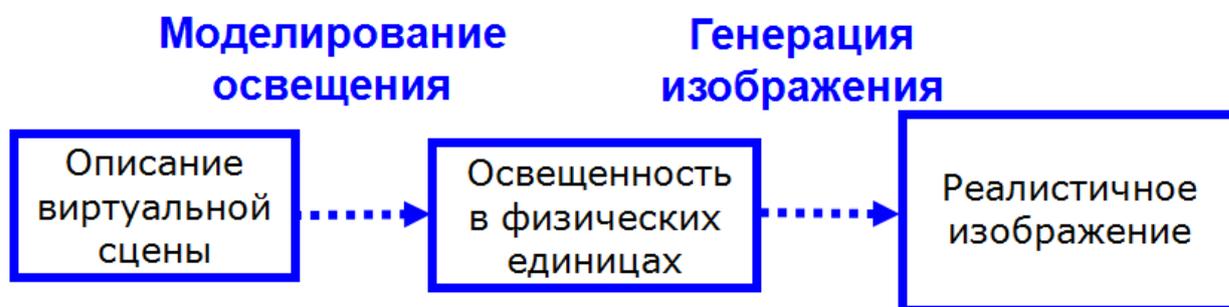


Рис. В11. Процесс генерации изображения.

Моделирование будем называть *физически корректным*, если методы моделирования основаны на физических законах распространения света в различных средах и взаимодействия света с объектами. С помощью физически корректного моделирования можно получить реалистичное изображение, если методы моделирования правильно учитывают физические законы, влияющие на распространение света и формирование изображения фотографическим способом или глазом человека.

Моделирование распространения света

В основе моделирования распространения света лежат законы геометрической оптики: закон прямолинейного распространения света, принцип обратимости (именно этот принцип позволяет моделировать

распространение света как в прямом направлении – от источника света, так и в обратном – от глаза наблюдателя), законы отражения и преломления света.

Распространение света рассчитывается с помощью алгоритма *трассировки лучей*, предложенного впервые в работе Whitted [3]. В этом алгоритме происходит трассировка луча от глаза наблюдателя через каждую точку экрана, называемую пикселом (от англ. pixel – picture element) до пересечения его с объектом сцены. Классической трассировке лучей соответствует модель точечной камеры. Она основана на предположении, что размер устройства, воспринимающего световую энергию (например, глаз или объектив камеры), можно считать бесконечно малым по сравнению с расстояниями до объектов сцены. В этом случае для каждой точки экрана можно однозначно указать телесный угол и найти поверхности, пересекаемые этим телесным углом, т.е. видимые через эту точку. В общем случае яркость данной точки определяется усреднением яркостей всех поверхностей, видимых через нее. В простейшем случае мы просто рассматриваем один луч, проходящий через середину точки экрана.

Луч трассируется в *обратном* к распространению света направлении: от наблюдателя к источнику света, что было предложено еще в 1968 году [4]. В понятие *трассировки* вкладывается нахождение пересечения луча с ближайшим объектом. В точке взаимодействия луча с объектом рассчитывается ее яркость в зависимости от освещенности точки и свойств поверхности пересеченного объекта [5, 6]. Вычисление освещенности точки требует трассировки лучей, направленных на источники света, и порождающих (преломленных сквозь объект и отраженных от него) лучей. С помощью луча на источник света определяется, освещена ли точка данным источником или находится в тени, если между точкой и источником присутствует непрозрачный объект. Для определения интенсивности порождающих лучей они должны быть протрассированы вместе со своими порождающими и так далее. Направления отраженных и преломленных лучей строго определены законами геометрической оптики. Поэтому этот

метод называется обратной детерминистической трассировкой лучей [7]. Метод правильно рассчитывает *первичное* освещение (т.е. прямое освещение от источника света), тени и отражения в зеркальных поверхностях. Он формирует итоговое реалистичное изображение, т.е. отображает рассчитанную освещенность на плоскость экрана монитора. Метод проиллюстрирован на рис. В12.

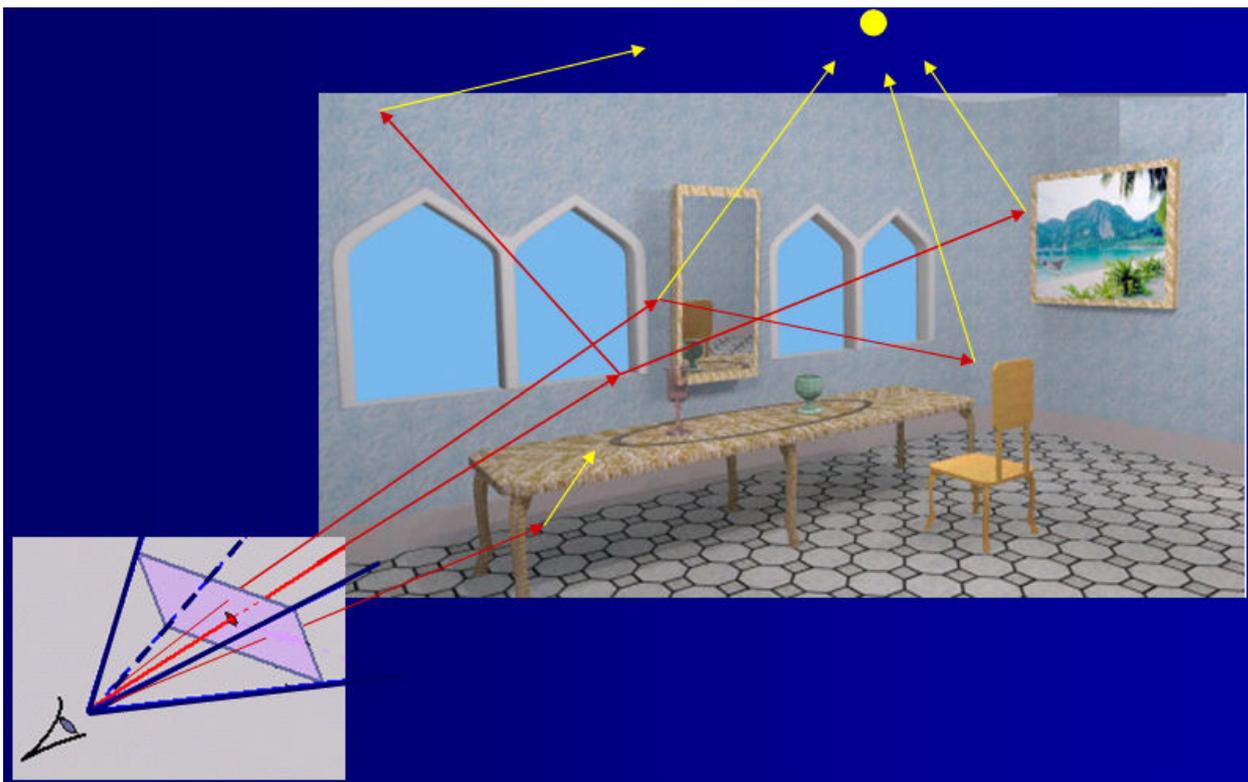


Рис. В12. Метод обратной трассировки лучей. Красные стрелки показывают лучи света и их порождающие, которые необходимо трассировать для получения интенсивности пиксела экрана. Желтые стрелки показывают лучи, направленные на источник света (желтый кружок вверху). С их помощью определяется первичное освещение точки.

Однако метод является исключительно неэффективным, если в сцене встречаются большие площадные источники света, одним из ярких примеров которых является небесная полусфера. Стандартный путь представления площадных источников в виде набора точечных приводит к тому, что в сцене появляются тысячи (а иногда и сотни тысяч) вспомогательных источников. В соответствующей пропорции падает и скорость генерации изображения.

Для таких сцен эффективнее использовать стохастическую (Монте-Карло) обратную трассировку лучей. В этом методе луч также трассируется через пиксел до пересечения с объектом, однако освещенность точки пересечения рассчитывается с помощью набора лучей, выпущенных из данной точки стохастическим образом в направлении площадного источника (или небесной полусферы в случае расчета естественного освещения). Так как в большинстве случаев достаточно несколько сотен лучей, чтобы получить верную оценку освещенности точки, то обратная стохастическая трассировка лучей получается на порядки более быстрой, чем детерминистическая. Метод Монте-Карло обратной трассировки лучей также формирует итоговое реалистичное изображение. Он проиллюстрирован на рис. В13.

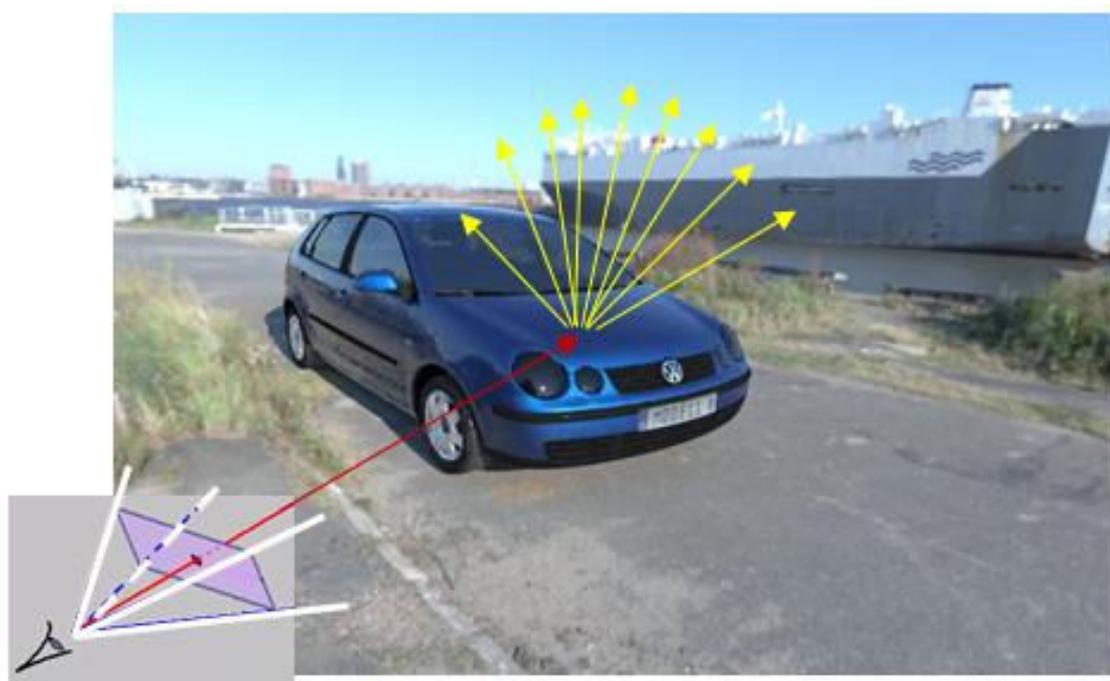


Рис. В13. Обратная Монте-Карло трассировка лучей.

Задача физически корректного моделирования распространения света 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. Модель распространения света, принятая в большинстве методов генерации физически корректных изображений, описывается *уравнением рендеринга* [8, 9]. Уравнение действует в рамках геометрической оптики и не позволяет моделировать явления, обусловленные волновыми свойствами света. Такая аппроксимация является приемлемой во многих приложениях.

Трудность решения этого уравнения определяется его рекурсивным характером и сложностью области интегрирования, поэтому на практике применяются различные приближенные методы численного решения. Это могут быть методы излучательности [10, 11] или используемый в наших программных системах метод Монте-Карло прямой трассировки лучей [12-15].

Идея метода Монте-Карло прямой трассировки лучей 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. Начальные параметры луча (положение и направление) распределяются стохастическим образом в соответствии с угловой и пространственной плотностями излучения источника, а количество фотонов, выпущенных источником света, пропорционально его энергии. Траектория фотона трассируется до пересечения с поверхностью. В соответствии с оптическими свойствами пересеченной поверхности (такими как поглощение, функциями рассеивания, включая «зеркальные» функции рассеивания) лучи могут вероятностным образом отразиться, рассеяться, преломиться, поглотиться. По мере взаимодействия лучей с объектами сцены энергия фотонов накапливается на объектах сцены в виде глобальной освещенности или яркости.

Метод естественным образом поддерживает все типы поверхностей, включая сочетания диффузных и зеркальных свойств, а также поверхности,

описываемые сложными функциями отражения (преломления) света. Он позволяет воспроизводить в изображениях тонкие оптические явления, такие как, например, эффект «каустики» — световые блики, возникающие за счет фокусирования световой энергии идеально преломляющими материалами криволинейной формы [16].

Метод не зависит от положения камеры и не предусматривает формирования итогового изображения на экране. Он предоставляет информацию о глобальной освещенности в каждой точке всех объектов (поверхностей) сцены, которая записывается в «карту освещенности». Позднее она может быть использована для визуализации и синтеза изображений. Метод проиллюстрирован на рис. В14.

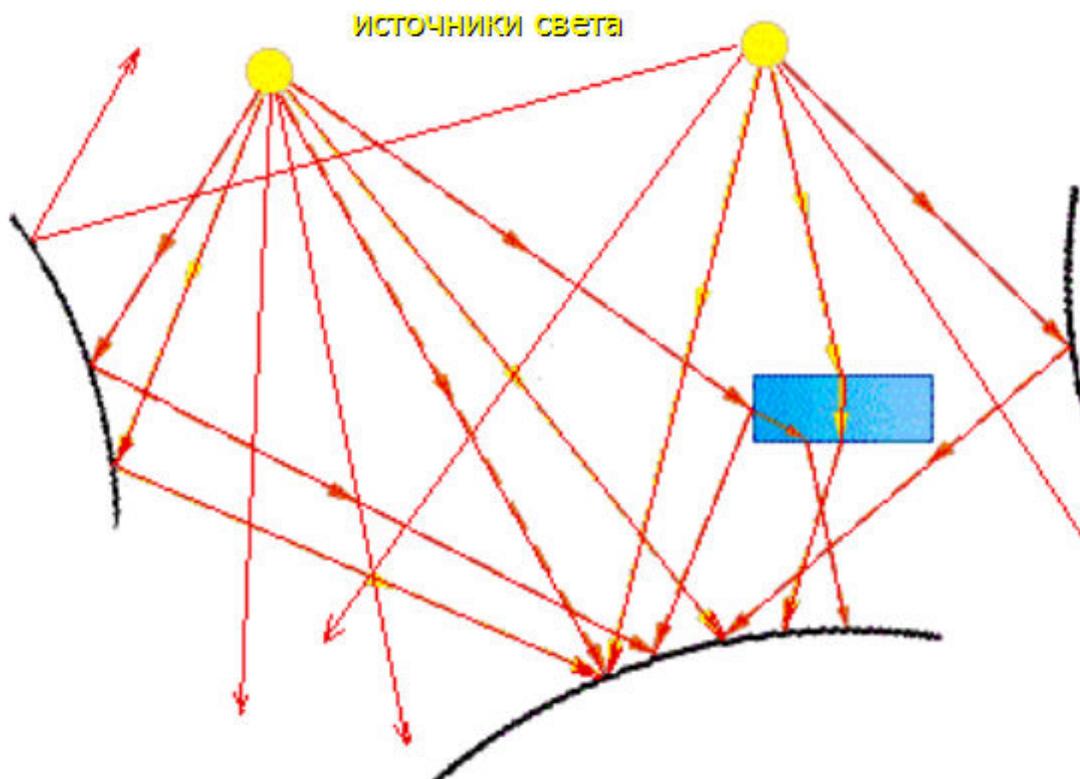


Рис. В14. Метод Монте-Карло прямой трассировки лучей. Желтые кружки обозначают источники света. Красными стрелками показаны траектории фотонов, их отражения от поверхностей (черные дуги) или прохождение сквозь прозрачное тело (голубой прямоугольник).

Метод Монте-Карло прямой трассировки лучей также имеет свои слабые стороны. Это связано в первую очередь со слабоосвещенными

областями и малыми по размеру приемниками излучения (например, объектив камеры). Вероятность попадания луча света в объектив или в слабоосвещенную область мала. Поэтому, например, для формирования изображения за объективом требуется большое количество вычислений (основная масса лучей пройдут мимо интересующих объектов).

Решением этой проблемы является комбинированный алгоритм, использующий методы Монте-Карло прямой и обратной трассировки в зависимости от ситуации. Таким образом, наиболее эффективной и универсальной технологией является двунаправленная Монте-Карло трассировка лучей.

Участие в проекте МКО ТС.3.33.

МКО (Международная комиссия по освещению) является основной, наиболее авторитетной организацией, разрабатывающей и принимающей стандарты и технологии в области цвета и света. Ее международная аббревиатура – CIE от франц. Commission Internationale de l'Éclairage [17]. По заданию этой организации под руководством F. Маамаги были разработаны и в 2002 году опубликованы наборы аналитических тестов для программ моделирования освещения [18]. Всего было предложено 227 тестов.

Тесты были направлены на проверку того, насколько программы моделирования распространения света реально подчиняются законам оптики, в частности, для различных моделей естественного освещения. Тесты отдельно проверяли такие аспекты, как корректность задания источников света, корректное моделирование множественных переотражений и т.д. Особое внимание было уделено такой сложной для корректного вычисления модели, когда внутреннее помещение освещается небесной полусферой через небольшое окно (рис. В15). Для этой модели корректные результаты в разумное время можно получить практически только двунаправленной Монте-Карло трассировкой лучей.

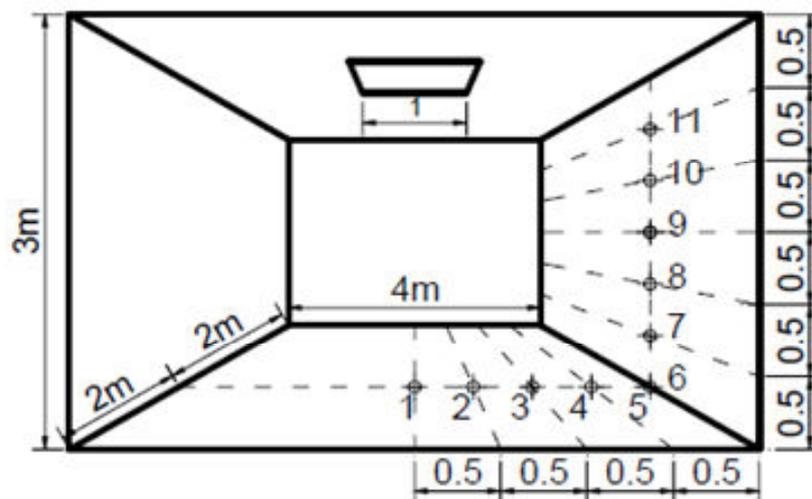


Рис. В15. Иллюстрация к одному набору аналитических тестов проекта ТС.3.33.

Программная система моделирования освещенности, разработанная в отделе компьютерной графики ИПМ, также участвовала в проверке этими тестами вместе с такими широко известными продуктами как Dialux, Genelux, Lightscape, Radiance. Результаты независимого тестирования были опубликованы в [19], где наша программная система Inspirer показала в большинстве случаев результат не хуже или превосходящий конкурентов. Общий полный результат выполнения тестов программной системой Inspirer представлен в табл. В.1.

Ошибка между аналитическими и вычисленными значениями	Число прошедших тестов	Процент от общего числа тестов
менее 1%	119	52%
менее 3%	163	72%
менее 5%	197	87%
менее 10%	223	98%
более 10%	4	2%

Табл. В.1. Результаты сравнения вычисленных и аналитически рассчитанных значений освещенности в тестах ТС.3.33.

Как видно из табл. В.1, только 2% тестов превысили рубеж «инженерно-приемлемой» ошибки в 10%. Более половины тестов показали хорошее совпадение смоделированных результатов с теоретически рассчитанными. Это показывает, что алгоритмы, реализованные в наших программных системах компьютерной графики, действительно являются физически корректными.

Задание исходных данных моделирования

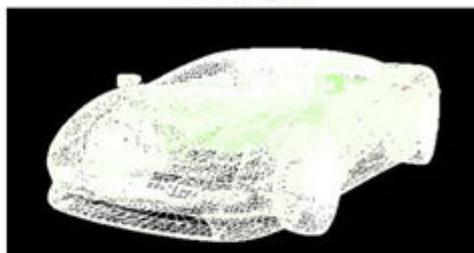
Для моделирования освещенности и генерации реалистичного изображения необходимо задать модель сцены в цифровом виде. *Модель сцены* состоит из геометрии или объектов сцены, физических свойств материалов объектов, поверхностей и сред, источников света и виртуальной камеры наблюдения, для которой также определено фоновое изображение (рис. В16).

Геометрия сцены включает задание формы объектов сцены, а также их иерархию [20]. Наиболее часто используется приближение объектов и поверхностей с помощью полигональной сетки. Для такого представления существуют эффективные алгоритмы нахождения пересечения луча с поверхностью, оно поддерживается всеми современными ускорителями трехмерной графики, также многие алгоритмы вычисления освещенности рассчитаны специально на сеточное представление. Для создания реалистичных изображений геометрия сцены должна быть задана с большой степенью детализации. Иначе грубое представление объектов разрушит впечатление «реальности» рисунка.

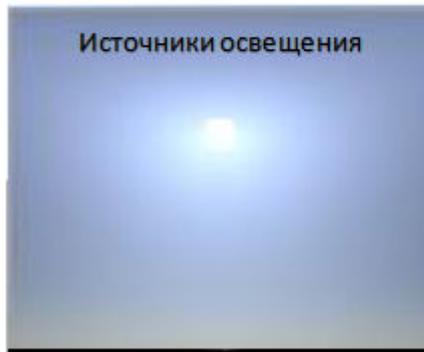
Оптические свойства материалов



Геометрия



Источники освещения



Фоновое изображение

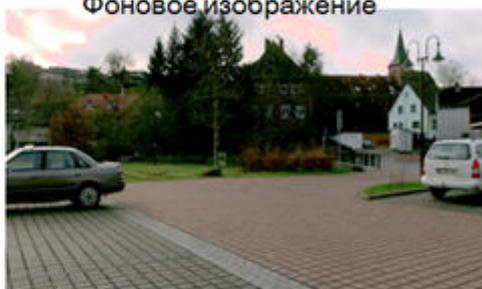


Рис. В16. Задание цифровой модели сцены.

Свойства объектов и поверхностей определяются физическими законами распространения света внутри сред и взаимодействия света с поверхностями. Например, в сцене можно задать количество света, отраженного от поверхности или проходящего сквозь поверхность диффузно, зеркально; количество поглощенного света и т.д.

Источники света – это объекты сцены, излучающие световую энергию. Эти объекты могут быть как частью геометрии сцены (так называемые «самосветящиеся» объекты), так и некими абстрактными объектами, не привязанными к геометрии. Существенным для алгоритмов вычисления освещенности является существование такого абстрактного источника света как точечный (геометрическая точка, излучающая световую энергию). С такими источниками хорошо работают алгоритмы лучевой оптики, легко вычисляется направление на него. Но в реальной жизни идеальных точечных источников, вообще говоря, не существует. Но для практических приложений точечные источники имеют важное оптимизационное значение. Например, в большинстве задач дизайна интерьеров лампочки можно считать точечными источниками света

Виртуальная камера наблюдения. Изображение, получаемое на экране монитора, в значительной степени зависит от параметров наблюдения, то есть от положения наблюдателя, направления зрения, фокусного расстояния камеры, ее разрешения и т.д. Кроме того, для многих сцен геометрия отображается не на весь экран, а только на часть его. Возникает необходимость заполнить оставшуюся часть изображением, которое бы не разрушало, а наоборот способствовало созданию впечатления реалистичности. Это изображение называется фоновым.

Основные проблемы создания реалистичных изображений

На современном этапе, когда разработанные алгоритмы моделирования распространения света являются достаточно устоявшимися и многократно проверенными на их физическую корректность, можно сформулировать следующие основные проблемы, возникающие при физически корректных расчетах освещенности и построении реалистичных изображений:

1. Задание правильных исходных данных

Результат моделирования существенно и непосредственно зависит от корректности задания исходных данных (спецификации виртуальной сцены). В большинстве случаев процесс описания сцены весьма трудоемок, данные получить сложно, а порой и технически невозможно.

2. Скорость генерации изображения

Необходимой составляющей повышения производительности труда пользователей является минимизация времени визуализации без существенной потери качества изображения. В идеале изображения должны генерироваться в режиме реального времени.

Эти же проблемы среди главных проблем, стоящих перед современной компьютерной графикой, выделяет и пионер компьютерной графики Donald Greenberg в своем эссе «Outlook on Computer Graphics» [21].

Хотелось бы подчеркнуть, что физически корректное моделирование освещенности, необходимое для построения реалистичных изображений, требует высокой точности задания исходных данных. Неверно или недостаточно точно заданные исходные данные непременно приведут к неправильному результату. Даже небольшие (несколько процентов) отклонения в задании оптических свойств материалов могут привести к итоговой ошибке в разы. Это происходит потому, что свет при распространении (например, при расчете непрямого освещения в салоне самолета) претерпевает многократное отражение, и таким образом ошибка накапливается.

Решение проблемы корректной цветопередачи при визуализации объектов архитектуры, интерьеров автомобилей и самолетов, особенно при освещении сцены цветными (окрашенными) источниками искусственного света или естественным светом, требует использования программных средств

спектрального моделирования распространения света. В общем случае белый свет, отражаясь от окрашенной поверхности, становится цветным. Поэтому такие входные данные, как источники света и оптические характеристики объектов, желательно задавать в спектральном виде.

Цель работы

Вышеперечисленные проблемы создания реалистичных изображений являются на данном этапе одними из главных препятствий для эффективного использования инструментария реалистичной визуализации в задачах науки и производства. Поэтому *целью работы* является создание комплекса программных технологий и методов, позволяющих:

- а) автоматизировать процесс задания виртуальной сцены и исходных данных для физически корректного моделирования распространения света и построения реалистичных изображений;
- б) генерировать физически корректные реалистичные изображения в режиме интерактивной навигации.

Их реализация существенно снижает трудоемкость визуализации сложных моделей и проектов и тем самым повышает производительность труда инженеров, проектировщиков, дизайнеров и конструкторов.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в следующем.

Разработан эффективный комплексный подход к автоматизации задания виртуальной сцены для генерации реалистичных изображений. Разработаны и реализованы технологии интеграции программного комплекса построения реалистичных изображений с системами автоматизации проектирования.

Предложена концепция определения оптических характеристик материала посредством моделирования распространения света внутри него, включая моделирование пространственного рассеяния света, моделирование распространения света в волновом приближении для высоких концентраций частиц. Показано, что именно двунаправленная функция отражения света в общем, табличном, представлении является наиболее приемлемой формой для использования результатов моделирования при построении реалистичного изображения. Концепция успешно апробирована на таких материалах, как ткани, многослойные краски, принтерные чернила.

Разработан уникальный программно-аппаратный комплекс, позволяющий непосредственно измерять оптические свойства образцов материалов с высокой точностью для их дальнейшего использования при моделировании освещенности и синтезе реалистичных изображений.

Предложена классификация средств визуализации в зависимости от скорости генерации реалистичных изображений с точки зрения человеко-машинного интерфейса. Представлены решения, позволяющие достичь интерактивной скорости визуализации, а также решения, позволяющие повысить производительность труда проектировщиков в случае длительных вычислений.

Реализованы технологии, позволяющие использовать фотоснимки реального ландшафта в качестве исходных данных для реалистичной визуализации. Фотоснимки в виде карт освещения с большим динамическим диапазоном яркостей используются для комплексного задания как источников света, так и фона, что позволяет автоматически встраивать в изображение ландшафта виртуальные объекты. Разработаны новые алгоритмы модификации карт освещения, компенсирующие некорректное представление солнца.

Практическая значимость

На основе концепций, методов и алгоритмов, предложенных в диссертационной работе, был реализован ряд программных продуктов, которые широко используются в нашей стране и за рубежом. Среди них:

- программный комплекс для физически корректного расчета освещенности и построения фотореалистичных изображений сцен, содержащих оптически сложные материалы, при различных условиях искусственного и естественного освещения, а также при освещении, задаваемом изображением с большим диапазоном яркости;

- программно-аппаратный комплекс измерения оптических свойств плоских образцов материалов;

- программные комплексы и системы моделирования оптических свойств сложных автомобильных красок, красящих покрытий с высокой концентрацией пигмента, тканей;

- программный комплекс физически корректной интерактивной визуализации в режиме навигации сцен, содержащих оптически сложные материалы, с учетом предварительно рассчитанных эффектов вторичного освещения; интерактивная визуализация имеет два режима: аппаратный с использованием библиотеки OpenGL и программный с когерентной трассировкой лучей, реализованной с помощью SSE команд;

- эффективное вычислительное ядро для Интернет-сервиса физически корректного моделирования освещенности и построения реалистичных изображений.

Каждый из созданных программных комплексов находится на уровне или превосходит по ряду ключевых показателей имеющиеся в мире аналоги. Благодаря разработанному в диссертации комплексному подходу к автоматизации создания реалистичных изображений процесс задания входных данных существенно упрощается, и программными продуктами

могут быть пользоваться не только высококвалифицированные инженеры и дизайнеры, но также студенты и аспиранты технических ВУЗов.

Проведенные экспериментальные сравнения результатов физически корректных расчетов оптических характеристик, полученных путем моделирования материалов, с результатами измерений аналогичных характеристик на реальных объектах продемонстрировали высокую точность моделирования.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертации были представлены на ряде профильных международных научных конференций [1, 24, 25, 27-30, 36-40, 45-49], а также в рамках Всероссийской научной школы для молодежи «Компьютерное зрение, 3D моделирование и компьютерная графика» при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Результаты диссертации также докладывались на научно-практическом семинаре «Новые информационные технологии в автоматизированных системах» [35], на объединенном научном семинаре направления «Программирование» им. М.Р. Шура-Бура ИПМ им. М.В.Келдыша РАН и семинаре по робототехническим системам ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана и ИНОТиИ РГГУ.

По результатам работы имеется 35 публикаций, включая 17 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК [2, 14, 22, 23, 26, 31-34, 41-44, 50-52, 165], 18 статей в сборниках докладов на международных научных конференциях и семинарах [1, 24, 25, 27-30, 35-40, 45-49].

Личный вклад

Все основные результаты, изложенные в диссертации, включая постановки задач и их алгоритмические решения, получены автором лично или выполнены под его научным руководством и при непосредственном участии.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из четырех глав: первая, вторая и третья главы посвящены автоматизации процесса задания виртуальной сцены и исходных данных для физически корректного моделирования распространения света; четвертая глава посвящена анализу скорости генерации реалистичных изображений, методам достижения интерактивной скорости визуализации, повышению эффективности работы при длительных вычислениях. Изложение глав организовано следующим образом.

В первой главе рассмотрены методы автоматизации задания объектов сцены. Под объектами сцены понимаются геометрические объекты, источники освещения, фоновое изображение. В качестве методов задания геометрии проанализированы конвертеры из существующих форматов и предложена полная интеграция в системы автоматизации проектирования. Для автоматизации задания источников света предложены алгоритмы предварительной обработки данных в формате RaySet и карт освещения в виде изображений с большим диапазоном яркости. В рамках автоматизации задания фонового изображения предложены алгоритмы фотомонтажа и использования карт освещения, которые позволяют создавать изображения дополненной реальности.

Вторая глава посвящена проблеме задания оптических свойств объектов и материалов сцены. Оптические свойства в наиболее общей форме описываются двунаправленной функцией отражения (пропускания) света. Описан программно-аппаратный комплекс непосредственных измерений

оптических характеристик образцов материалов, используемых в сцене. Приведено сравнение разработанного комплекса с аналогичными установками, существующими в мире. Однако не всегда образец интересующего материала доступен. Поэтому предложена концепция получения оптических характеристик с помощью моделирования взаимодействия света с микроструктурой материала. Рассмотрен пример моделирования такого сложного с точки зрения взаимодействия света материала как текстильная ткань.

В третьей главе рассматриваются методы получения оптических характеристик поверхностей, покрытых многослойными автомобильными красками или принтерными чернилами. Несмотря на кажущуюся схожесть задач, их решения требуют принципиально различных подходов. Предложены архитектуры соответствующих программных комплексов. Результатом моделирования в обоих случаях является двунаправленная функция отражения света, которая может использоваться при генерации реалистичных изображений. Приведены результаты сравнения смоделированных оптических характеристик и измеренных реальных образцов. Итоговое реалистичное изображение с объектами, покрытыми этими материалами, позволяет показать, как они будут выглядеть при тех или иных условиях освещения. Это позволяет использовать разработанный подход также и в задачах создания новых материалов с заданными оптическими свойствами.

Четвертая глава посвящена еще одному аспекту автоматизации построения реалистичных изображений – скорости генерации изображения. Выделено четыре класса скорости генерации изображения с точки зрения человеко-машинного интерфейса. Для каждого класса представлены решения, позволяющие достичь интерактивной скорости визуализации, а также решения, позволяющие повысить производительность труда проектировщиков и дизайнеров в случае длительных вычислений.

В заключении формулируются основные результаты работы.

Глава 1. Методы автоматизации задания объектов цифровой модели сцены

1.1. Автоматизация задания геометрии сцены

Важным аспектом реалистичности является задание детальной цифровой модели изображаемых объектов. Задание такой модели, состоящей иногда из нескольких миллионов объектов, требует использования современных программ автоматизированного проектирования. Такие системы моделирования, как Autodesk 3DS Max [53], CATIA (Dassault Systems/IBM) [54], Maya (Alias/Wavefront) и др., позволяют создать «с нуля» сложные цифровые модели, полностью описывающие, например, здание со всеми помещениями и интерьерами или автомобиль в мельчайших деталях.

Все разработанные комплексы моделирования освещенности хранят геометрию в своем формате, максимально адаптированном для задачи быстрого построения реалистичного изображения. Наиболее часто используется приближение поверхностей с помощью полигональной сетки. Для такого представления существуют эффективные алгоритмы нахождения пересечения луча с поверхностью, оно поддерживается всеми современными ускорителями трехмерной графики. Поэтому возникает задача конвертации представления геометрии, создаваемого системами автоматизации проектирования, из известных форматов в свой внутренний формат.

1.1.1. Конвертация геометрии из распространенных САПР форматов

Практически все программные комплексы САПР и компьютерной графики имеют возможность сохранения цифровой модели геометрии сцены для повторного использования и обмена информацией. Существует большое

множество (несколько сотен) форматов файлов, в которые сохраняется эта информация. Некоторые системы получили широкое распространение, соответственно их форматы также являются широко распространенными.

Импорт и конвертация геометрии виртуальной сцены из наиболее популярных форматов были поддержаны и в созданном программном комплексе. Был разработан набор конвертеров из форматов DXF, IGES, VRML, STEP и др. [55] Такие форматы как DXF или VRML содержат геометрию в виде полигональной сетки. Поэтому конвертация геометрии из них не является сложной. Форматы IGES или STEP могут содержать части геометрии в виде сплайнов, что требует применения алгоритмов триангуляции в процессе конвертирования.

От качества триангуляции существенно зависит результат моделирования. Наличие в результирующей геометрии Т-вершин, длинных узких треугольников, совпадающих треугольников (наложенных один на другой в одной плоскости) приведет к плохому результату моделирования освещенности. Границы таких треугольников будут видны на итоговом изображении. Также возможны разрывы геометрии на границах сплайнов, как это показано на рис. 1.1.

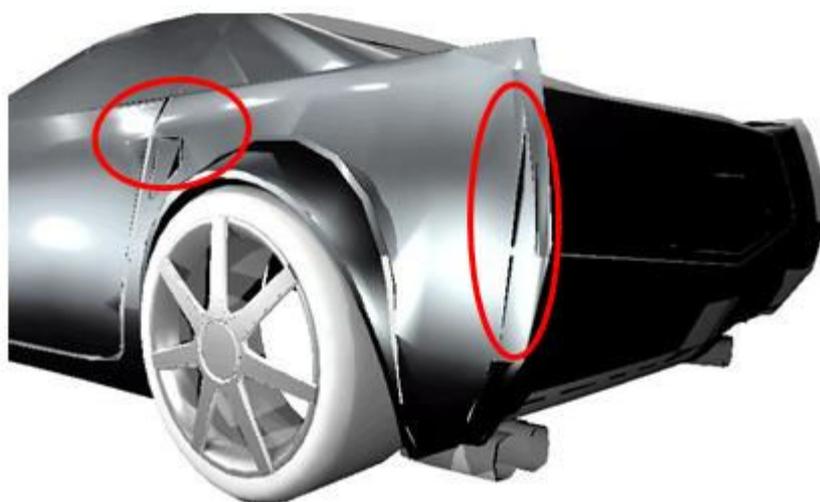


Рис. 1.1. Хорошо видны ошибки триангуляции – разрывы геометрии.

Таким образом, можно выделить две основные проблемы этого подхода:

1. Конкретные реализации форматов представления данных постоянно модифицируются. Даже если новая модификация не выходит за рамки стандарта формата, а просто раньше новые элементы не поддерживались, мы все равно сталкиваемся с ситуацией, когда наши конвертеры перестают понимать новые данные. Это приводит к необходимости постоянно адаптировать конвертеры к «современным условиям». Такой подход представляется довольно затратным, кроме того невозможно решить проблему «до конца»: новые модификации формата потребуют новых усилий по их поддержке.
2. Разработка хороших алгоритмов триангуляции требует серьезных затрат и, что немаловажно, большого набора данных для тестирования. В практических задачах часто встречаются случаи, когда уже существующий, оттестированный триангулятор выдает результат, приводящий к некачественному итоговому изображению новой геометрии. Каждый такой случай требует изучения причин ошибки и соответствующей модификации, доработки алгоритма триангуляции.

Поэтому путь полной интеграции модулей расчета освещенности в САПР системы выглядит предпочтительней. В этом случае обе проблемы решаются за счет средств базовой САПР системы.

1.1.2. Интеграция с системами автоматизированного проектирования

Интегрирование систем физически корректного моделирования распространения света, используемых для построения реалистичных

изображений, с современными САПР является трудной задачей. Известно несколько попыток ее решения. Наиболее известными являются подгружаемые, встроенные модули (plugins), разработанные компаниями Discreet (Lightscape) [56], Mental Images [57] и Chaos Group (VRay) [58] для 3DS Max. Для системы автоматизированного проектирования CATIA V5 компанией OPTIS был выпущен встроенный модуль моделирования освещенности SPEOS CAA V5 Based [59]. Компания Mental Images интегрировала свою программу моделирования освещенности во многие известные САПР – Autodesk 3DS MAX, Maya и CATIA (PhotoStudio).

Основной проблемой, с которой сталкиваются разработчики программ физически корректного моделирования распространения света при интегрировании своих модулей с САПР, является отсутствие в этих системах физически корректных моделей, описывающих взаимодействие света со средой распространения и поверхностью объектов. Материалы поверхностей в САД системах чаще 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 моделирования распространения света, поскольку не содержат необходимых физических характеристик.

При этом разработчикам приходится учитывать запросы различных категорий пользователей таких систем. Первая категория – это в основном пользователи такой системы как Autodesk 3DS Max. Чаще всего это архитекторы или дизайнеры, которым надо визуально представить своим заказчикам различные варианты дизайна разрабатываемых помещений, салонов автомобилей и самолетов до их реального воплощения. Во многих случаях сами объекты еще физически не существуют к моменту подготовки презентации. В этом случае 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, геометрия которых может описываться сотнями тысяч, а то и миллионами треугольников и использовать сотни сложных текстурированных материалов, требует значительных усилий. Поэтому, как правило, пользователи согласны только на небольшую адаптацию ранее подготовленных описаний сцен при использовании нового модуля.

Вторая категория пользователей – это пользователи, для которых моделирование распространения света является основной целью. Такими пользователями часто являются разработчики оптически сложных светопроводящих и осветительных систем, таких как жидкокристаллические дисплеи, автомобильные фары, приборные панели и др. Физически корректное 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 пользователей могут интересовать точные величины и распределение освещенности в определенных областях сцены, например, на рабочем столе или экране дисплея. Также корректное моделирование является важным 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 САПР не предоставляет таких возможностей. Поэтому дополнительные модули с интерфейсом для задания характеристик должны быть разработаны либо внутри системы, либо в программе моделирования освещенности.

Таким образом, решение задачи интеграции программ физически корректного моделировании распространения света с системами автоматизированного проектирования требует нескольких различных подходов для описанных выше двух групп пользователей. В работах [28, 30] рассматриваются два примера такой интеграции, выполненных в отделе компьютерной графики и вычислительной оптики ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 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 получение точных результатов моделирования освещенности.

1.1.3. 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 корректное 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 Max поддерживала Omni (точечный, всенаправленный), Spot (конический) и Direct (параллельный) 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 корректной 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.

Важными объектами моделирования во многих случаях являются источники света с неоднородной диаграммой излучения (гониограммой). Более подробно о ней будет сказано в параграфе 1.2.1. Например, получение фотореалистичных изображений невозможно без учета таких диаграмм для ламп с отражателями. Естественно 3DS Max не предоставляет возможности описания таких источников. Поэтому его интерфейс был расширен возможностью задания источника света с гониограммой. В качестве входных данных используются гониограммы в формате IESNA LM-63 [60], которые, как правило, предоставляются производителями ламп.

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. А эта информация, содержащаяся внутри «Photometric lights» источников, поддерживаемых более поздними версиями 3DS Max, отсутствует в 3DS Max SDK интерфейсе. В силу этих причин сохранение

моделей источников света, разработанных для 3DS Max, без изменений в последующих версиях выглядело целесообразным.

При разработке интерфейса источников света только минимально необходимое количество параметров было добавлено к уже существующим источникам света. В результате разработанный интерфейс является для пользователя лишь небольшим расширением уже существующего и привычного для пользователя интерфейса. Так был добавлен интерфейс для выбора и визуализации гониограммы 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, Compozite, Raytrace, Lightscape, Shelac и др.) было разработано большое количество специальных моделей материалов. Большая часть этих материалов имитирует различные оптические эффекты и рассчитана на использование в визуализаторе 3DS Max. Поэтому нам, также как и Lightscape, пришлось добавлять собственные модели, которые обеспечивают физически корректное моделирование диэлектрических материалов (подчиняются закону Френеля), материалов с диффузной прозрачностью, с зеркальным отражением, излучающие поверхности. Некоторые базовые 3DS Max материалы, такие как диффузный или зеркальный цвет, которые могут быть легко преобразованы в физические атрибуты поверхности, были сохранены для использования в моделировании освещенности.

При разработке интерфейса материалов также только минимально необходимое количество параметров было добавлено к уже используемым в 3D MAX материалам. Для этого в качестве базового использовался стандартный интерфейс материала в 3D MAX. Таким образом, не пришлось

разрабатывать специальный интерфейс для тех параметров, которые уже имеются – различные цвета, мощный и сложный интерфейс для назначения текстур и т.д.

На рис. 1.2 представлены примеры синтеза реалистичных изображений для моделей, созданных в среде 3DS Max.



Рис. 1.2. Изображение фасада здания при солнечном освещении (слева) и интерьера при искусственном освещении (справа).

Реализм изображений на рис. 1.2 достигается благодаря высокой степени детализации геометрической модели, подготовленной дизайнерами в САПР, и физически корректному моделированию распространения света, поддерживаемому нашим модулем.

1.1.4. Интеграция с CATIA

Как было упомянуто выше, интеграция с CATIA (Dassault Systems) предполагает получение точных результатов моделирования освещенности. Такое моделирование требует введения источников света, отсутствующих в CATIA, задания оптических свойств используемых материалов, расчета освещенностей различных объектов сцены и использования для анализа полученных результатов различных видов виртуальных измерительных объектов. При этом из информации, содержащейся в CATIA, используются данные о геометрии моделируемой сцены, положении и ориентации камеры,

некоторые данные об оптических свойствах, такие как диффузный и зеркальный цвет, коэффициент преломления света, прозрачность и т.д.

Было принято решение сконцентрировать основные вопросы моделирования освещения и анализа его результатов в собственной системе Inspirer2 (изначально разрабатывавшейся как система реалистичной визуализации в интерактивном режиме Fly [24]). Модуль, встроенный в САТІА, 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 моделирования 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 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. Также при получении фотореалистичных изображений используются параллельные алгоритмы трассировки (на нескольких процессорах), ускорение с помощью SSE инструкций (см. п. 4.2.2). Поэтому

реализованные алгоритмы объектно-ориентированной, двухуровневой трассировки делает взаимодействие CATIA и Inspire2 более быстрым, приближающимся к интерактивности.

Основная идея двухуровневой трассировки лучей [50] состоит в том, что на верхнем уровне трассируются только параллелепипеды, ограничивающие геометрические объекты сцены. На втором, нижнем уровне трассируются уже сами объекты. Подход позволяет обеспечить эффективную трассировку геометрии различной сложности.

При изменении сцены в CATIA модуль интеграции должен обновлять внутреннее представление только тех объектов сцены в Inspire2, геометрия которых была изменена или объект был целиком заменен, удален или добавлен. Геометрия остальной части сцены остается без изменения, что позволит обновить ускоряющие структуры за существенно меньшее время, чем, если бы они создавались заново целиком.

В такой постановке модуль, встроенный в CATIA, должен решать две задачи:

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

Решение первой задачи – это создание конвертера из одного геометрического представления в другое, который бы поддерживал структуру дерева сцены (документа) в CATIA. Геометрия из CATIA, включая дерево сцены, преобразуется с помощью внутренних библиотек CATIA САА (Component Application Architecture) в объекты, представленные триангулированными поверхностями с заданным уровнем разбиения, и в таком виде передается в Inspire2. Таким образом, триангуляция поверхностей, представленных сплайнами (NURBS) в CATIA V5, делается с помощью возможностей, предоставляемых самой CAD системой.

Решение второй задачи необходимо для того, чтобы отследить изменения в геометрии сцены после ее редактирования в CATIA. Это позволяет сохранить источники света и свойства поверхностей и материалов у ранее существующих геометрических объектов в Inspire2, а изменить только реально модифицированную часть сцены. Эта задача была решена введением для всех узлов дерева сцены и геометрических объектов уникальных идентификаторов, единых как для системы CATIA, так и для программы моделирования освещенности. 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 CATIA, переносится в Inspire2 с сохранением источников света и оптических свойств поверхностей ранее введенных объектов. Такие изменения не затрагивают геометрические объекты, добавленные непосредственно в Inspire2, например дополнительных объектов из существующих библиотек. Встроенный в CATIA интерфейс позволяет контролировать различные параметры конверсии геометрии из NURBS представления в треугольную сетку необходимую для моделирования в Inspire2.

На рис. 1.3 представлены результаты моделирования освещенности для моделей, созданных в среде CATIA. Представлена реалистичная визуализация модели и распределение освещенности в виде тоновой заливки.

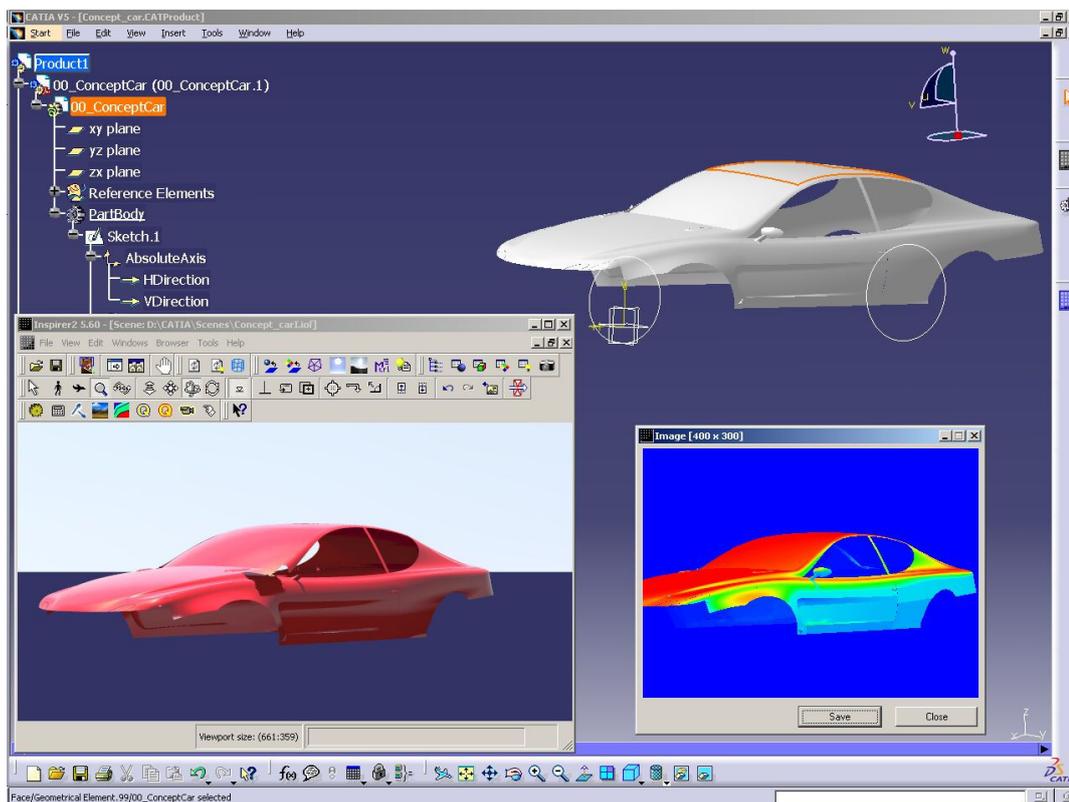


Рис. 1.3. Иллюстрация интеграции системы моделирования освещенности Inspirer2 и системы CATIA.

1.1.5. Результаты

Интеграция программного комплекса моделирования освещенности и систем автоматизированного проектирования позволяет решить проблему задания детальной цифровой геометрической модели изображаемой сцены. Современные модели насчитывают сотни тысяч и миллионы объектов, и не могут быть созданы без развитого механизма, предлагаемого САПР. Разработанные модули интеграции в системы 3DS Max и CATIA позволяют успешно решать как задачи генерации реалистичных изображений, так и анализа освещенности и оптического дизайна.

1.2. Автоматизация задания источников освещения

Источниками света являются объекты сцены, излучающие световую энергию. Параметры светимости и интенсивности источников света задаются

в фотометрических единицах. Эти объекты могут быть как частью геометрии сцены (они называются «самосветящиеся» объекты), так и некими абстрактными объектами, не привязанными к геометрии сцены. С точки зрения задания исходных данных существенным является разделение источников света на естественные (к ним относятся небесное и солнечное освещение) и искусственные, созданные человеком.

1.2.1. Спецификация источников света

Для задания искусственных источников света необходимо определить их геометрическое местоположение, яркость или силу света (если источник – точечный), угловое распределение световой энергии. Для точечного источника света задание геометрического положения не вызывает сложности – это просто точка в пространстве. Задание положения протяженных источников (линейных, площадных) требует больше данных. «Самосветящиеся» объекты, являющиеся частью геометрии сцены, позволяют задавать источники произвольной формы. Для спецификации их местоположения необходимо указать, какой объект геометрии сцены излучает энергию. Угловое распределение световой энергии называется гониометрической диаграммой или *гониограммой*. В оптике оно также имеет название индикатриса рассеяния. Задание гониограммы может быть в общем, табличном виде, когда специфицируются пространственные направления и для них указывается сила света в данном направлении. Также оно может быть в функциональном виде, например, конический источник является точечным источником, расположенном в вершине конуса, с положительными значениями гониограммы внутри конуса и нулевыми – за его пределами.

Естественное освещение. Существуют три основных способа задания естественного освещения, которые были разработаны при участии и под непосредственным руководством автора [1, 2, 24, 38, 47]. При первом способе задаются географические координаты расположения виртуальной сцены, ее ориентация и время (месяц, число, часы и минуты).

Географическое положение многих городов может быть сохранено в библиотеку (рис. 1.4), что существенно упрощает процесс спецификации. Пользователю не нужно узнавать координаты конкретного города и вводить их, достаточно просто выбрать город из списка. Библиотека может быть расширена пользователем. Положение солнца, его яркость, цвет солнца и неба определяются согласно существующим моделям неба, разработанным Международной комиссией по освещению [61]. МКО создавала стандартные модели неба посредством множественных измерений в различных точках Земли, в разное время и при различных погодных условиях.

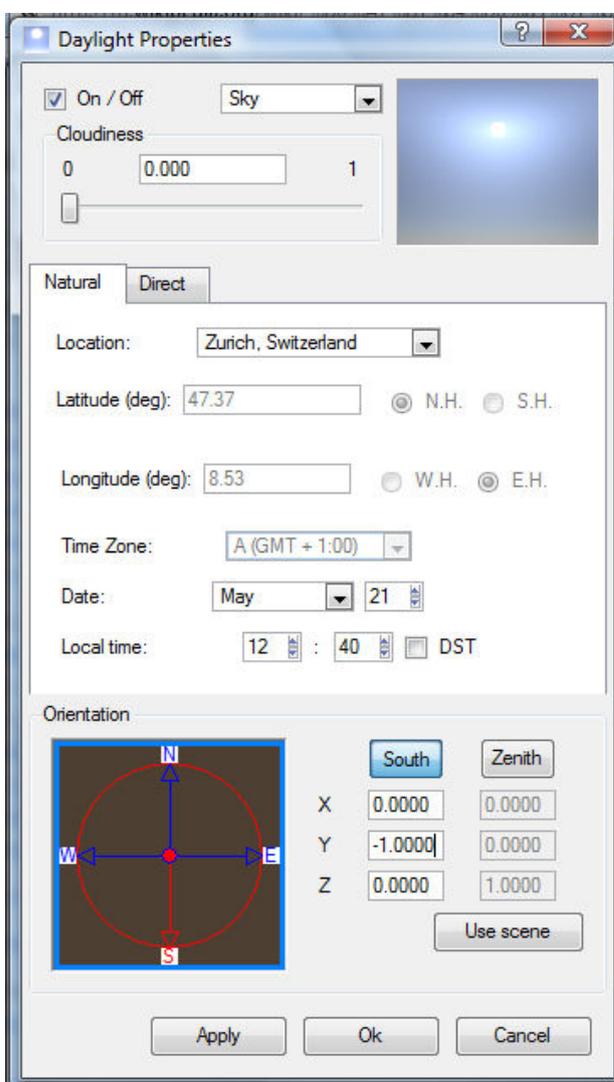


Рис. 1.4. Задание естественного освещения через географическое положение и время.

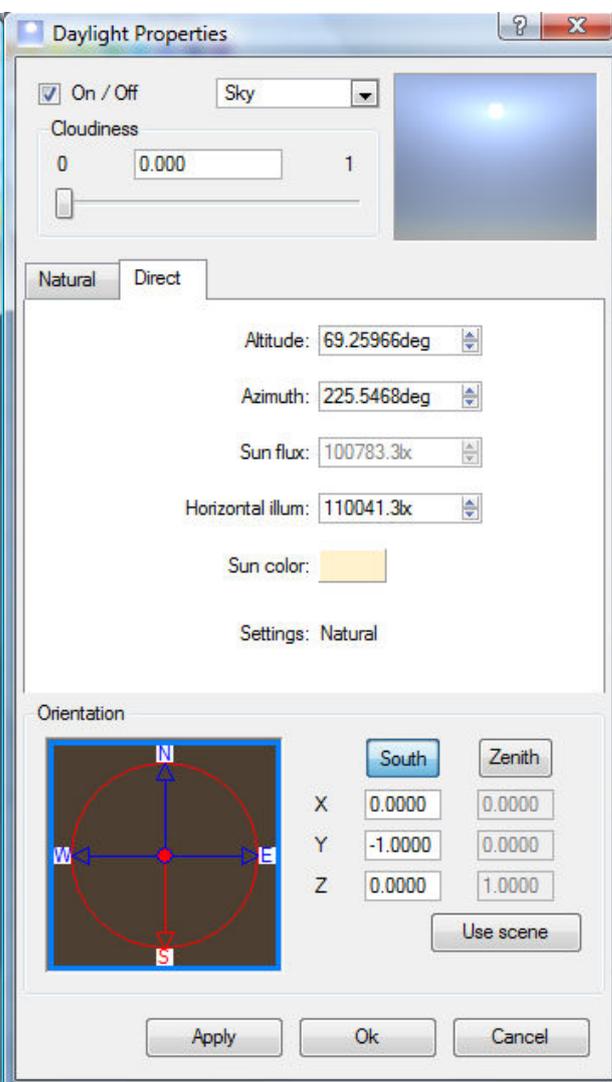


Рис. 1.5. Задание естественного освещения через непосредственное указание направления на солнце.

Для задания облачности указывается степень облачности неба в процентах (или значение от 0 до 1). Подобной спецификацией пользуются в метеорологических наблюдениях. Моделирование небесного освещения для случаев 100% облачности и ее отсутствия соответствует стандарту МКО. Небесное освещение с неполной облачностью моделируется с использованием интерполяции.

Второй способ задания неба требует непосредственного указания направления на солнце (обычно, указывается в сферических координатах), его яркости и цвета (рис. 1.5), а также ориентации виртуальной сцены. Этот способ используется при создании искусственных сцен, не привязанных к конкретному географическому месту. Яркость солнца также может задаваться через освещенность горизонтальной поверхности. Этот способ задания берет начало с моделей неба МКО, которые создавались при помощи измерений, в частности, освещенности горизонтальной поверхности. Поэтому такая спецификация яркости солнца является более привычной для некоторых специалистов. Облачность указывается так же, как и в первом способе.

Третий способ задает небесное освещение при помощи гониометрической диаграммы, которая определяет распределение освещенности, поступающей от небесной полусферы по различным направлениям. Небесная гониограмма может быть получена в результате измерений. Преимущество этого способа в том, что дает возможность точно задать определенные условия освещения, близкие к реально существующим. Однако эти измерения являются дорогостоящим мероприятием, точность их может быть невысокой в зависимости от метода и тщательности выполнения. При этом степень облачности автоматически учитывается в гониограмме. Необходимо только сориентировать ее относительно виртуальной сцены.

1.2.2. Измерение источников и построение их моделей

Непосредственный подход к спецификации источника света – спектрофотометрические измерения реальной лампы и построение ее модели в сцене [38, 47]. Однако модель зависит от самой лампы, виртуальной сцены и цели моделирования освещенности. Во многих случаях бывает достаточно представить реальную лампу в виде точечного источника с гониограммой излучения. Для получения гониограммы реального осветительного прибора измеряют интенсивность света (в канделах) в точках некоторой сетки на поверхности окружающей его воображаемой сферы. Освещенность, создаваемая точечным источником, может быть вычислена достаточно просто. При этом практически любой источник можно считать точечным по отношению к поверхности, если он удален от нее не более, чем на пять своих линейных размеров [62]. На рис. 1.6. в левой сцене лампа может быть представлена точечным источником с гониограммой, и, очевидно, в правой сцене представление точечным источником будет неадекватно.

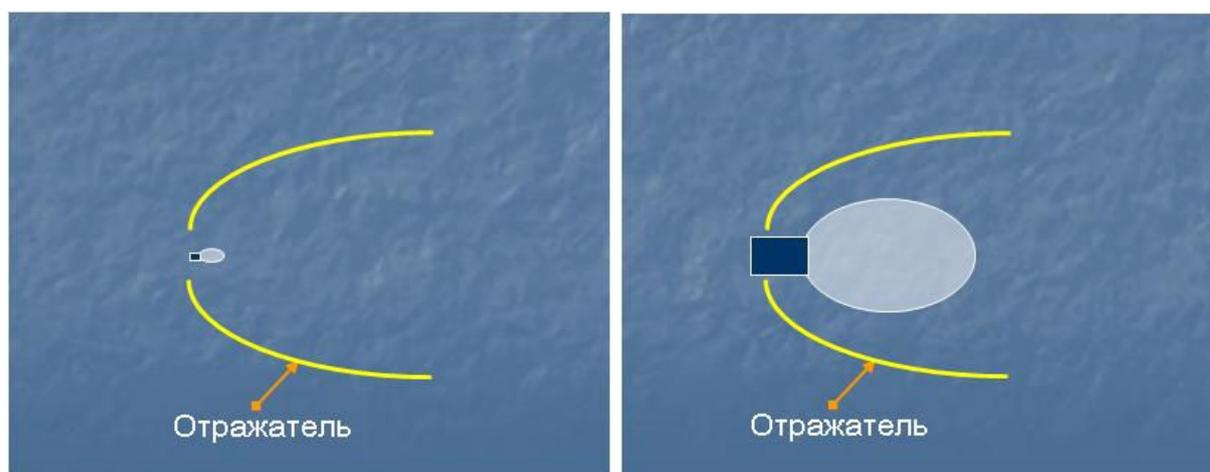


Рис. 1.6. Точечный источник света является адекватным для левой сцены, и нет – для правой сцены.

Этот подход является наиболее трудозатратным и ненадежным, потому что результат зависит от квалификации и профессионализма дизайнера, создающего виртуальную сцену. Какие именно измерения должны быть

сделаны и как построена модель, зависит от лампы и сцены. Приведем ниже два примера таких моделей. В нашем случае измерения производились во ВНИИОФИ [63], а модели ламп строились при участии автора.

Флуоресцентная лампа (рис. 1.7) обычно состоит из длинной трубки или нескольких трубок (компактная лампа), яркость которых различная в разных местах. Поэтому для правильного задания модели иногда требуется изучить ее во включенном состоянии. Для данной лампы было решено смоделировать ее с помощью самосветящейся геометрии сцены в виде набора цилиндров. Все цилиндры были одинаковые, но в разных зонах цилиндра – разная яркость лампы (на рис. 1.7 показано 7 разных зон). Кроме этого, общая гониограмма лампы была измерена и применена для всех участков цилиндров.

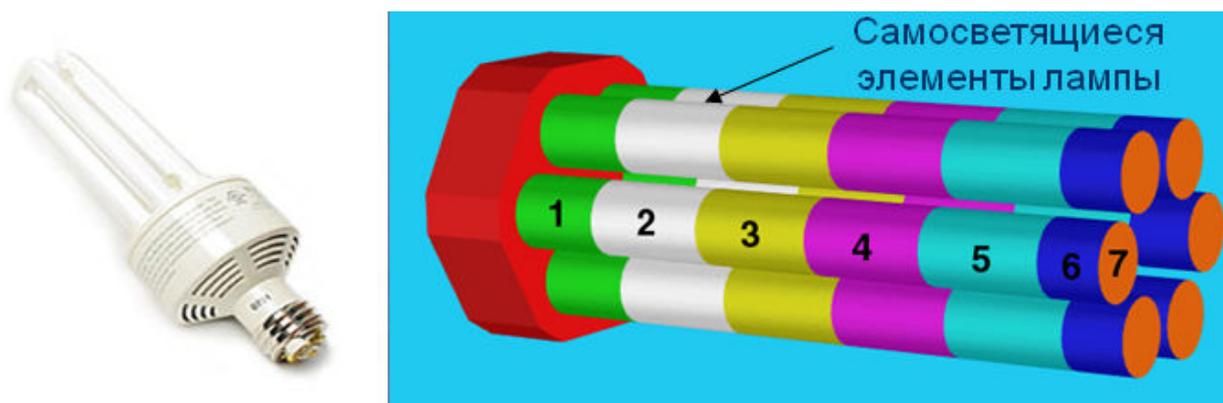


Рис.1.7. Фотография и модель флуоресцентной лампы.

В *лампе накаливания* (рис. 1.8) светящим элементом является тело накала (обычно, спираль или нить). Оно может иметь различную форму, которую необходимо воспроизвести достаточно точно. Также лампа имеет прозрачную колбу, множество держателей, тоководов и других приспособлений. Все они могут быть учтены с помощью измеренной гониограммы лампы. Однако тело накала имеет различную яркость на своем протяжении. Поэтому наиболее целесообразно смоделировать лампу

накаливания в виде набора точечных источников, расположенных по нити накала, с различной яркостью, но с одной и той же гониограммой (рис.1.8).



Рис. 1.8. Фотография и модель лампы со спиралью накаливания.

Построенные модели ламп организуются в библиотеки готовых источников света (рис. 1.9). Пользователю нужно только выбрать требуемую лампу и указать место ее расположения в сцене. В библиотеке лампы хранятся иерархически (по применению, по производителю) для удобства поиска. Библиотеки являются расширяемыми. Если требуемой лампы в ней не находится, то создается новая модель и помещается в библиотеку.

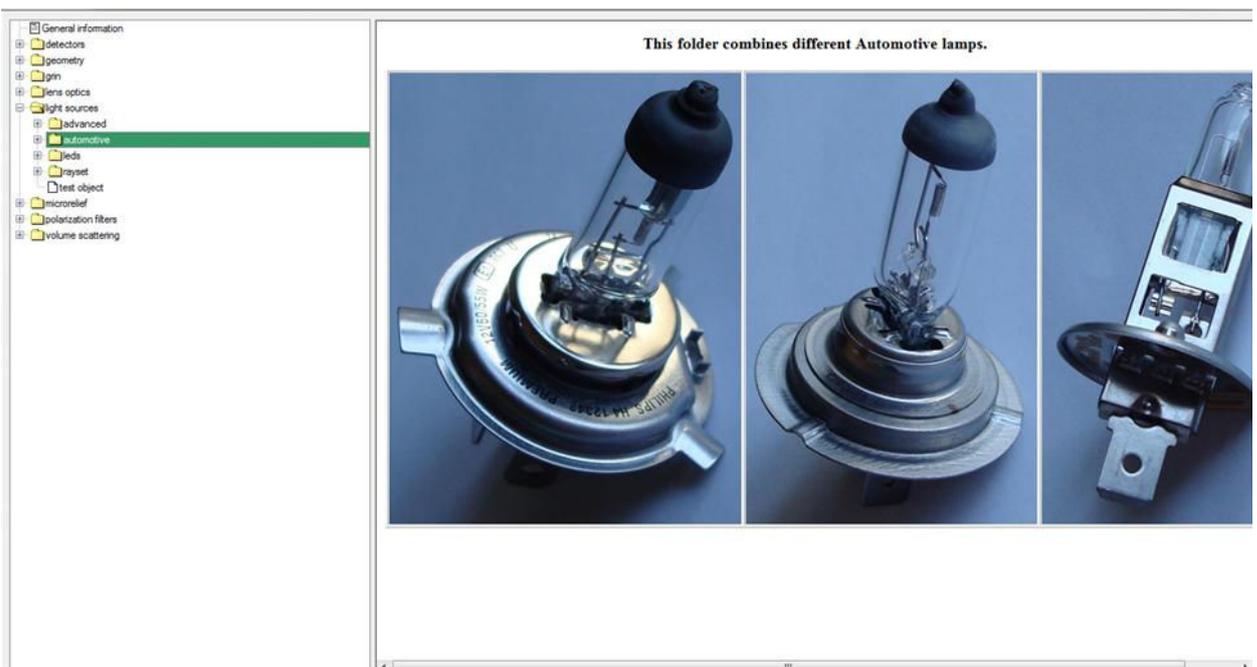


Рис. 1.9. Пример интерфейса библиотеки моделей источников света.

1.2.3. Поддержка распространенных форматов

Гониограммы источников света. Существенным шагом к автоматизации задания источников света является импорт существующих распространенных форматов, описывающих гониограммы или даже полностью весь источник. Практически все производители ламп и светодиодов предоставляют гониограммы своей продукции в Интернете (например, гониограммы ламп Philips – [64]). Производители заинтересованы в свободном распространении этой информации, поскольку она позволяет инженерам и дизайнерам заранее промоделировать освещение в проектируемом помещении и понять, какие конкретно лампы необходимо закупать для проекта.

В настоящее время наиболее распространенным международным форматом описания источника света является форматы IES LM-63-1986, LM-63-1995 [60], принятые международной организацией IES (изначально – IESNA, Illumination Engineering Society of North America) [65]. В соответствии со стандартом IES сила света $I(w)$ параметризуется в сферической системе координат (ϕ, θ) (рис. 1.10-а), где $\phi \in [0, 2\pi)$, $\theta \in [0, \pi)$. Значения $I(\phi, \theta)$ задаются в узлах сетки, образованной разбиением возможных интервалов изменения углов ϕ и θ произвольными значениями $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ и $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ соответственно. Получившаяся сетка с заданными значениями силы света в ее узлах представляет собой гониограмму. Значения функции $I(\phi, \theta)$ внутри ячейки гониограммы вычисляются с помощью билинейной интерполяции четырех значений в углах этой ячейки.

Используя гониограммы с достаточно частой сеткой задания функции $I(\phi, \theta)$, можно с высокой точностью представить практически любой реальный источник света. Форма гониограммы может быть очень сложной. Пример реальной гониограммы представлен на рис. 1.10-б [66].

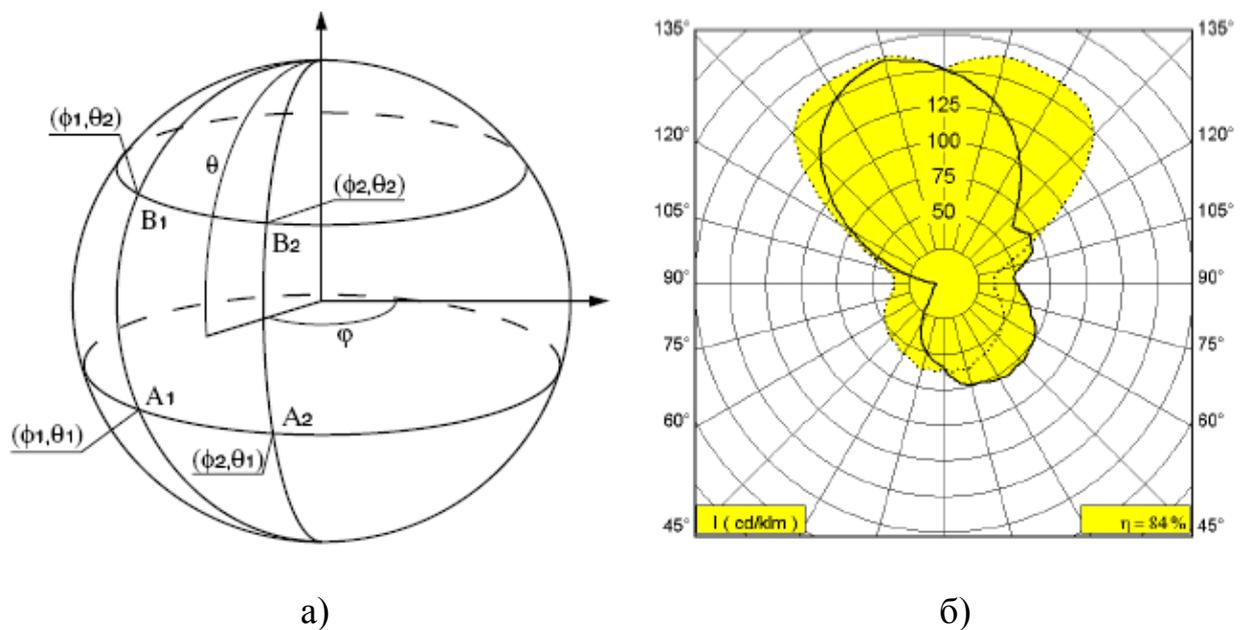


Рис. 1.10. Задание силы света $I(\phi, \theta)$ в формате IES: а) схема нахождения четырех смежных значений для билинейной интерполяции; б) пример реальной гониограммы – показаны сечения плоскостями $\phi=0$ и $\phi=90^\circ$.

Гониограммы, однажды использованные в программном комплексе реалистичной визуализации, также могут быть сохранены в библиотеке. Но способ их визуализации в каталоге библиотеки отличается. Внешний вид лампы, использовавшийся для измеренных ламп (рис. 1.9), часто не актуален, а иногда и неизвестен. Поэтому гониограммы визуализируются в библиотеке через освещение, создаваемое ими в тестовой сцене (рис. 1.11).

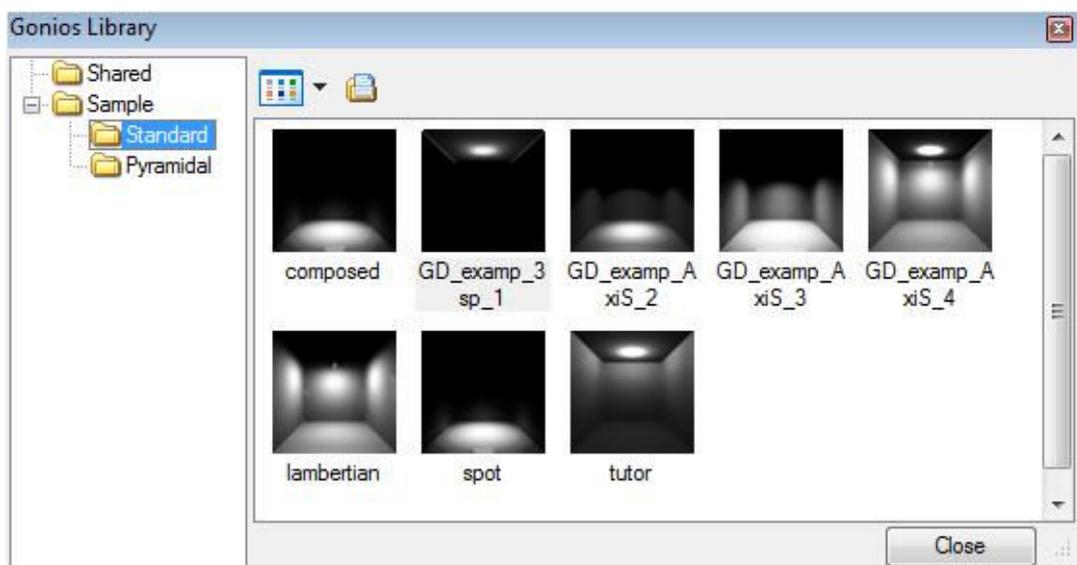


Рис. 1.11. Библиотека гониограмм источников света.

Форматы RaySet. В последнее время все более популярным становится формат записи источников освещения RaySet. Формат был разработан фирмой OPSIRA (Германия), но стал по-настоящему популярен после того, как его стала поддерживать фирма Radiant Imaging (США) [67]. (Radiant Imaging – крупнейшая в мире фирма, специализирующаяся на оптических измерениях и производстве измерительной техники.)

Формат RaySet содержит описание источника света в виде набора лучей, им генерируемых (рис. 1.12). При достаточно большом количестве лучей такое представление включает всю информацию о геометрической форме, силе света и гониограмме источника, т.е. является универсальным. Дополнительное преимущество состоит в том, что большинство систем оптического моделирования основывается на алгоритме трассировки лучей, т.е. они получают входные данные в готовом виде. Эти два фактора и обусловили большую популярность этого формата. Сейчас большинство производителей ламп и светодиодов предоставляют возможность загрузить RaySet данные о товаре с Интернет сайта. Также Radiant Imaging поставяет библиотеку файлов RaySet, содержащую десятки тысяч различных ламп. Практически любую существующую лампу или светодиод можно найти в библиотеке. И, наконец, измерение нужного источника света можно заказать фирме Radiant Imaging и получить результат в формате RaySet.

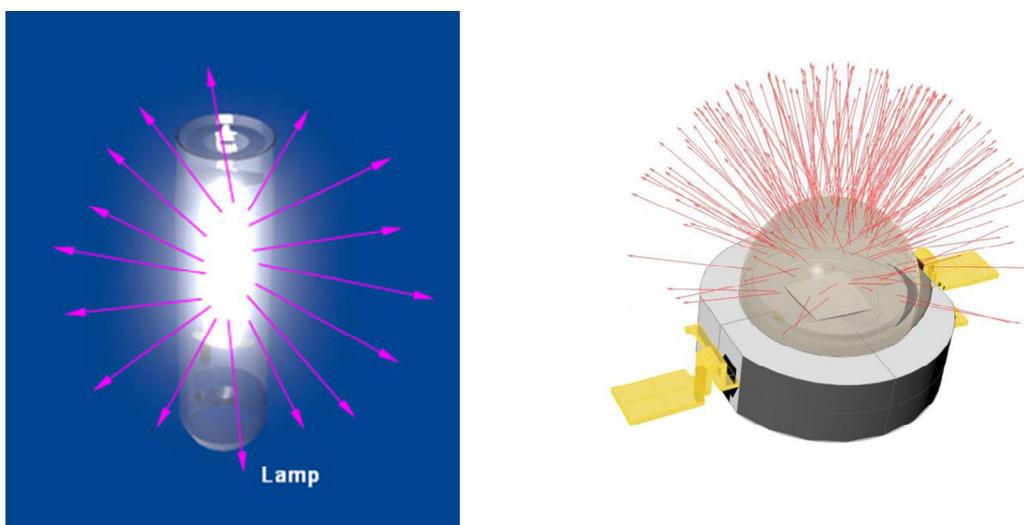


Рис. 1.12. Представление лампы и светодиода в формате RaySet.

Однако для технологии, используемой в нашей системе оптического моделирования и реалистичной визуализации, этот подход имеет существенный недостаток. Базовой технологией, как уже говорилось во введении, является Монте-Карло трассировка лучей (как прямая, так и обратная). Начальные результаты, полученные ей, имеют большой шум, который уменьшается с увеличением времени счета, т.е. с большим количеством протрассированных лучей. Таким образом, для получения качественного результата нам необходимо большое число лучей в RaySet спецификации. Поскольку Монте-Карло трассировка может продолжаться бесконечно, то мы никогда не можем сказать заранее, какого количества лучей будет достаточно. В то же время представление источника света в формате RaySet требует большого объема памяти. Для примера, 1 миллиард лучей (число не очень большое для качественного моделирования) требует ~40 Гб памяти, что становится критичным при моделировании. Кроме того, существующие в библиотеках RaySet наборы имеют обычно небольшое число лучей, и их количество не может уже быть увеличено.

Единственным правильным подходом к решению этой проблемы является генерация лучей на базе набора из RaySet файла. Автоматическое построение гладкой функции углового распределения световой энергии (гониограммы) в общем, произвольном случае практически невозможно. Поэтому был разработан алгоритм, который генерирует лучи в некоторой окрестности каждого луча из RaySet набора. Таким образом, каждый луч из RaySet представления становится фактически пучком неограниченного числа лучей. Луч из набора RaySet выбирается случайным образом, потом стохастически строится его «флуктуация», которая и используется в процессе моделирования распространения света в виртуальной сцене. В итоге получается источник света, полностью соответствующий набору RaySet, но неограниченный по числу генерируемых лучей. Количество необходимых лучей в наборе RaySet существенно сокращается, и становится возможным

получить качественные изображения, имея десятки и даже единицы тысяч RaySet лучей.

1.2.4. Результаты

Два описанных подхода, реализованных в программном комплексе генерации реалистичных изображений, позволяют существенно автоматизировать процесс задания источников освещения в виртуальной сцене:

1) задание естественного освещения через хорошо понятные параметры времени и местоположения сцены на земном шаре; все спецификации, необходимые для физически корректного моделирования, вычисляются автоматически из существующих моделей неба, разработанных Международной комиссией по освещению;

2) импорт широко распространенных форматов задания искусственных источников света, который позволил отказаться от дорогостоящего и трудоемкого процесса измерения реальных ламп и их последующего моделирования.

Хотелось бы отметить, что практически все производители ламп и светодиодов размещают характеристики своей продукции в виде IES или RaySet файлов в Интернете, поэтому источник света практически задается по наименованию продукта (лампы). Положительной особенностью формата RaySet можно считать его полноту: через набор лучей передается информация как о яркости и гониограмме источника, так и о его геометрических размерах и форме. Это позволяет использовать этот формат как при моделировании удаленных источников (что возможно и с форматом IES), так и близких, когда представление источника только через гониограмму является недостаточным.

Предоставление готовых библиотек источников света, а также возможность создавать свои библиотеки, позволяет значительно упростить процесс задания начальных данных для синтеза реалистичных изображений.

1.3. Освещение, задаваемое изображением

1.3.1. Изображение с большим диапазоном яркостей

Наиболее перспективной с точки зрения автоматизации спецификации освещения является на данный момент технология задания освещения через изображение, заранее вычисленное или сфотографированное. Обычное изображение с динамическим диапазоном в несколько сотен здесь не может быть применено. Современные исследования и разработки в области компьютерной графики все чаще обращаются к изображениям с большим диапазоном яркостей (HDRI – High Dynamic Range Image в англоязычной литературе). Изображение с большим диапазоном яркости содержит для каждого пиксела реальное физическое значение яркости в формате числа с плавающей точкой, который позволяет записывать реальные значения яркости света, пришедшего с этого направления в объектив камеры. Впервые использование изображения с большим динамическим диапазоном было предложено Грегори Вардом в 1991 году [68]. Он же разработал первый и до сих пор наиболее распространенный формат для хранения таких изображений (RGBE – Red, Green, Blue, Exponent – формат файла со стандартным расширением `hdr`), а также свободно распространяемую программу для работы с ними [69].

В наше время HDRI изображения могут быть получены путем обработки набора фотографий реального мира, сделанных с различными выдержками и диафрагмами, или как результат панорамного сканирования окружающей реальной сцены. Возможность запечатлеть реальный мир с помощью панорамных карт окружения, содержащих реальные физические величины яркостей, дала толчок бурному развитию этого направления компьютерной графики. Она позволяет существенно упростить процесс задания окружающей среды и фона для генерации реалистичных изображений. С ее помощью моделируемый объект может быть легко

помещен в существующую реальную сцену, запечатленную сканирующим устройством. Рис. 1.13 иллюстрирует этот процесс. Такая карта окружения передает реальные значения яркостей источников света, существующих в сцене. Это привело к развитию технологии компьютерной графики, называемой «освещение, задаваемое изображением» (IBL – Image Based Lighting в англоязычной литературе) [70]. Панорамные карты окружения, содержащие реальный, большой диапазон яркостей, можно назвать картами освещения.

Компьютерная модель автомобиля



HDRI изображение



Специальная сканирующая камера, снимающая с разными экспозициями

Рис. 1.13. Схема технологии IBL – «освещение, задаваемое изображением».

При использовании IBL технологии источником света является изображение с большим динамическим диапазоном. Становится возможным назначать в качестве источников света фотографии неба или выставочного зала и моделировать освещение объекта в этих условиях. Задание источников света и условий освещения другим способом (например, набором точечных, площадных, линейных и др. источников света с правильным расположением

их в трехмерной виртуальной сцене) является сложным и дорогим процессом, который не всегда приводит к желаемому результату.

Для того чтобы IBL технологию можно было автоматически использовать в наших программных комплексах моделирования освещенности и генерации реалистичных изображений пришлось разработать ряд алгоритмов, описанных в работах [29, 31, 36, 41, 47, 66] и кратко изложенных далее. Фактически изображения с большим динамическим диапазоном должны быть предварительно обработаны, тогда они становятся мощной технологией автоматического задания как источника освещения сцены, так и фонового изображения. В частности, возможность автоматически использовать карты освещения предоставляет алгоритм распознавания и выделения ярких источников света, а также последующая корректировка результата в соответствии со стандартными моделями неба МКО.

Многие системы визуализации и моделирования такие, как 3dMax (со встроенными модулями Mental ray, V-Ray), Softimage, Maya и др. используют изображения с большим динамическим диапазоном для задания фона, что позволяет существенно улучшить реализм генерируемых картинок. Некоторые из этих систем используют карты освещения в качестве источников света. Используемые алгоритмы моделирования хорошо работают, если карты освещения задают протяженные источники света без резких изменений яркости (например, облачное небо). В результате моделирования на картинках можно увидеть размытые тени, и направление на источник света не сильно выражено. Так происходит, например, в системе LightWave 3D, где в основе расчета глобальной освещенности лежит метод излучательности. В ситуации, когда карта освещения содержит ярко-выраженный мощный источник света, такой как солнце, система не может воспроизвести четкие тени автоматически. В качестве решения проблемы пользователю LightWave 3D предлагается вручную установить

дополнительный источник света по направлению солнца с соответствующим масштабированием (уменьшением) яркостей карты освещения.

Такой подход, когда пользователь должен сам устанавливать дополнительный источник света для солнца, предлагается и в некоторых других системах визуализации. Фирмы, занимающиеся коммерческим производством и поставкой библиотек карт освещения на рынок, стараются не изменять положения солнца на небосводе во всей серии изображений. Для таких систем визуализации это обеспечивает взаимозаменяемость карт освещения при компоновке сцены и задании свойств материалов без изменения ручных настроек.

1.3.2. Создание карт освещения

Существует несколько технологий для получения полной сферической панорамы реального мира (иногда также называемой полноохватной панорамой):

- фотографирование металлической сферы, отражающей окружение [71],
- фотографирование всех направлений обычной цифровой камерой с последующей сшивкой этих изображений [72],
- фотографирование через объектив «рыбий глаз» [73].

Каждая из этих технологий имеет свои минусы:

- С помощью металлической сферы невозможно получить высококачественные изображения, так как отражения будут нечеткими и размытыми.

• Фотографирование обычной камерой с последующей сшивкой является трудоемким процессом. Направления всех камер должны исходить из одной точки, иначе сшитое изображение будет иметь заметные ошибки на границе кадров. Фотографирование должно проводиться достаточно быстро, в противном случае условия освещения могут измениться (например, солнце

будет закрыто облаком в процессе съемки), и одна часть панорамы не будет соответствовать другой.

- Использование «рыбьего глаза» оставляет заметные артефакты на итоговом изображении.

Получение значения каждой точки карты освещения производится с помощью фотографирования одного и того же изображения с различными экспозициями. Теоретические основы процесса получения таких карт из обычных фотографий были впервые рассмотрены Дибевеком и Маликом [71] и основываются на принципе обратимости для регистрирующего устройства, согласно которому увеличение времени экспозиции для меньших освещенностей дает то же значение экспозиции, что и большее освещение при соответственно уменьшенном времени экспозиции. Другими словами, устройство с ограниченным динамическим диапазоном может зарегистрировать сколь угодно малую или большую величину освещенности, если соответствующим образом увеличить или уменьшить время экспозиции.

Время фотографирования является одним из главных факторов, влияющих на качество карты освещения. Из общих соображений время фотографирования должно быть максимально коротким, иначе за это время изменится снимаемое окружение и условия освещения: солнце опустится по отношению к линии горизонта с соответствующим изменением его яркости, оно может зайти за облако или объект окружения (здание, дерево). Все это приведет к тому, что часть карты освещения, отснятая сначала, не будет соответствовать его окончательной части.

Технологически карта освещения не может быть отснята за пренебрежимо малое время. Для получения действительно большого диапазона яркостей необходимо сделать порядка 25-30 снимков в одном направлении, отличающихся различными экспозициями. Для получения большого пространственного разрешения необходимо отснять больше десятка таких направлений. Цифровые камеры требуют существенного времени на сохранение изображений с большим разрешением во внешней

памяти или для пересылки изображений в управляющий компьютер, т.к. встроенной памяти камеры недостаточно для хранения всех фотографий. Также необходимо время на позиционирование камеры, установку очередной экспозиции, восстановление после серии кадров и т.д. По нашим оценкам при компьютерном управлении камерой и ее позиционированием съемка потребует около полутора часов. Понятно, что это значительное время, которое не дает получить высококачественные карты окружения при съемке снаружи помещений при постоянно изменяющемся окружении.

Также невозможно получить корректные значения яркости в области солнца с помощью фотографирования без специальных фильтров. Камера не способна корректно воспринять и оцифровать такие большие яркости. Работа с фильтрами существенно усложняет процесс создания карты освещения, увеличивая время его создания. Поэтому ошибки в изображении солнца будут присутствовать практически всегда.

Алгоритм обработки набора кадров, позволяющий из набора фотографий с различной экспозицией получить изображение с большим диапазоном яркостей, был реализован в программе HDRshop [69]. Также программа показывает карты освещения в виде птолемеевых разверток, которые являются наиболее распространенным классом представления панорам. Птолемея развертка – это панорамное изображение с 360-градусным охватом по горизонтали и 180-градусным по вертикали. Стандартное соотношение сторон таких разверток – 2:1. С помощью HDRshop можно также посмотреть карты освещения при различных экспозициях (пример показан на рис. 1.14), получить значения яркостей в каждой точке.



Рис. 1.14. Карта освещения при различных экспозициях.

Как показано, создание собственных качественных изображений с большим динамическим диапазоном яркости является трудоемким процессом, требующим соответствующей аппаратуры, программного обеспечения и аккуратного исполнения. Поэтому появились фирмы, специализирующиеся на их производстве [72, 74, 75] и поставляющие готовые наборы карт освещения. Анализ качества некоторых типичных изображений будет приведен далее. Также существуют изображения с большим динамическим диапазоном яркости, свободно распространяемые в Интернете (часто их можно найти на университетских сайтах), но их количество весьма ограничено.

1.3.3. Обработка ярких источников света в карте освещения

Для вычисления освещенности от изображения с большим диапазоном яркости был использован метод Монте-Карло обратной трассировки лучей [29, 31, 36, 41]. Он эффективно применим, если это изображение задает достаточно равномерное освещение сцены, например, для освещения от облачного неба. В случае же если карта освещения содержит яркий источник света (например, прямо видимое солнце), то вычислительные затраты будут значительными. Эта проблема может быть решена, если выделить яркие источники света из карты освещения. Так как карта освещения задает источник света, расположенный на бесконечно удаленной сфере, то и выделенные яркие источники разумно заменить общепринятыми параллельными источниками света. В итоге карта освещения будет задавать равномерный источник света без ярких особенностей, которые будут заданы параллельными источниками света.

Выделение ярких источников света из карты освещения позволит также решить задачу генерации четких, резких теней от солнца. Большинство существующих систем визуализации не могут автоматически генерировать резкие тени от солнца, присутствующего в карте освещенности. Распознавание и выделение ярких областей позволяет более корректно моделировать освещенность от карт освещения, содержащих солнце, не добавляя в сцену искусственных источников света.

Для выделения источников света были введены три коэффициента, регулирующие процесс распознавания областей с большой яркостью и расчета мощности источника. Первый коэффициент используется для определения направления на источник света и задает порог яркости точки карты освещения, определяющий, является ли она источником света. Вторым и третьим коэффициентами используются для определения всей области с большой яркостью и в конечном итоге для вычисления яркости источника света. Вторым коэффициентом задает максимальный радиус яркой области.

Точки, яркость которых превышает заданный порог, но найденные за пределами этого радиуса, будут рассматриваться как другие источники света. Третий коэффициент задает минимальную яркость точки, которая будет рассматриваться как составляющая источника света. Таким образом, при выделении источника света используются все точки, лежащие не далее, чем на расстоянии указанного радиуса от наиболее яркой точки, с яркостью выше минимальной яркости. Только верхняя полусфера изображения с большим диапазоном рассматривается для автоматического выделения ярких источников света.

Значения яркостей всех точек карты освещения, использованных при выделении источника света и задании его мощности, обрезаются. В результате для дальнейших расчетов освещенности мы имеем достаточно гладкую функцию освещения, задаваемую обрезанной картой освещения, и набор ярких параллельных источников света.

Значения коэффициентов для порога яркости, определяющего направление на источник света, и минимальной яркости, определяющей составляющие источника света, рассчитываются по эмпирической формуле и зависят от средней яркости сегмента изображения. Оптимальное значение максимального радиуса яркой области также определялось на основе экспериментов.

1.3.4. Анализ карт освещения

Оказалось, что применение алгоритмов расчета освещенности от карт освещения не гарантирует получение реалистичных изображений фотографического качества. Попытки получить реалистичные изображения показали, что основные проблемы связаны с отсутствием четких теней и некорректной освещенностью поверхностей для карт освещения с видимым солнцем. Все это приводит к потере реалистичности итогового изображения.

Алгоритмы, разработанные для построения изображения, являются физически обоснованными, и ожидалось, что они должны генерировать

корректное изображение. Однако это оказалось верным только, если входные данные, т.е. сами карты освещения, являются физически корректными. Поэтому были проанализированы используемые карты освещения. Наиболее важными являются две характеристики:

- динамический диапазон,
- правильность представления солнца.

Все исследованные карты освещения были сделаны на устройствах компании SpheronVR [74] как самой компанией, так и фирмой Dosch Design [75], использующей приборы Spheron.

Для получения правильного, реалистичного изображения панорамные карты освещения должны максимально правильно передавать условия реальности, существовавшие во время процесса фотографирования. Это означает, что если в реальности диапазон яркостей (например, соотношение яркости солнца к яркости черного предмета внутри помещения) был достаточно велик, то и карта освещения должна содержать динамический диапазон такого же порядка.

Для анализа карт освещения за основу были взяты стандартные модели ясного полуденного неба (clear sky model) и модель частично облачного неба (partly cloudy model) Международной комиссии по освещению, опубликованные в [76]. Для модели ясного неба соотношение максимальной яркости солнечного неба к минимальной составляет 23737.4, т.е. динамический диапазон неба должен быть порядка 10^4 . Для модели частично облачного неба соотношение максимальной яркости солнечного неба к минимальной составляет 4722.4, т.е. динамический диапазон неба должен быть порядка 10^3 . Выделение всех точек карты освещения, принадлежащих небу, является в общем случае непростой задачей. Гораздо легче вычислить полный динамический диапазон всей карты, включающий также точки, принадлежащие нижней полусфере панорамы с изображением домов, почвы и т.д. Были изучены несколько десятков различных карт освещения, произведенных компанией Spheron. Для всех них нижняя полусфера

добавляет в среднем пару порядков к диапазону. Поэтому приблизительная оценка динамического диапазона всей карты освещения с солнцем должна быть не менее 10^6 , а частично облачной – 10^5 . Если карта освещения не содержит такого диапазона величин, то она заведомо не отражает реальность, и это приводит к неправильным результатам моделирования освещенности. Пример показан на рис. 1.15.



Рис. 1.15. Пример некорректной карты окружения, динамический диапазон 10^4 вместо 10^6 для яркого солнечного дня. Автомобиль недостаточно освещен, слабые тени, нет ощущения солнечного дня.

При анализе динамического диапазона была решена следующая проблема. Нижняя граница яркости может принимать очень маленькие, ненулевые значения (например, 10^{-15} или 10^{-8}). Для человеческого восприятия эти величины представляют собой темные области, неразличимые глазом. Они являются просто «шумом» элементов цифровой камеры в процессе фотографирования. Однако при вычислении динамического диапазона эта разница существенна. Для того чтобы иметь возможность отбросить такие

малые величины, все значения яркостей были переведены в единицы измерения кандела на метр квадратный (cd/m^2) в системе СИ. При этом известно, что максимальные яркости ЭЛТ-монитора имеют значения 250-300 cd/m^2 . Поэтому можно заменить значения менее 1 cd/m^2 на единицу, так как для человеческого глаза эти величины неразличимы. Таким образом, убирается динамический диапазон «внутри» черного цвета.

Анализ десятков карт окружения, производимых фирмой Dosch, показал, что ни одна из них не содержит приемлемого динамического диапазона. Максимальный динамический диапазон был 3961, т.е. $4.0 \cdot 10^3$. Это на два-три порядка меньше, чем ожидалось. Некоторые карты освещения фирмы Dosch имели диапазон 10^2 , что соответствует обычным фотографиям. Очевидно, что попытка моделировать освещение сцены от таких карт освещения неминуемо приведет к неправильным итоговым изображениям.

Анализ карт окружения, произведенных фирмой Spheron, показал существенно лучший результат. Две карты освещения содержали приемлемый динамический диапазон (порядка $6 \cdot 10^5$), диапазон еще двух был близок к приемлемому (порядка $6 \cdot 10^4$).

Дальнейший анализ карт освещения касался правильности представления солнца. Как и в предыдущем случае, для проверки правильности задания солнца были также использованы стандарты МКО и IESNA. Освещенность горизонтальной поверхности для модели ясного неба складывается из освещения, порождаемого солнцем, и освещения, созданного небесной полусферой за исключением солнца. Согласно стандарту МКО соотношение освещенностей, порождаемых этими частями, приблизительно равно 4:1, т.е. солнце создает в четыре раза большее освещение горизонтальной поверхности, чем вся остальная небесная полусфера.

Было вычислено соотношение освещения горизонтальной поверхности зоной солнца и всего остального неба для двух карт освещения, показавших приемлемые динамические диапазоны значений. Соотношение освещения,

задаваемого одной картой, оказалось 1:1, т.е. освещение, порождаемое солнцем, равно освещению, создаваемому небом. Соотношение освещения, задаваемого другой картой, оказалось 1:5, т.е. освещение, создаваемое солнцем, оказалось в пять раз меньше, чем освещение, создаваемое небом. При этом обе карты освещения представляют ясное небо с хорошо видимым солнцем, находящимся достаточно высоко над горизонтом. Это показывает, что яркость солнца является сильно недооцененной.

Более детально результаты анализа карт освещения описаны в [31].

1.3.5. Пути компенсации некорректностей карт освещения

После анализа доступных карт освещения стало понятно, что на этапе ввода исходных данных в виде карт освещения они должны быть модифицированы таким образом, чтобы скомпенсировать их недостатки. Наиболее существенным является компенсация недостатков, связанных с недооценкой яркости солнца. Было бы некорректно изменять яркость неба, так как именно яркость солнца является недооцененной. Производители аппаратуры для съемки карт освещения утверждают, что именно съемка солнца, как особенно яркого объекта, представляет реальную сложность. Все остальное окружение может быть получено с высокой точностью.

Задача распознавания ярких источников света является близкой новому направлению компьютерной графики, занимающемуся воспроизводством обычных (LDR – Low Dynamic Range) изображений на устройствах с высоким динамическим диапазоном (HDR display). Известно несколько решений этой проблемы, в которых предлагается увеличить динамический диапазон участков блика и отражения солнца [77], применить обратный оператор отображения яркостей сцены на экране дисплея [78] или улучшить динамический диапазон для видео последовательности [79]. Но ни один из перечисленных подходов не позволяет восстановить яркость солнца, что необходимо для физически корректного моделирования. Они просто

улучшают визуальное восприятие картинки. Поэтому эти алгоритмы не подходят для нашего случая.

Компенсировать недооценку солнца можно, взяв за основу стандартные модели неба, принятые Международной комиссией по освещению. При выделении источника света производится расчет освещенности горизонтальной поверхности от выделенного источника (т.е. солнца) и от модифицированной верхней полусферы карты освещения (т.е. неба за исключением солнца). Далее яркость выделенного источника света масштабируется таким образом, чтобы освещенность от него была в 4 раза выше, чем от остального неба. При этом проблемой является анализ карты освещения с целью автоматического определения, когда необходимо применить операцию масштабирования источников света. Базируясь на автоматическом анализе, нельзя быть точно уверенным, является ли выделенный источник света солнцем или это яркий искусственный источник. Естественным решением в этом случае является предоставление возможности пользователю самому устанавливать режим компенсации неправильности яркости солнца в зависимости от визуальной оценки конкретной карты освещения.

На рис. 1.16 представлен результат работы этого алгоритма. На левом рисунке приведено изображение автомобиля, помещенного в карту освещения с видимым солнцем `a52_Lagerschuppen.hdr` (динамический диапазон – $5.6 \cdot 10^4$, соотношение освещенности горизонтальной поверхности от солнца к ее освещенности от неба – 1:5, т.е. небо в пять раз ярче солнца). Видно, что автомобиль недостаточно освещен для солнечного дня, тени от солнца бледные. На правом рисунке представлено изображение, полученное с компенсацией неправильности задания солнца. Освещенность автомобиля стала удовлетворительной, благодаря достаточному освещению краска автомобиля имеет правильный цвет. Под автомобилем видна резкая тень, соответствующая яркому, солнечному дню.



Рис. 1.16. Применение компенсации некорректности задания солнца.

Однако часто расчет освещенности от небесной полусферы невозможен потому, что небо на карте освещения частично закрыто деревьями или зданиями. Поэтому для таких карт освещения применение алгоритма, описанного выше, некорректно. Был разработан другой подход, позволяющий рассчитать яркость параллельного источника, представляющего солнце, исходя из стандартной модели неба, принятой Международной комиссией по освещению.

Для задания параметров стандартной модели неба пользователь должен задать географическое местоположение (например, «Брянск, Россия»), где была снята карта освещения, и дату, когда это было сделано. Время (но не дата) съемки и азимутальное направление может быть вычислено автоматически. Время устанавливается по высоте выделенного солнца над линией горизонта, а азимутальное направление по азимуту на него. После того, как параметры стандартной модели неба заданы, пользователь должен указать («кликнуть») на любую точку, принадлежащую небу. После чего значения солнца будут скорректированы в соответствии со стандартной моделью неба. Рис. 1.17. иллюстрирует процесс реконструкции солнца, итоговое значение освещенности от которого получилось 70059,72 люкс, а начальное, полученное из карты освещения, – 8916,03 люкс.

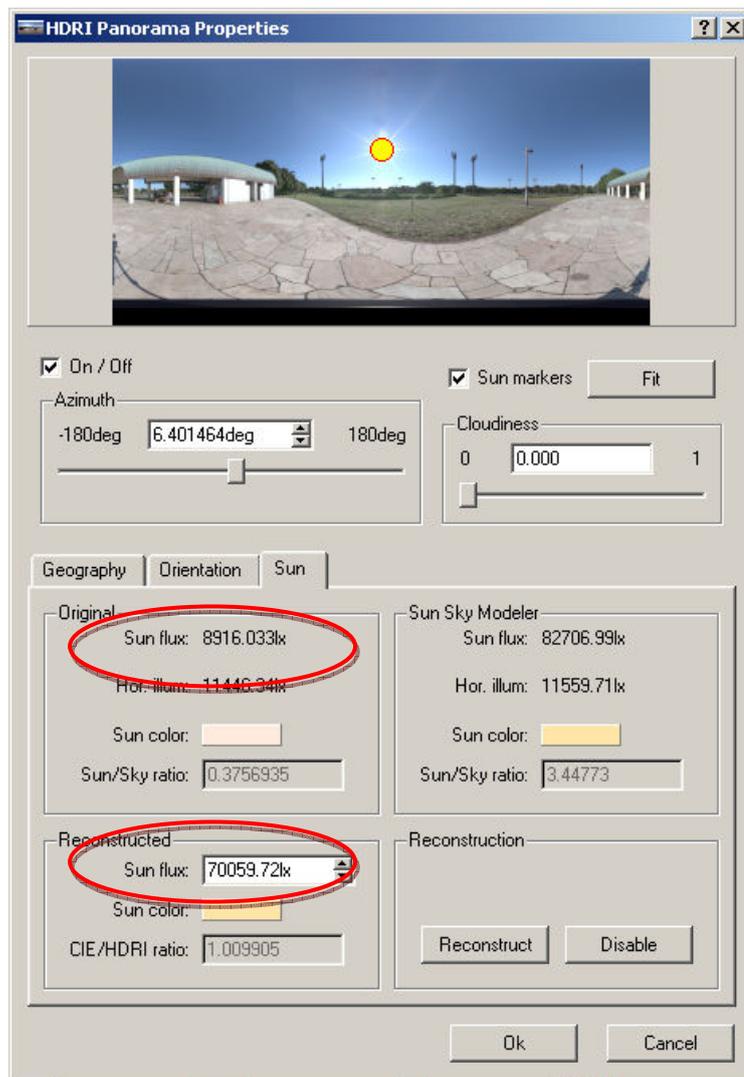


Рис. 1.17. Реконструкция яркости солнца.

На рис. 1.18 представлен результат работы алгоритма реконструкции яркости солнца. На рис. 1.18-а приведено изображение автомобиля, помещенного в карту освещения с видимым солнцем, освещенность от которого вычислена из самой карты (и равной 8916,03 люкс). Видно, что освещение автомобиля не соответствует яркому солнечному свету. На рис. 1.18-б приведено изображение, полученное с помощью алгоритма реконструкции солнца (освещенность от которого равна 70059,03 люкс). Освещение автомобиля и тени выглядят правдоподобно.



Рис. 1.18-а. Изображение, полученное без реконструкции солнца.



Рис. 1.18-б. Изображение, полученное с применением реконструкции солнца.

1.3.6. Результаты

Генерация изображений диффузных поверхностей или поверхностей со сложным законом отражения света требует больших вычислительных ресурсов. Построение изображения с помощью Монте Карло обратной трассировки лучей требует минут, а иногда и десятков минут. Например, время генерации рис. 1.18 с разрешением 640x480 на Pentium IV 2.66 GHz и 1 Gb RAM потребовало около 3-х минут. В то же время расчет освещенности

от изображения с большим динамическим диапазоном и выделение ярких источников света не зависят от его размера. Поэтому карты освещения с большим разрешением могут быть использованы без дополнительных вычислительных затрат.

Вычисление физически корректной освещенности является основой системы реалистической визуализации. Поэтому корректное задание входных данных, а именно корректное задание солнца, было важным. Анализ нескольких десятков изображений с большим динамическим диапазоном (карт освещения), содержащих небо, показал, что физически корректных карт практически не существует. Все они имеют недостатки в области представления солнца. Это связано с невозможностью напрямую зарегистрировать его яркость матрицами цифровых фотоаппаратов или сканирующих устройств. Очевидно, в большинстве случаев производители карт освещения минимизируют время их создания, что и приводит к неточностям в задании окружения.

Разработанные модификации алгоритмов предварительной обработки изображений с большим диапазоном яркости учитывают эти недостатки. Оба описанных метода, реконструкция солнца и компенсации его недооценки, улучшают качество получаемых изображений. В итоге реализованные алгоритмы позволяют получить более корректный результат, являются устойчивыми к различным ошибкам карт освещения.

1.4. Автоматизация задания фонового изображения

Фоновое изображение является важным элементом для получения ощущения реалистичности изображения. Задать все окружение вокруг моделируемой сцены со всеми необходимыми деталями в виде объектов сцены практически невозможно. Однако именно детальное, правдоподобное окружение в большинстве случаев создает ощущение реальности. Кроме

того, использование в качестве фонового изображения фотографий реального мира позволяет нам говорить о «дополненной» или «расширенной» реальности (augmented reality), когда в изображение реального мира добавляются синтезированные объекты (рис. 1.19). Это направление компьютерной графики является сейчас популярным.



Рис. 1.19. Пример расширенной реальности: виртуальная модель автомобиля на площади Парижа.

Для получения реалистичного изображения недостаточно просто «поставить» фоновое изображение позади сцены. Фон должен отражаться в зеркальных поверхностях, согласовываться с основанием, на котором стоят объекты сцены, и на которое они отбрасывают тень, он должен правильно (с учетом преломления света) быть виден в прозрачных объектах сцены. Поэтому должны быть разработаны как технологии, обеспечивающие простоту задания фона во всех направлениях, так и алгоритмы предварительной обработки фотографий, создающие впечатление «погружения» виртуальной сцены в окружение, запечатленное на ней.

1.4.1. Технология фотомонтажа.

Технология фотомонтажа характеризуется тем, что мы имеем в качестве входных данных одну обыкновенную фотографию. И, базирясь на этой информации, мы хотим построить реалистичное изображение нашей сцены, погруженной в сфотографированную реальность (так был создан рис. 1.19). Полностью автоматически сделать это оказалось невозможно. Однако процесс задания таких сцен был существенно автоматизирован и упрощен.

В предыдущие годы автором с коллегами в рамках работ по исследованию методов реконструкции искусственной реальности были разработаны алгоритмы и методы, позволяющие реконструировать трехмерные пространственные модели объектов сложной формы (прежде всего архитектурных объектов) на основе их фотографий или видеоснимков [1, 80-82]. Из этих работ оказалось возможным взять алгоритмы автоматического вычисления положения и ориентации камеры. Также автоматически возможно задать дополнительную плоскость, на которой будут помещены объекты сцены. Эта плоскость необходима для получения теней в итоговом изображении, но при этом сама плоскость в начальной сцене не присутствовала, и поэтому не должна быть заметна. Это достигается проецированием на нее фотографии фона из точки положения камеры. Спроектированное изображение сохраняется в виде обычной текстуры, нанесенной на плоскость. В результате на финальном изображении плоскость не будет видна, если мы не будем изменять параметры камеры. Такая подготовка сцены для фотомонтажа делается в автоматическом режиме.

Но для получения теней от объектов сцены необходимо также задать условие освещения, близкое к тому, которое запечатлено на фотографии. Для этого была предоставлена возможность оператору указать направление освещения по теням на фотографии, подправить это направление, если оно было восстановлено не совсем точно (рис. 1.20). Только направление на

солнце, как наиболее мощный источник света, дающий резкие тени, можно было восстановить таким образом.



Рис. 1.20. Процесс подготовки сцены для фотомонтажа. Красная сетка показывает положение дополнительной плоскости, красная стрелка задается оператором, как направление солнечного света.

Даже этот простой механизм позволил генерировать вполне правдоподобные изображения. Примеры фотомонтажа, когда модели автомобилей встраиваются в фотографию, показаны на рис. 1.21. Время работы оператора сводилось к минимуму, фактически к правильному заданию солнечного света. Обычно подготовка сцены для фотомонтажа занимала несколько минут.



Рис. 1.21. Примеры реалистичных изображений, полученные технологией фотомонтажа.

Основными ограничениями этого метода являются:

- (1) частичная корректность отражений; отражения на объектах сцены выглядят правдоподобно, только если отраженный луч попадает на фотографию фона, при этом отражение в сторону камеры будет неправдоподобным, так как за камерой фона нет.
- (2) возможность восстановить только солнечное освещение, к фотографиям с пасмурным небом или внутри помещения он обычно неприменим;
- (3) привязанность изображения к восстановленным параметрам камеры, т.е. при их изменении получение реалистичного изображения становится невозможным;

1.4.2. Использование карт освещения в качестве фона

Использование карт освещения в качестве фонового изображения [29, 31] практически свободно от ограничений, перечисленных выше. Более того, этот метод является автоматизированным.

При использовании изображения с большим динамическим диапазоном для построения фона считается, что направление зенита сцены совпадает с направлением на верхний полюс карты освещения. Это соответствует процессу ее съемки. Изменение географической ориентации сцены приводит к соответствующему изменению фонового изображения.

Сферическая панорама, заданная картой освещения, предполагается нанесенной на бесконечно удаленную сферу. Для того чтобы объекты сцены выглядели согласованно со сфотографированным изображением, необходимо, чтобы положение камеры при генерации реалистичного изображения совпадало с положением камеры при фотографировании карты освещения. Обычно фотографирование ведется со штатива высотой 1,0-1,5 метра. Поэтому желательно, чтобы высота камеры сцены была определена в этих границах. Отклонение от этих размеров может привести к несогласованности объектов в итоговом изображении.

Бесконечно удаленная сферическая панорама подразумевает, что все первичные и отраженные лучи, попадающие на нее, выпущены из одной точки – из центра сферы. Поэтому построенное изображение будет выглядеть правдоподобно только, если расстояние между камерой и объектами сцены будет существенно меньше предполагаемого расстояния до сфотографированных объектов в панораме. В случае же, когда эти расстояния сравнимы, то отражения фона в объектах сцены будут неправильными, что может испортить восприятие всего изображения.

Так как чаще всего верхняя полусфера карты освещения содержит изображение неба, то для нее расстояние до объектов в панораме действительно являются существенно больше, чем размеры сцены. Для нижней же полусферы был разработан алгоритм частичной коррекции отражений, который позволяет получить приближенные отражения близких объектов нижней части сферической панорамы. Предполагается, что поверхность земли плоская и вся нижняя полусфера панорамы проецируется на эту воображаемую плоскость. Таким образом, будем считать, что в объекте сцены отражается изображение воображаемой плоскости. Это отражение более корректно. Однако так как проекция на плоскость делается из центра бесконечной сферы, то корректность отражения все-таки будет не полной. Это проиллюстрировано на рис. 1.22.

Корректное отражение на объекте сцены должно соответствовать лучу «0», который отражен в нижнюю полусферу. Луч «1», исходящий из положения камеры, имеет то же направление, и поэтому на бесконечно удаленной сфере он попадает в ту же точку, что и луч «0». Очевидно, что такое отражение будет верным для сильно удаленных «объектов» панорамы. Однако хотелось бы получить отражения более близких «объектов», что создаст большую реалистичность погружения объекта сцены в окружении, заданном картой освещения. Луч «2» является проекцией по направлению к камере нижней полусферы на воображаемую плоскость, и точка панорамы ему соответствующая является более близко расположенной к объекту

сцены, чем точка лучей «0» и «1». Точка панорамы, соответствующая лучу «2», и будет использоваться для отражения в объекте сцены. Подмена луча «0» лучом «2» является приемлемым приближением для отражения протяженных объектов панорамы таких, как трава, асфальт, грунт и так далее.

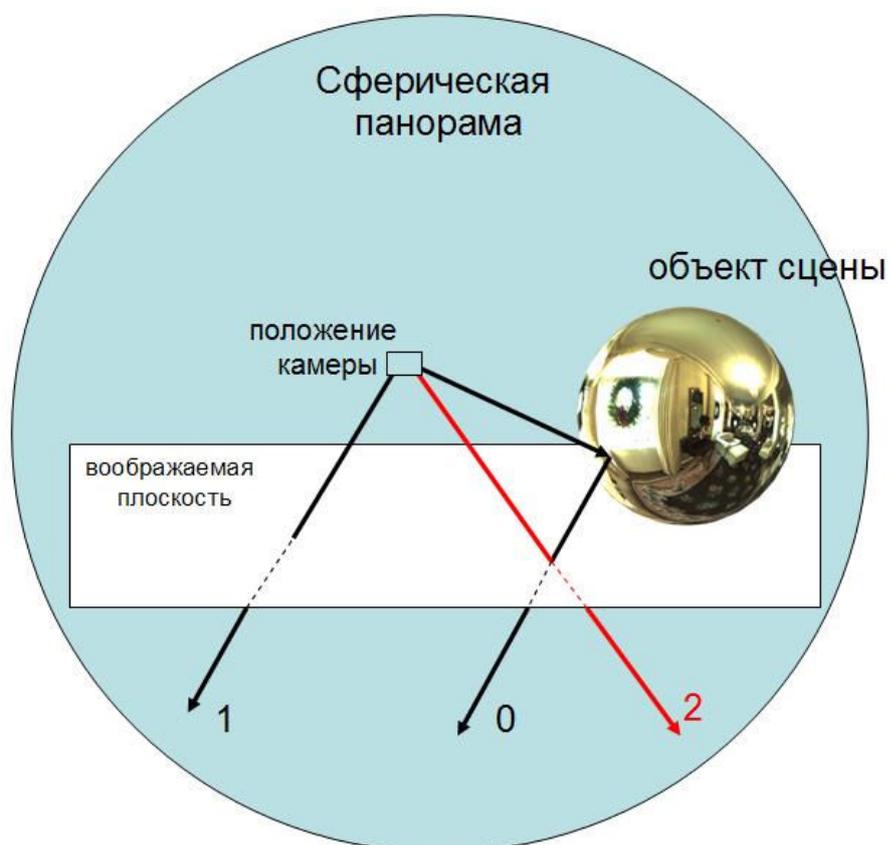


Рис. 1.22. Проекция нижней части панорамы на воображаемую плоскость. Луч «0» - отражение от объекта сцены; луч «1» - параллельный отраженному луч, выпущенный из положения камеры; луч «2» - проекция нижней полусферы на воображаемую плоскость.

Воображаемая плоскость используется также и для построения теней от объектов сцены, помещенных в окружение, задаваемое картой освещения. Тени от объектов сцены на воображаемой плоскости вычисляются с помощью метода Монте-Карло обратной трассировки лучей. Если луч, проходящий через точку экрана, пересекает воображаемую плоскость и попадает на фон, заданный картой освещения, то для вычисления теней можно использовать затенение видимого фона, определяемое для диффузной модели отражения следующей формулой:

$$L_S(\vec{v}) = \frac{E_S(x)}{E(x)} \cdot L(\vec{v}),$$

где \vec{v} – направление луча от камеры в сцену,

x – точка пересечения с луча \vec{v} с воображаемой плоскостью,

$L_S(\vec{v})$ – видимая яркость поверхности с учетом тени,

$L(\vec{v})$ – видимая яркость фона без учета тени,

$E_S(x)$ – освещенность воображаемой поверхности в точке x с учетом возможного затенения,

$E(x)$ – освещенность в той же точке поверхности без учета затенения.

Значения освещенности в обоих случаях вычисляются с помощью метода Монте-Карло:

$$E(x) = \sum_{(\vec{n} \cdot \vec{\theta}) \geq 0} L(\vec{\theta}),$$

$$E_S(x) = \sum_{(\vec{n} \cdot \vec{\theta}) \geq 0} L(\vec{\theta})h(\vec{\theta}, x),$$

где $h(\vec{\theta}, x)$ – функция видимости в заданном направлении из данной точки, принимающая значения 0 (есть затенение) или 1 (нет затенения), она обратна пересечению луча с объектами сцены,

$\vec{\theta}$ – произвольное направление из точки x . Число лучей, которые используются в определении освещенности точки на воображаемой плоскости, зависит от установленной точности вычисления. Лучи для вычисления тени генерируются с равномерным распределением в точке пересечения x .

Для уменьшения погрешности при вычислении степени затененности важно, чтобы одни и те же сгенерированные лучи использовались как при первом вычислении освещенности, когда объекты сцены учитываются, так и при втором, когда объекты не учитываются. Поэтому при первом вычислении создается список лучей, использующихся и во второй раз. В

результате мы имеем мягкие тени от небесной полусферы, резкие тени от прямо видимого солнца строятся от выделенного источника света.

Важным фактором реалистичности сгенерированного изображения является согласованность изображений фона, полученного в результате фотографирования, и смоделированных объектов сцены. Для получения высококачественного итогового изображения разрешение фона, являющегося фрагментом сферической панорамы, должно быть приблизительно 2000 на 1500 точек. Предполагая, что горизонтальный угол зрения при генерации изображения равен 60° , а вертикальный – 45° , получаем размер карты освещения порядка 12000 на 6000 точек. «Экстремально большое разрешение» карт освещенности, предлагаемых в Интернете – 6248 на 3124 точек, что приблизительно в четыре раза меньше необходимого разрешения. Интернет-сайт сообщества Hyperfocal Design [72] предлагает изображения с большим динамическим диапазоном с разрешением 10000 на 5000 точек. Однако здесь предлагается только верхняя, небесная полусфера карты освещения. Использование таких данных для генерации реалистичных изображений требует дополнительных усилий, так как панорама не может быть использована в качестве полного фона.

Во избежание зернистости видимого фона или отражений, каждая точка фона получается интерполяцией четырех близлежащих точек панорамы. Но это не всегда позволяет создать приемлемое итоговое изображение, для некоторых карт освещения фон выглядит размытым. Проблема разрешения изображения с большим динамическим диапазоном, недостаточного для качественного фона, может быть решена с помощью использования дополнительного изображения. Будем разделять использования панорамы для представления фона в итоговом изображении и для построения отражений от объектов сцены. При построении отражений использование сферической панорамы увеличивает реалистичность изображения, но не требует большого пространственного разрешения, так как отражения обычно не достаточно четкие. В то же время при

представлении фона в итоговом изображении необходимо иметь достаточное пространственное разрешение, а большой динамический диапазон здесь не важен, так как в итоге изображение будет приведено к динамическому диапазону монитора. Поэтому в последнем случае для фона можно использовать простое изображение, полученное с помощью обычной цифровой камеры с разрешением от 4 мегапикселей и выше. Необходимо только, чтобы это изображение было сделано с той же позиции, что и вся карта освещения.



Рис. 1.23.Использование дополнительного изображения в качества фонового.

Описанная технология требует дополнительного пользовательского интерфейса для совмещения изображений карты освещения и фотографии. Так как в обоих случаях направление зенита и горизонтальная плоскость совпадают по условиям съемки, сделанной с одного штатива, то необходимо

только определить азимут. А эта процедура уже достаточно проста. На рис. 1.23 показано изображение, сгенерированное с использованием этой технологии, дающей хорошую степень реалистичности.

1.4.3. Результаты

Два описанных метода задания фотографического фона, реализованные в программном комплексе генерации реалистичных изображений, позволяют создавать изображения расширенной реальности, когда в реальное сфотографированное окружение помещается виртуальный объект. Оба метода автоматизируют процесс создания итоговых реалистичных изображений.

Преимущество первого метода – фотомонтажа – в том, что для задания окружения достаточно всего одной фотографии. Однако он не может быть полностью автоматизирован (источник света необходимо задавать интерактивно), хотя и затраты по подготовке сцены невелики. Также ограничениями этого метода являются фиксированное положение камеры, частичное отсутствие отражений на объектах сцены и применимость фактически только для дневных, солнечных фотографий.

Второй метод – использование карт освещения для фона – является полностью автоматизированным. Вместе с автоматизацией задания освещения сцены, описанном в разделе 1.3, этот метод значительно упрощает создание изображений расширенной реальности. Фактически пользователь указывает, в какую карту освещения надо поместить виртуальную сцену, и после вычислений получает итоговое изображение. Дополнительные действия, такие как коррекция солнечного света или установка дополнительного кадра в качестве фона, нужны только в некоторых частных случаях. Так как карта освещения является сферической панорамой, метод свободен от таких недостатков фотомонтажа, как частичность отражений и фиксированное положение камеры.

Более того, определенная траектория движения камеры в сцене с картой освещения создает ощущение движения виртуального объекта в реальном окружении. В примере на рис. 1.24 виртуальный автомобиль движется по двору Версаля. Таким образом, можно достаточно просто строить не только отдельные изображения расширенной реальности, но и целые видеопоследовательности.

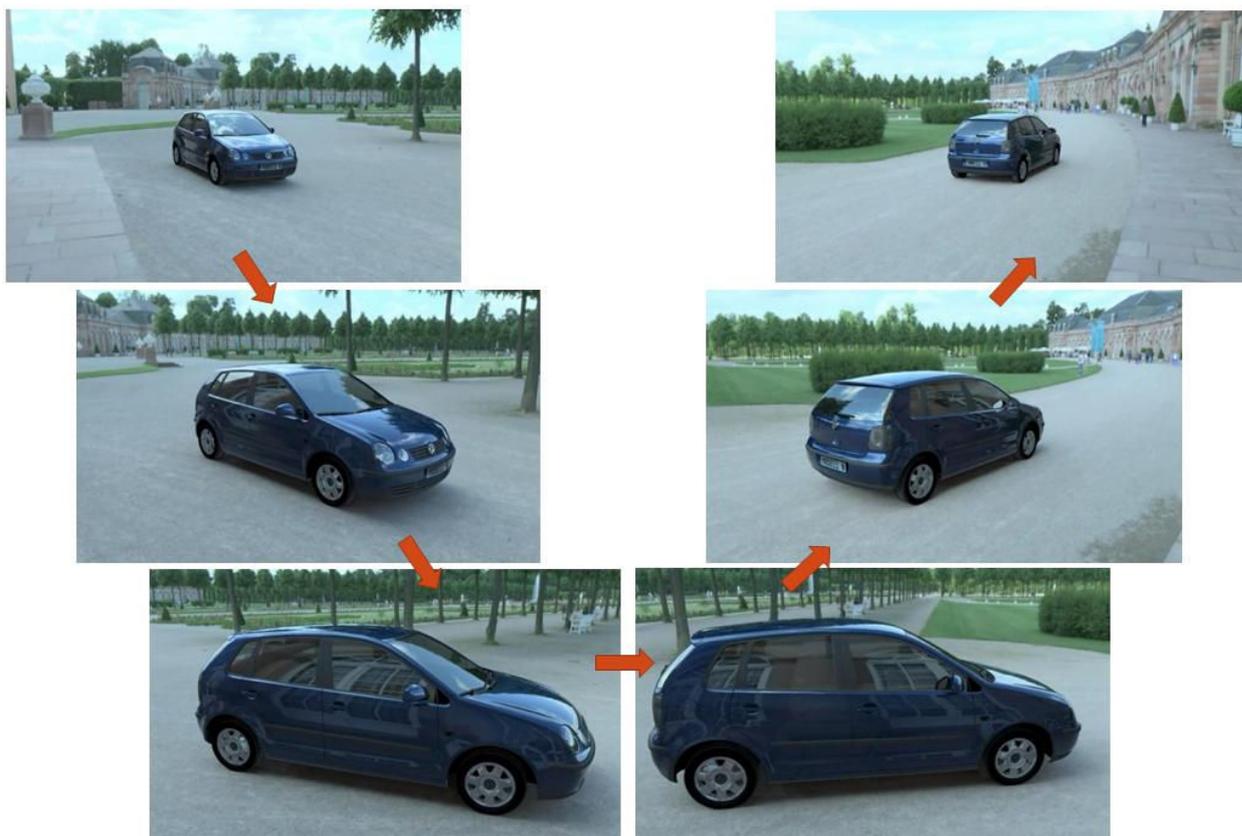


Рис. 1.24. «Движение» виртуального объекта в сферической панораме.

1.5. Выводы

Разработан комплексный подход к решению проблемы задания таких параметров виртуальной сцены, как источники освещения и фоновое изображение. Он позволяет существенно облегчить процесс создания сцен и

сократить трудозатраты пользователей программного комплекса реалистичной визуализации.

Использование карт освещения в виде сферических панорам практически полностью автоматизирует процесс спецификации окружения для создания изображений расширенной реальности. Разработанные алгоритмы позволяют на итоговом изображении «погружать» геометрические искусственные объекты сцены в окружение реального мира. Спектр применения такого моделирования чрезвычайно высок. Это и оценка внешнего вида разрабатываемого продукта (автомобиля, мобильного телефона и пр.) в реально существующих условиях, и оценка ослепляющего освещения для водителей и летчиков, что связано с проблемами безопасности, и разработка новых материалов с оценкой их оптических свойств.

Автоматизация использования карт освещения потребовала разработки физически корректных методов их предварительной обработки. Анализ доступных карт окружения показал, что в большинстве случаев они не содержат заявленных физически точных значений. Это привело к модификации алгоритмов предварительной обработки входных данных, направленной на создание алгоритмов, устойчивых к их некорректности.

Существенным шагом к автоматизации задания источников искусственного освещения является поддержка распространенных форматов таких, как файлы гониограмм IES и файлы полного описания ламп и светодиодов RaySet. При наличии библиотек, содержащих файлы для реальных ламп, и предоставлении описания источника света его производителем в Интернете процесс его спецификации практически сводится к указанию имени файла.

Без создания встроенных модулей для САПР систем мы не можем говорить о практическом применении программного комплекса моделирования распространения света и генерации реалистичных изображений. Все современные продукты создаются в таких системах,

инженеры и дизайнеры привыкли работать в этой среде. Поэтому только в рамках этой среды можно говорить о реальной применимости средств и методов физически корректного моделирования и расчета распространения света.

Глава 2. Методы автоматизации задания оптических характеристик объектов и поверхностей сцены

Оптические свойства геометрии сцены необходимы для расчета взаимодействия света с объектами при моделировании освещенности. Особенностью этого класса входных данных являются высокие требования к точности задаваемых значений. Поскольку при моделировании реальных сцен часто происходит многократное отражение света, то даже небольшая ошибка в задании оптических свойств материалов может привести к существенной ошибке результата, так как ошибка накапливается.

Отраженный и преломленный свет в классических моделях взаимодействия света и объекта разделяют на две компоненты – зеркальную и диффузную. Зеркальная компонента представляет собой свет, отраженный (преломленный) непосредственно от поверхности, в то время как диффузная компонента аппроксимирует свет, подвергшийся множественному рассеянию внутри или на поверхности моделируемого объекта. В первых классических работах Фонга [83], Блинна [84], Кука и Торранса [85] диффузная составляющая представляется с помощью изотропной ламбертовской функции. Однако лишь немногие реальные поверхности рассеивают свет без значительных отступлений от закона Ламберта. Поэтому в более поздних работах [86, 87] были попытки ввести диффузно-направленную функцию. Более подробно классификация известных методов расчета оптических свойств объектов приведена в [88].

Наиболее общий способ описания отражающих (светорассеивающих) свойств поверхности – задание *двухнаправленных функций отражения/пропускания* (ДФО/ДФП или BRDF/BTDF – Bidirectional Reflection/Transmittance Distribution Function в англоязычной литературе) [9,

89, 90]. ДФО – это в общем случае функция от двух направлений, представляющая собой отношение яркости описываемого объекта в заданном направлении наблюдения w_{out} к его освещенности с направления w_{in} . Кроме ДФО для задания оптических свойств объектов может быть использована функция объемного рассеяния (ФОР или BSSRDF – Bi-directional Sub-Surface Scattering Reflectance Distribution Function) [9], определяющая яркость объекта в заданном направлении наблюдения w_{out} с учетом объемного рассеяния света в объеме объекта.

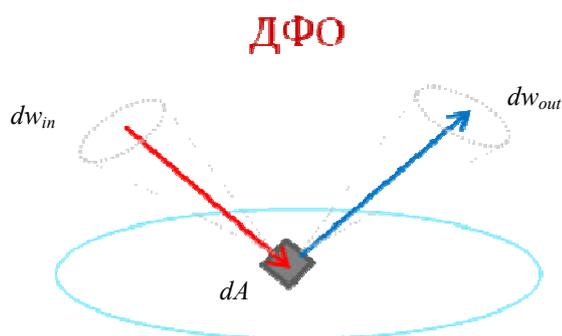


Рис. 2.1. Определение ДФО

По определению ДФО есть отношение яркости поверхности в заданном направлении наблюдения к ее освещенности с некоторого другого заданного направления (рис. 2.1):

$$\text{ДФО}(dw_{in}, dw_{out}) = \frac{dL(dw_{out})}{dE(dw_{in})},$$

где dL – это яркость света, рассеянного поверхностью в телесный угол dw_{out} ,

dE – освещенность поверхности, приходящая из dw_{in} .

Таким образом, по определению ДФО есть функция четырех переменных:

- двух координат, определяющих направление падения света $(\theta_{in}, \varphi_{in})$,
- двух координат, определяющих направление рассеяния света $(\theta_{out}, \varphi_{out})$.

Значения (θ, φ) задаются в сферической координатной системе, связанной с dA . По определению [91] яркость поверхности есть:

$$L(dw_{out}) = \frac{d^2 F_{refl}}{dw_{out} \cdot \cos(\theta_{out}) \cdot dA},$$

где F_{refl} – это поток световой энергии рассеянной или отраженной поверхностью dA в телесный угол dw_{out} , определяемый направлением θ_{out} .

Освещенность поверхности по определению есть:

$$E(dw_{in}) = \frac{dF_{in}}{dA}$$

где dF_{in} – это поток световой энергии, приходящий на поверхность dA из телесного угла dw_{in} . Таким образом, ДФО есть:

$$ДФО(dw_{in}, dw_{out}) = \frac{d^2 F_{refl}}{dw_{out} \cdot \cos(\theta_{out}) \cdot dF_{in}}$$

Размерность ДФО – 1/стерадиан.

ДФО описывает закон, по которому поверхность взаимодействует с попадающим на нее светом, и, по сути, представляет собой угловое распределение рассеянной поверхностью энергии света. Обычно ДФО определяется для полусферы направлений падения света (телесный угол dw_{in}) и полусферы направлений рассеяния света (телесный угол dw_{out}). Направление падения света часто называют входным направлением, направление рассеяния света – выходным направлением.

Существует ряд используемых в программных приложениях компьютерной графики представлений ДФО. В нашем программном комплексе используются ДФО, основанные на различных физических данных. Они могут быть измерены или смоделированы. Поэтому используется наиболее универсальное, табличное представление таких ДФО. При табличном представлении ДФО задается на сетке входных и выходных

направлений. Сетка может иметь различную размерность в зависимости от требований к быстродействию и точности представления.

Для удобства визуализации ДФО можно использовать ее двумерное и трехмерное представление. На рис. 2.2 представлено двумерное сечение ДФО в плоскости падения. На рисунке расстояния от центра отражения до огибающей линии соответствуют значению ДФО в заданном направлении.



Рис. 2.2 Сечение двунаправленной функции отражения и пропускания.

Получение корректной двунаправленной функции отражения/пропускания поверхности является непростой задачей. Программно-аппаратный комплекс измерения ДФО и конкретные методы ее корректной генерации будут рассмотрены в главах 2 и 3.

2.1. Измерительный комплекс для определения светорассеивающих свойств поверхности.

Проблема измерения ДФО исследовалась и исследуется во многих институтах и университетах мира [92-96]. В ряде исследовательских центров созданы лаборатории, предоставляющие услуги по проведению подобных измерений [67, 97-99]. Существует готовый комплекс для измерения ДФО Murakami GCMS-4 [100], однако он достаточно дорог и в принципе

поставляется только в Японии и США. Поскольку измерения оптических свойств необходимы для реалистичной графики на постоянной основе, был построен свой аппаратно-программный комплекс для измерения ДФО и ДФП плоских образцов материала [32, 38, 47, 49].

В самом общем виде схема измерений проста: на образец поверхности под разными углами направляют луч света и проводят измерение отраженного света для различных углов наблюдения. Этот процесс повторяют для заданного множества значений длин волн. Сложная проблема, связанная с измерениями светорассеивающих свойств, заключается в том, что в силу многомерного характера ДФО количество измерений, которые необходимо провести, измеряется десятками и сотнями тысяч. Поэтому при разработке реальных измерительных установок стремятся тем или иным образом оптимизировать этот процесс, в частности, распараллелить его, чтобы получать за одно измерение значения ДФО одновременно для некоторого множества значений входных параметров. При этом важно обеспечить достаточно высокую точность измерений.

Характерные черты сложившихся к настоящему времени подходов в области практических измерений ДФО/ДФП рассмотрим на примере работ [94-96, 99, 100].

В статье [94] представлен метод измерения ДФО с помощью точечного источника и ПЗС камеры (ПЗС – «прибор с зарядовой связью»). Образец представляет собой полуплоскость, вторая половина плоскости должна быть занята эталоном. Линия разграничения, источник и приемник лежат в одной плоскости перпендикулярной к плоскости образца и эталона. За счет одномерного движения источника или приемника в этой плоскости можно реализовать (для разных точек образца) в принципе все наборы пространственных координат ДФО. Спектральную зависимость при этом можно получать из RGB представления ПЗС камеры (или, гипотетически, меняя цвет точечного источника). Данный подход представляется весьма интересным, и мог бы получить дальнейшее развитие. Но из-за

необходимости использования образца больших размеров, что хорошо подходит для крупномасштабных объектов – стен зданий, дорожных покрытий, газонов, – он малопригоден для лабораторных измерений образцов.

В приборе Корнельского университета [95] измеряемый образец имеет две степени свободы вращения, и источник света может перемещаться по сфере вокруг образца. Приемник, представляющий собой массив фотодиодов, закреплен неподвижно. При заданном положении образца и лампы этот прибор также позволяет регистрировать множество спектральных компонент в видимом диапазоне длин волн. Сканирование углов производится под управлением программы, которая оптимизирует механические движения лампы и образца для минимизации общего времени измерений.

Точная и механически сложная установка [99] разработана и построена в Национальном Институте Стандартов. Конструкция установки состоит из 4-х независимо позиционируемых платформ. Все четыре платформы позиционируются с помощью серво двигателей управляемых 4-х осевым контроллером. Держатель измеряемого образца имеет возможность перемещения по двум направлениям в плоскости образца, что дает возможность растрового сканирования всей площади образца (30x30 см). Такая же возможность перемещения имеется у держателя эталона. Эта система позиционирования смонтирована на вращающейся платформе, что дает возможность менять угловое положение образца по отношению к падающему излучению. Датчик (с очень точной апертурой) закреплен на легком и жестком рычаге, смонтированном на второй вращающейся платформе, со-осно с осью платформы держателя образца, что позволяет осуществлять вращение датчика вокруг образца по постоянному радиусу.

Концептуально наиболее близок к представленной работе подход, описанный в статье [96]. Здесь образец и объектив ПЗС-камеры помещены в центр зеркальной полупрозрачной сферы. Через поверхность сферы образец

освещается коллимированным пучком от источника, перемещающегося по дуге для изменения угла падения. Рассеянный образцом свет, отражаясь от полупрозрачной сферы, попадает в объектив камеры. В результате на ПЗС-матрице фокусируется изображение, отображающее всю пространственную картину ДФО для данного угла падения. Спектральная зависимость обеспечивается за счет получаемого RGB представления света ПЗС-матрицей. Если же этого недостаточно, полный спектр можно получить путем использования монохромных пучков.

Достоинством прибора [96] является возможность получать за одно измерение данные для всего множества углов рассеяния. Поскольку вся область измерений представлена как изображение, любые изменения сетки могут быть выполнены на уровне программной обработки. В то же время, возможность непрерывного изменения угла падения затрудняет реализацию полноценных спектральных измерений. Существенным недостатком приборов данного типа является большое паразитное рассеяние света, возникающее за счет использования полупрозрачной сферы, что ведет к резкому снижению точности для направлений с низкой интенсивностью рассеяния на образце.

В приборе GCMS-4 [100] фирмы Мураками [101] измерения проводятся следующим образом. Источник – галогеновая лампа – и приемник вращаются вокруг вертикальной оси, проходящей через центр образца. Приемник состоит из спектрального прибора и детектора в виде диодной линейки (не ПЗС). Образец может вращаться вокруг горизонтальной оси. В результате при фиксированном положении источника, приемника и образца одновременно регистрируются все спектральные компоненты (35 точек от 390 до 730 нм с интервалом 10 нм) ДФО для одного набора геометрических переменных. Три упомянутых выше вращения позволяют получить любой набор углов, характеризующих пространственную точку ДФО (для изотропного образца). Сканирование углов производится в определенном порядке, заложенном в управляющей программе прибора.

Практически все схемы, рассмотренные в этой главе трудно (а иногда и невозможно) использовать для измерений ДФП (функции пропускания света), что является их существенным недостатком.

2.1.1. Описание комплекса для измерения ДФО/ДФП светорассеивающих свойств поверхностей

При разработке измерительного комплекса преследовались две цели – минимизация времени измерений и обеспечение высокой точности результатов. С точки зрения последней цели важно было учесть специфику ДФО/ДФП, используемых в компьютерной графике. Часто с помощью этих функций задаются свойства таких поверхностей как краски «металлик», ткани. Для этих поверхностей характерны высокий градиент функции в области углов наблюдения в окрестности направления зеркального отражения (для ДФО) и пропускания (для ДФП), как показано на рис. 2.2. Поэтому конструкция прибора и методика измерений должны обеспечивать высокое угловое разрешение координатной сетки в указанных областях.

Сокращение времени измерений было достигнуто с помощью формирования одного изображения, содержащего все отраженные направления, и его последующей цифровой обработки. С учетом существующих в данное время аппаратных возможностей это требует использования цифровой фотокамеры. Таким образом, предлагаемое решение находится на стыке трех научных направлений – оптических измерений, компьютерной графики и обработки изображений.

В установке [95], где используется видеокамера для отображения всех направлений рассеяния, пространство «выворачивается» при помощи отражающей полусферы, камера помещается рядом с образцом и используется широкоугольный объектив типа «рыбий глаз». Это идейно красивое решение приводит, однако, к высокому уровню паразитного рассеяния света, что отрицательно сказывается на надежности и точности результатов. Поэтому в данном проекте было решено поместить камеру

отдельно от образца. Рассеянный свет для выделенного направления собирается на объектив камеры с помощью линзовой проектирующей системы, а для остальных направлений – при помощи световодов.

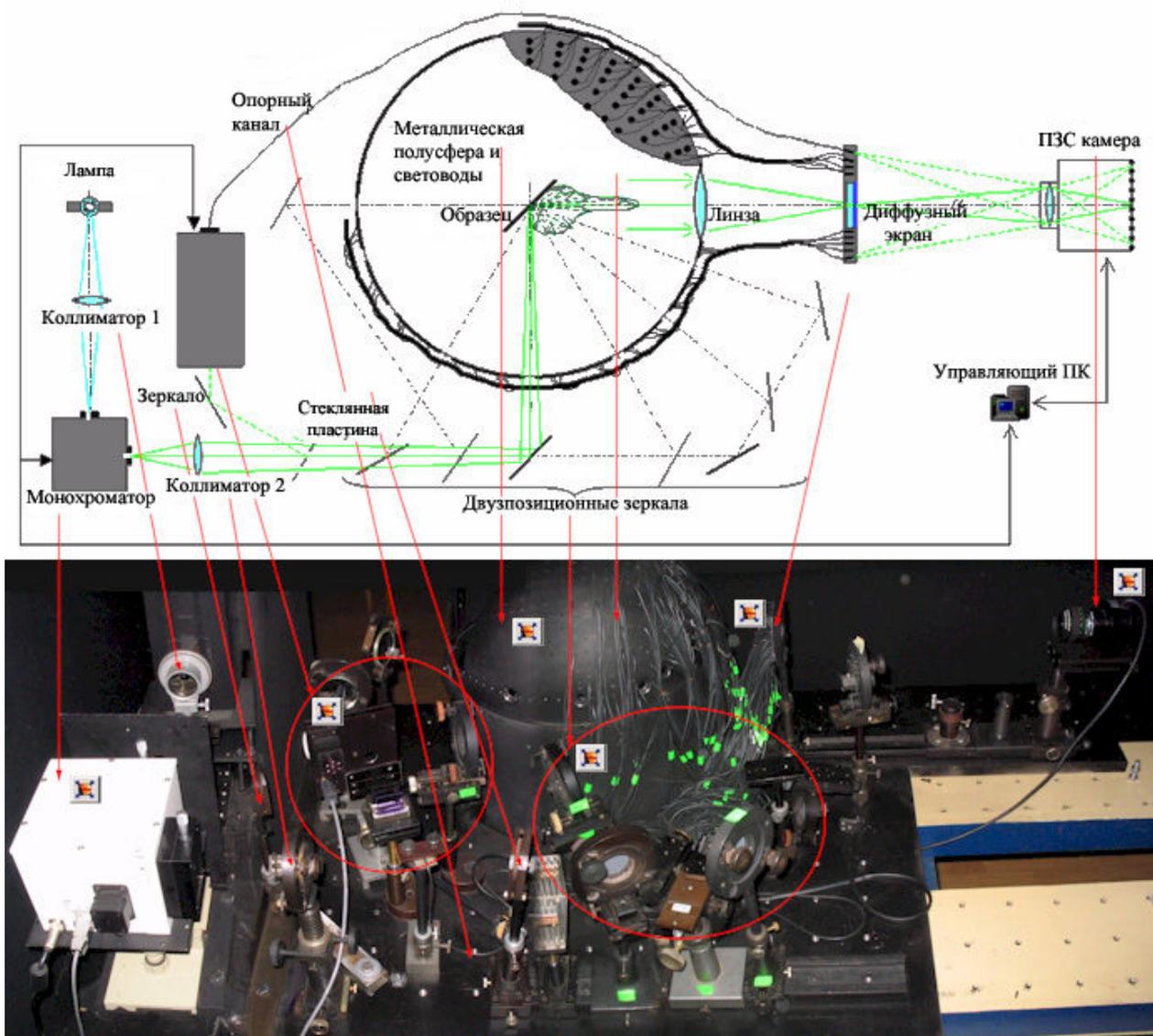


Рис. 2.3. Схема и общий вид измерительной установки.

На рис. 2.3. представлен общий вид измерительной установки и ее схема. Стрелками показано соответствие между элементами установки на фотографическом изображении и на схеме. Далее представлено описание измерительного комплекса и процесса получения данных о светорассеивающих свойствах поверхности.

Концептуальная модель измерений

Система координат для измерения светорассеивающих свойств. Рассмотрим, как происходит измерение рассеянного от поверхности света для некоторого угла падения при заданной длине волны. Образец освещают почти параллельным пучком монохромного света. Свет, рассеиваемый образцом, измеряется для множества выходных направлений, которые задаются в сферической системе координат. Ось системы координат совпадает с выделенным направлением зеркального отражения (ДФО) или пропускания (ДФП). На рис. 2.4 показана система координат для измерения ДФО для одного угла падения.

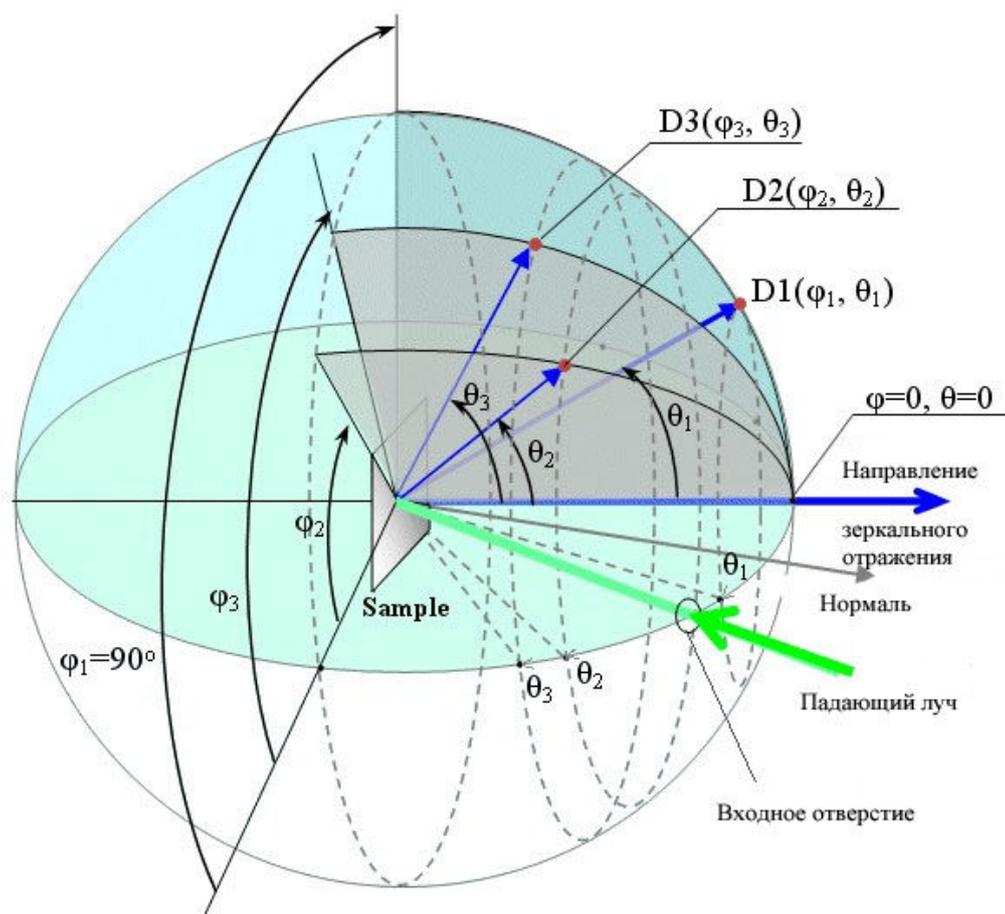


Рис. 2.4. Сферическая система координат для направлений света, отраженного от образца (sample). Направление отраженного света $D1$ имеет координаты (φ_1, θ_1) , направление $D2$ - (φ_2, θ_2) и т.д.

Координаты выходных направлений обозначены буквами θ , φ . По аналогии с географическими координатами, координаты θ и φ можно рассматривать как широту и долготу соответственно.

Варьирование направления падающего света. Измерительная установка сконструирована таким образом, что направление зеркального отражения (ось выходной системы координат для ДФО) должно оставаться неизменным и направленным на камеру. Это достигается за счет одновременного изменения направления падающего луча и поворота образца (рис. 2.5).

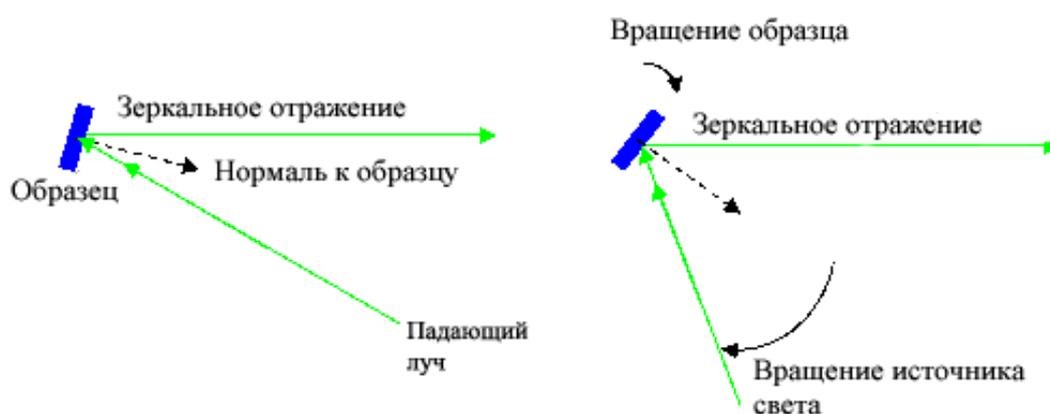


Рис. 2.5. Изменение направления падающего луча с одновременным вращением образца обеспечивает неизменность направления зеркального отражения.

Изменение направления падающего луча достигается при помощи двухпозиционных зеркал и использования нескольких входных отверстий (см. схему на рис. 2.3). Это позволяет проводить измерения для углов падения 10° , 20° , 30° , 45° , 60° для ДФО и для любых углов $<90^\circ$ для ДФП. Поддерживаются измерения только для изотропных образцов.

Нормализация распределения рассеянного света. ДФО определяется как отношение энергии света, отраженного в некотором направлении, к энергии падающего света, поэтому необходимо измерять обе эти величины. Для измерения энергии падающего света некоторая фиксированная ее часть

(около 8%) ответвляется при помощи стеклянной пластины в опорный канал (см. рис. 2.3) и измеряется каждый раз напрямую.

Описание измерительного комплекса

На рис. 2.3 приведена схема комплекса в положении, соответствующем углу падения $\sigma=45^\circ$. Измерительный комплекс состоит из оптического прибора и управляющего компьютера. Подробное и детальное описание комплекса приведено в [32].

Источником света является ксеноновая дуговая лампа с цветовой температурой 6000К. При помощи монохроматора SP-150 [102], управляемого компьютером, видимая область спектра разбивается на заданное число каналов с интервалом 10нм, в диапазоне от 390нм до 710нм.

После этого свет отражается от одного из двухпозиционных зеркал и падает на образец через одно из входных отверстий, расположенных на «экваторе» полусферы. Образец помещается в центре полусферы. Входные концы световодов вмонтированы в отверстия, высверленные в полусфере, и направлены к центру полусферы (рис. 2.6).

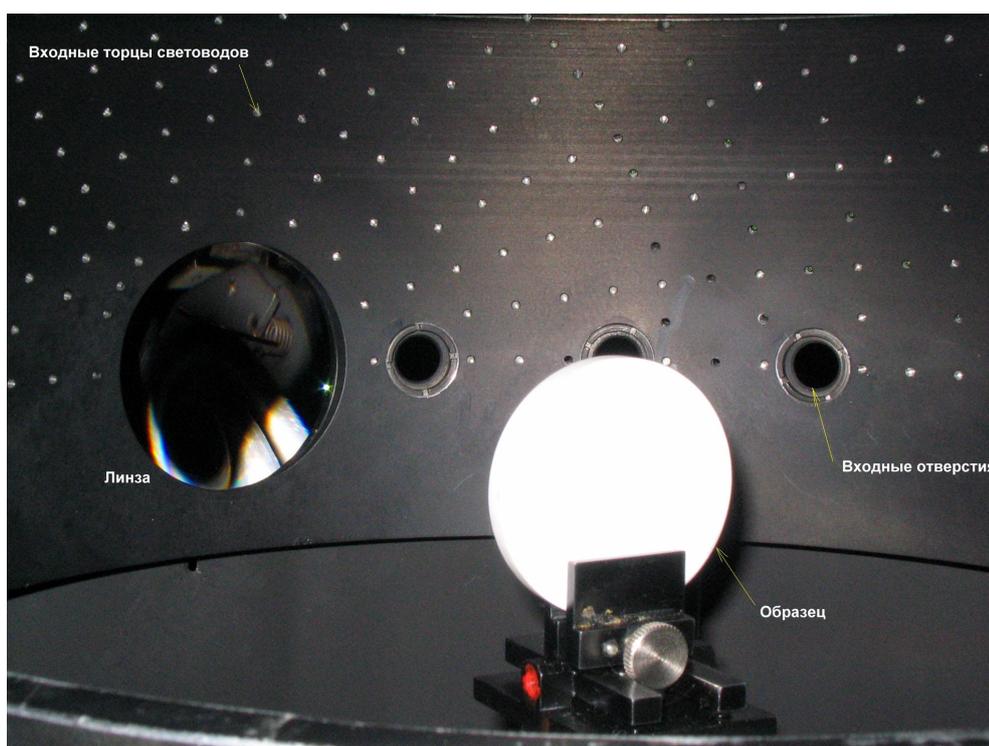


Рис. 2.6. Металлическая полусфера. Вид изнутри.

Линза собирает свет, рассеиваемый образцом в пределах не более 10° от направления зеркального отражения, и фокусирует его на круглой пластине из матированного стекла, которая находится в центре прямоугольного экрана. Такой подход позволяет существенно повысить угловое разрешение в области вблизи зеркального отражения, где для большинства образцов ДФО имеет наиболее высокий градиент. На том же экране смонтированы выходные торцы световодов, идущих от полусферы, а также выходной торец световода опорного канала. Общий вид экрана показан на Рис. 2.7.

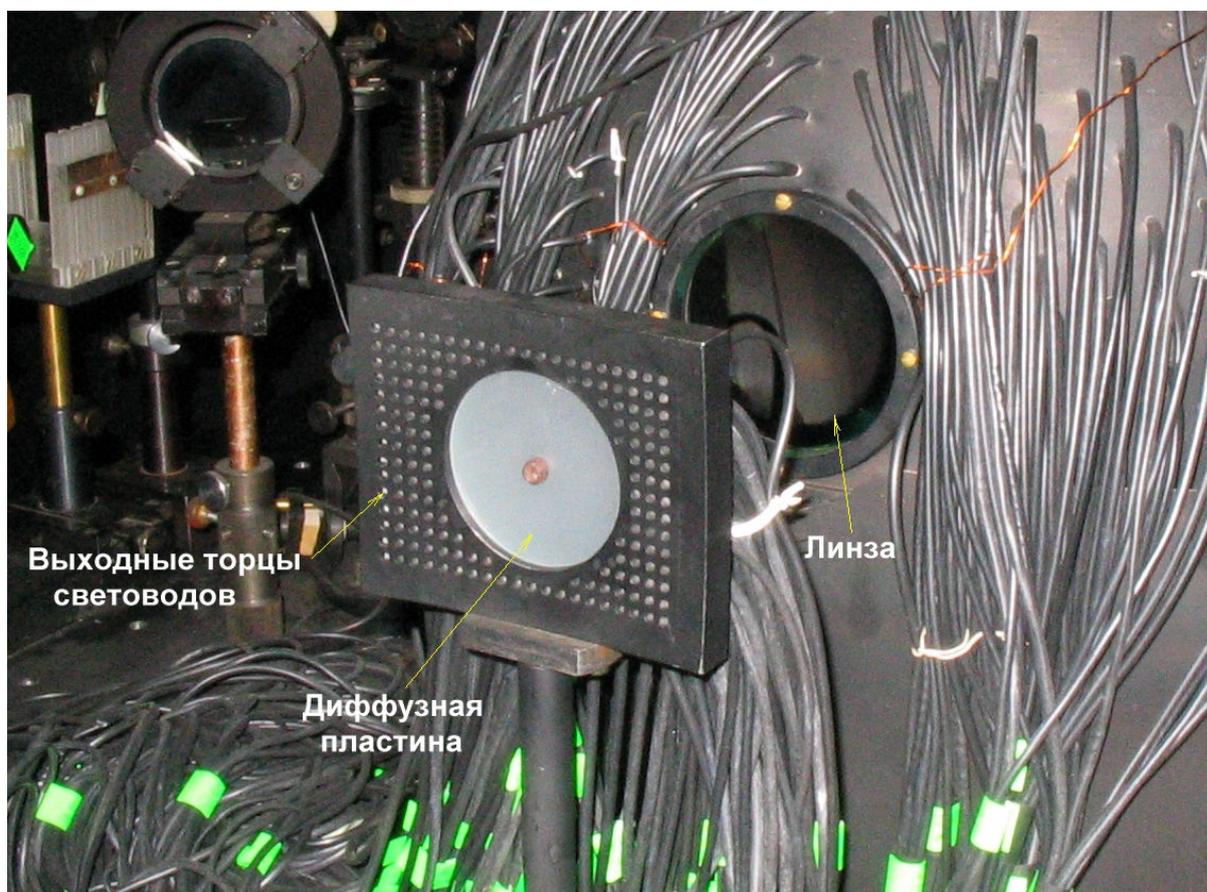


Рис. 2.7. Экран с выходами световодов и диффузной пластиной.

ПЗС камера (ST-5С, производство Santa Barbara Instruments Group, Inc.) формирует изображение экрана с пластиной из матированного стекла и выходными торцами световодов.

Процесс измерений

Как описано выше, комплекс регистрирует одновременно все предусмотренные конструкцией компоненты ДФО или ДФП для заданной длины волны и при установленном значении угла падения света. Для фиксированного угла падения производится сканирование всей спектральной области измерений при помощи управляемого компьютером монохроматора. Указанные действия составляют основу измерительного цикла для заданного угла падения и проводятся автоматически. Действия, обеспечивающие изменение угла падения, (изменение положений зеркал) производятся вручную. Изменение угла падения для ДФП достигается поворотом образца, а для ДФО еще и синхронным с ним изменением траектории падающего луча.

При измерении ДФО для типичного образца с автомобильной краской время, затрачиваемое на ручные действия, составляет примерно 70 минут. При измерении ДФП, вследствие оптимизации компоновки прибора, на ручные действия приходится порядка 20 минут.

Технические характеристики

Спектральный диапазон: 390-710 нм с шагом 10 нм.

Динамический диапазон яркости: 0.05 – 2500

Повторяемость полученных результатов: 1-3%

Точность полученных результатов: 4-8%

Угловое разрешение: 0.5° – 1.5° в диапазоне до 10° от направления зеркального отражения, 1.5° – 8° для других направлений, в среднем – около 3°.

Размер светового пятна: 1-2 см (в зависимости от угла падения)

Размер образца (L – длина, Н – высота, Т – толщина):

минимальный: 5 см L x 3 см Н

максимальный: 20 см L x 15 см Н x 1.0 см Т

Кривизна образца. Конструкция измерительного комплекса предназначена для измерения плоских образцов. Кривизна поверхности отрицательно сказывается на точности результатов, однако радиус кривизны 300 см и выше приемлем для измерений.

Углы падения света: 10°, 20°, 30°, 45°, 60° для ДФО и любые углы <90° дляДФП.

2.1.2. Программная часть комплекса измерений

Функции управляющего компьютера

Три блока измерительного комплекса являются программно управляемыми: монохроматор, ПЗС камера и фильтры опорного канала. Установка образца, перекидывание двухпозиционных зеркал (т.е. фактически это установка угла падения света на образец) делается вручную. Такая схема позволяет минимально занимать время оператора потому, что у установки фиксированное число углов падения, и их только 5. В то же время измерение данных для одного угла падения для всех длин волн с подбором необходимой экспозиции может занимать больше часа. И эта часть измерений делается в автоматическом режиме. На рис. 2.8 приведена схема программной части измерительного комплекса, также показаны программно управляемые блоки и передаваемые им данные.

Как описано в предыдущем разделе, свет, рассеянный в заданном направлении (φ, θ) , регистрируется на выходном отверстии полусферы. Часть излучаемого лампой света ответвляется при помощи стеклянной пластины и также регистрируется через опорный канал.

Зарегистрированные значения светового потока, отраженного образцом и излучаемого лампой, пропорциональны значениям интенсивности, поэтому соответствующее значение двунаправленной функции отражения и пропускания света (ДФ) может быть выражено как

$$\text{ДФ}(\varphi, \theta) = S(\varphi, \theta) \times L / L'$$

где L и L' – зарегистрированные значения энергии для отраженного образцом и излучаемого лампой света. Коэффициенты пропорциональности $S(\varphi, \theta)$ определяются рядом параметров, а именно геометрией устройства, диафрагмы, чувствительностью датчиков и т.п. Эти коэффициенты могут быть вычислены в результате проведения измерений для эталонного образца с известной ДФО (BRDF):

$$S(\varphi, \theta) = \text{ДФО}_{\text{эталона}}(\varphi, \theta) / (L / L')$$

В качестве такого эталона используется паспортизованный образец из молочного стекла МС-20.

Процедура измерения эталонного образца и вычисления коэффициентов $S(\varphi, \theta)$ называется калибровкой. Такой подход предпочтителен практически во всех задачах амплитудного измерения рассеяния [103]. Калибровка должна проводиться регулярно для учета возможных изменений в характеристиках приборов, входящих в состав установки (например, изменений параметров лампы).

Постобработка первичных данных

Первичные данные измеренных ДФО/ДФП представляют собой набор значений для некоторого множества выходных направлений (θ_i, φ_i) . Для некоторых выходных направлений данные могут по тем или иным причинам отсутствовать – например, из-за того, что яркость по данному направлению

оказалась вне допустимого диапазона, воспринимаемого камерой. Кроме того, как указано в предыдущем разделе, данные также отсутствуют для некоторых направлений падения. Для таких направлений первичные значения также равны нулю. Пример первичных данных ДФО, полученных в результате измерений, представлен на рис. 2.9.

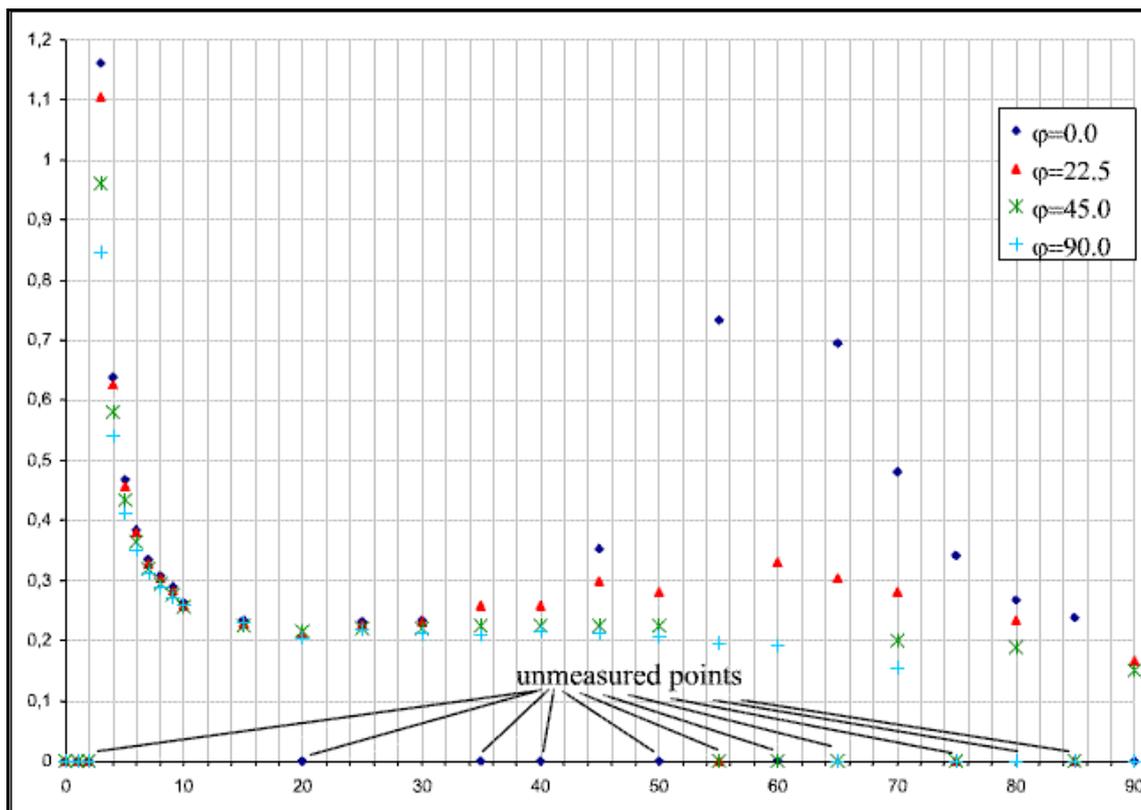


Рис. 2.9. Пример первичных данных ДФО для $\varphi=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 90^\circ$.

Приближение первичных данных гладкой кривой. На первом этапе постобработки производится вычисление гладкой кривой, максимально близкой к измеренным данным. Целью данного этапа является избавление от случайного шума и получение данных для всего диапазона угловых координат.

Восполнение данных для выделенных направлений падения света. На втором этапе постобработки восполняются данные, соответствующие

направлениям падения, для которых измерения не произведены или в принципе не могут быть выполнены ($\sigma=0^\circ$ для ДФО и $\sigma=90^\circ$ для ДФО/ДФП).

Для промежуточных значений σ ДФО(σ) вычисляется путем интерполяции. ДФО для $\sigma = 90^\circ$ устанавливается равным ДФО при $\sigma = 60^\circ$, т.е. ДФО для последнего из измеряемых углов падения. ДФО для $\sigma = 0^\circ$ вычисляется экстраполяцией по значениям ДФО при $\sigma=20^\circ$ и $\sigma=10^\circ$ с усреднением по всем значениям φ .

Результат постобработки записывается в файл в формате, который может непосредственно использоваться программами компьютерной графики для создания изображений фотореалистичного качества.

2.1.3. Сравнение с существующими измерительными комплексами

Разработанный измерительный комплекс сравнивался с существующими измерительными приборами и комплексами как академическими, так и коммерческими. Сравнения проводились для результатов измерений одного и того же набора образцов. Образцы пересылались в фирмы или университеты, они сами делали измерения и возможные процедуры постобработки данных. Были сделаны сравнения с установками Краковского технического университета (Польша), Murakami GCMS-4 [100] (Япония), приборами и установками трансконтинентальных компаний X-Rite/GretagMacbeth [104] и Radiant Imaging [67].

Пользовались следующими основными критериями сравнения:

(1) Визуализация виртуальной сферы с ДФО, нанесенной на ее поверхность, методом трассировки лучей. Этот критерий был выбран потому, что нашей конечной целью является создание реалистичных изображений, т.е. нам важно как измеренные ДФО будут выглядеть в результате визуализации. Форма сферы на одном изображении позволяет увидеть все углы наблюдения: как по направлению нормали к объекту, так и по касательной к поверхности.

(2) Сравнения результатов моделирования оптического прибора с использованием измеренных данных. Мы имели в нашем распоряжении данные светимости реального прибора подсветки (подробно он будет описан ниже), измеренные пользователем нашей системы моделирования распространения света. Также мы имели образцы двух материалов, использованных в этом приборе. Один из образцов был отражателем, окружающим светопроводящую пластину. Другой образец – диффузная пленка, расположенная сверху светопроводящей пластины, через которую свет выходит наружу. Это строгий критерий, потому что в реальности свет многократно отражается от первого материала (т.е. ошибка измерения будет накапливаться в процессе моделирования) и проходит сквозь второго (что позволяет проверить точность измерения ДФП).

В результате сравнений можно сказать, что разработанный и построенный комплекс является практически уникальным. По точности результатов измерения ДФО/ДФП его можно сравнить только с установкой Murakami. Остальные измерительные комплексы либо проигрывают существенно в точности, либо не измеряют ДФО целиком. Например, аппарат GretagMacbeth ITS10-50 позволяет измерить с очень высокой точностью только интегральное значение отраженного или преломленного света и только для одного направления падения, что недостаточно в задачах реалистичной визуализации.

Приведем для примера сравнение измерений разработанного комплекса и комплекса компании Radiant Imaging (RI). Всего было измерено 3 образца:

1. автомобильная краска синего цвета («металлик»);
2. диффузный отражатель из пластика;
3. полупрозрачная диффузная пленка.

Визуализация измеренной краски (первый образец) приведена на рис. 2.10, слева результаты измерений нашей установки, справа – на установке RI.

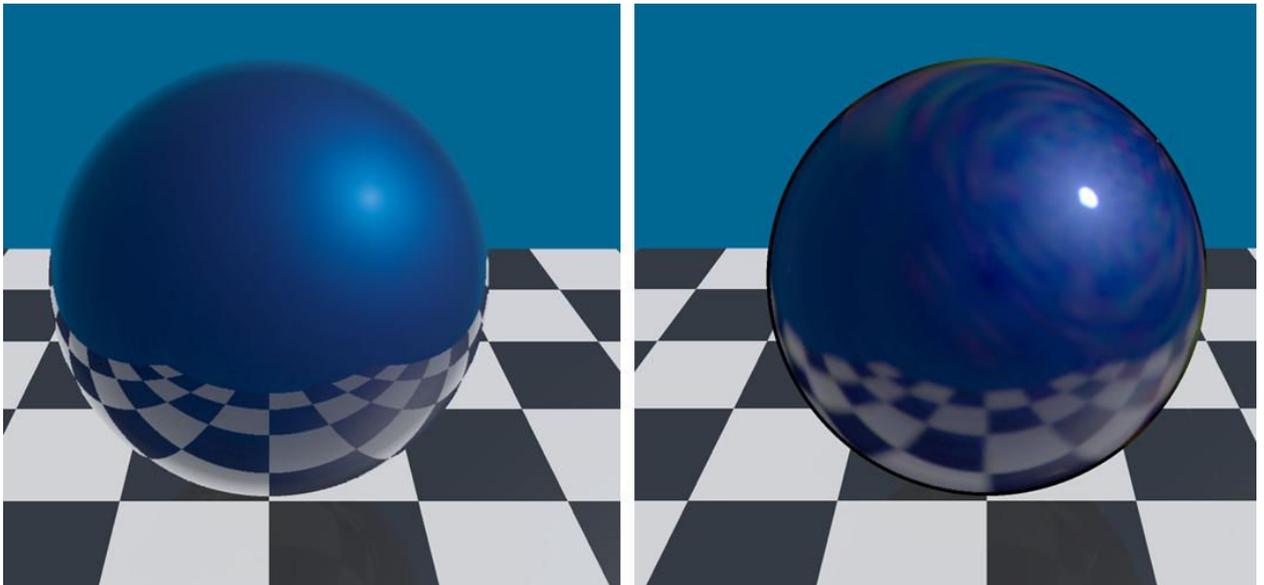


Рис. 2.10. Визуализация краски, измеренной на нашей (слева) и Radiant Imaging (справа) установках.

Видно, что измерения RI содержат большой шум, что выражается в цветовых пятнах вместо плавного перехода от зеленоватого блика к насыщенному синему цвету и в размытых отражениях. Кроме того, нарисованная сфера имеет черную окантовку, что сигнализирует о неправильной обработке данных для касательных направлений. В итоге данные результаты измерения фирмой RI не могут быть использованы для генерации фотореалистичных изображений.

Образцы 2 и 3 (диффузная пленка и отражатель) были использованы в компьютерном моделировании устройства подсветки, приведенном на рис. 2.11. Устройство работает следующим образом. Свет от ламп по сторонам от основного экрана попадает в светопроводящую пластину (LGP), отражаясь от нижнего микрорельефа (bottom dimples) и отражателя (reflection sheet), выходит сквозь диффузные пленки (upper/lower diffuse sheet) и образует искомое распределение освещения на плоскости «наблюдения» (observer plane). Распределение освещения реального прибора было нам известно. Измерены были оптические характеристики нижнего отражателя (sample 2) и диффузной пленки (sample 3).

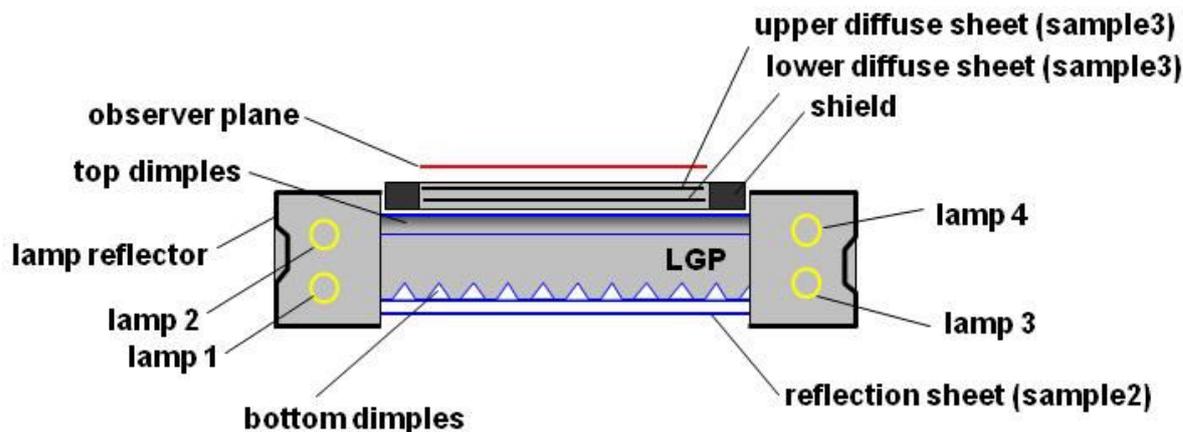


Рис. 2.11. Схема устройства подсветки, промоделированного с использованием измеренных данных.

Сравнивались распределения яркости на плоскости «наблюдения» реально измеренного устройства и результаты моделирования, полученные с использованием наших измеренных данных и данных, измеренных компанией RI. Распределение яркостей для всех трех случаев представлено на рис. 2.12 в виде цветных карт (цвет соответствует физическому значению). Левое распределение является измеренным на реальном устройстве подсветки. Среднее – результат моделирования устройства с применением данных, измеренных на нашей установке. Правое распределение – результат моделирования устройства с применением данных, измеренных на установке RI.

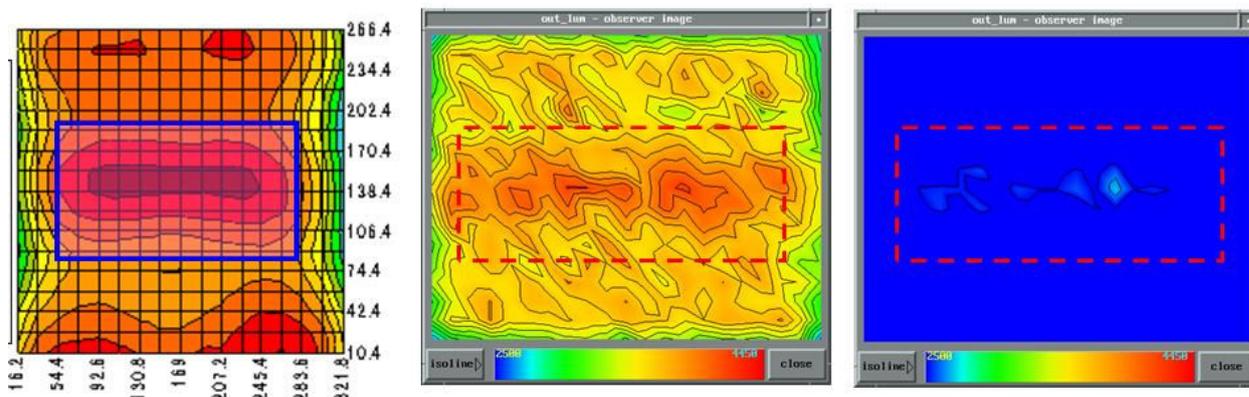


Рис. 2.12. Распределение яркостей устройства подсветки, слева – реальное, по центру – моделирование с данными нашей установки, справа – моделирование с данными RI.

Средние значения яркости, как по всему устройству, так и его центральной части, выделенной на рисунке в рамку, показаны в табл. 2.1.

	реальная яркость	наши измерения		RI измерения	
		яркость	ошибка	яркость	ошибка
все устройство	3,658 кд/м ²	3,602 кд/м ²	-1,5 %	2,223 кд/м ²	-39,23 %
центр	3,818 кд/м ²	3,807 кд/м ²	-0,29 %	2,341 кд/м ²	-38,69 %

Таблица 2.1. Значения яркости реального устройства и результатов моделирования. Для смоделированных значений приведено также отклонение от реального.

Как видно из таблицы, моделирование с использованием RI данных дает большую ошибку (~39%), что неприемлемо. В то же время моделирование с использованием оптических характеристик, измеренных нашей установкой, дает ошибку только до 1,5%, что является вполне хорошим результатом.

2.1.4. Примеры использования

Одним из примеров практического использования, подтверждающего высокую точность проводимых измерений, может служить проект концерна Airbus по моделированию салона самолета. В этом проекте исследовательская лаборатория концерна построила в натуральную величину макет салона самолета Airbus A320, не заполняя его креслами (рис. 2.13). Лампы освещения были размещены согласно рабочим чертежам. В построенном реальном макете были замерены физические значения освещенности во многих точках и сделаны фотографии.

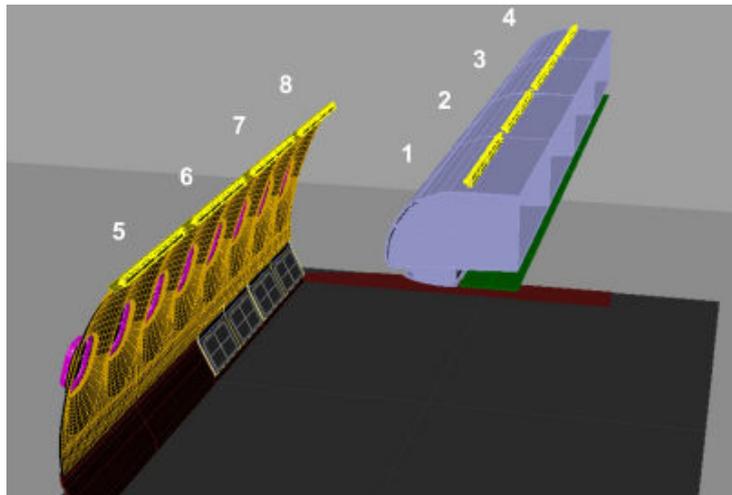
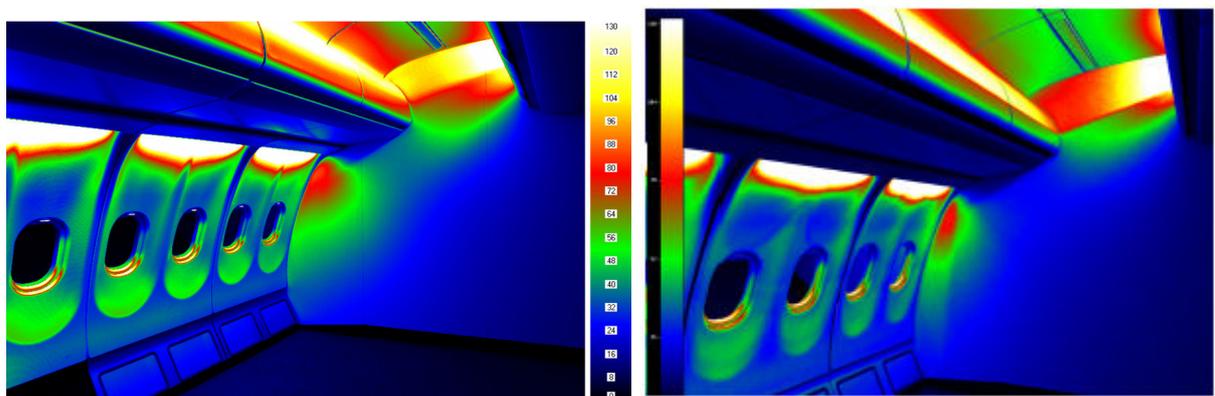


Рис. 2.13. Схема макета салона самолета в проекте Airbus по моделированию освещенности.

Для компьютерного моделирования освещенности использовалась геометрия салона самолета из САПР CATIA (см. п. 1.1.4). Оптические характеристики источников освещения (ламп) были взяты у производителей (см. п. 1.2.3). Образцы всех используемых материалов были измерены на описанном измерительном комплексе. Надо отметить, что все освещение салона – не прямое, поэтому свет претерпевает множественные отражения. В этом случае высокая точность измерения образцов материалов особенно важна.

Результаты сравнения реальной освещенности и рассчитанной в виде псевдоцветов (когда цвет соответствует определенному физическому значению) представлены на рис. 2.14.



Измерение

Моделирование

Рис. 2.14. Сравнение реально измеренной и смоделированной освещенности.

Несмотря на некоторое небольшое расхождение, в целом картина распределения освещенности была рассчитана верно, в большинстве измеренных точек значения практически совпали. Визуальное сравнение фотографии реального макета и сгенерированного реалистичного изображения представлено на рис. 2.15. Инженеры Airbus остались удовлетворены достигнутой точностью, результаты были опубликованы в [105].

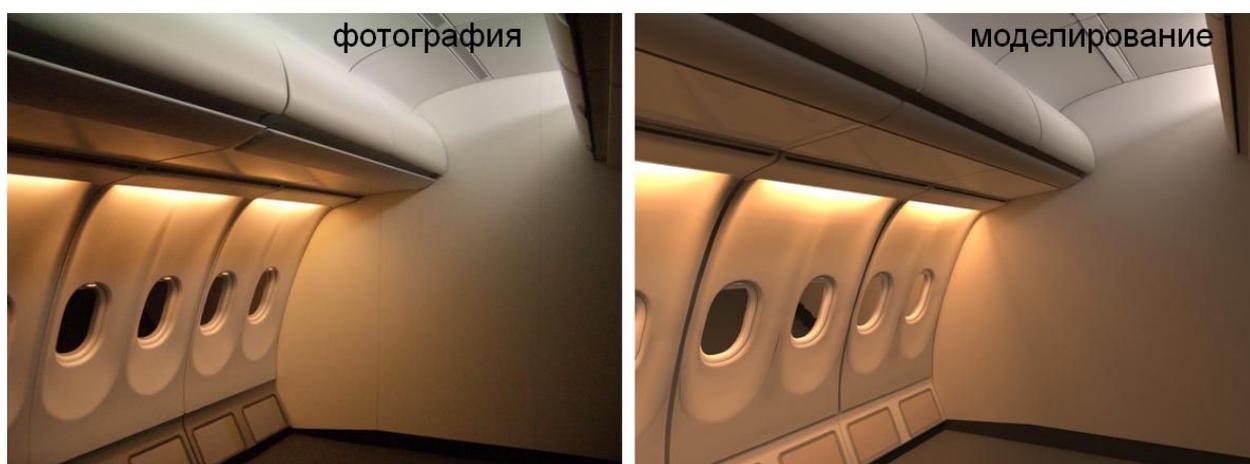


Рис. 2.15. Визуальное сравнение реального макета (слева) и сгенерированного реалистичного изображения (справа).

Изначально комплекс разрабатывался для измерения двунаправленной функции отражения, позволяющей с хорошей точностью мерить такие материалы как сложные краски и ткани. Благодаря дальнейшему развитию аппаратной и программной частей комплекса стало возможным измерять такие необычные и нестандартные образцы как металлические поверхности с микрорельефом, пластиковые поверхности с микробороздками, материалы со светорассеивающими свойствами, не имеющими осевой симметрии, «толстые» образцы с отражающей поверхностью, находящейся под слоем прозрачного пластика или стекла, и др. Все это позволило использовать комплекс для широкого класса задач. В частности, комплекс был использован в экспериментальных исследованиях импульсной боронизации в

плазме омического разряда для определения светорассеивающих свойств образцов с бороуглеродными плёнками [51].

В программном комплексе реалистичной визуализации Inspirer2 измеренные данные организуются в библиотеку оптических свойств поверхностей (рис. 2.16). Для визуализации ДФО (ДФП) был выбран объект сфера, так как он позволяет максимально представить изменения света на различных углах, а также в области блика, где изменение цвета максимально.

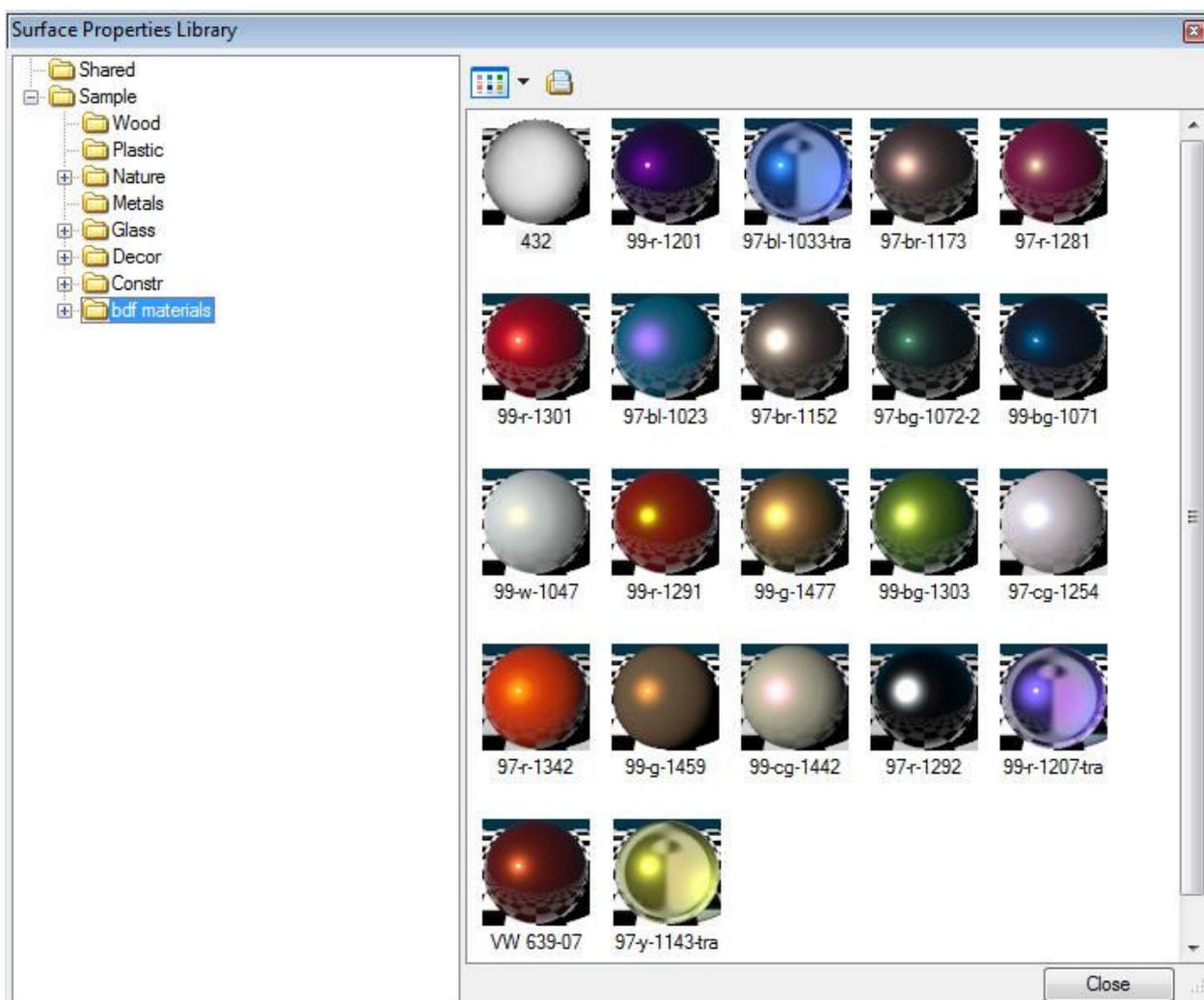


Рис. 2.16. Библиотека измеренных автомобильных красок.

Для задания оптического свойства поверхности из библиотеки пользователь «берет» его «мышкой» и «бросает» на нужный объект сцены (drag and drop), что существенно облегчает процесс задания начальных данных для генерации реалистичных изображений.

2.1.5. Результаты

Основные цели, которые преследовались при проектировании измерительного комплекса, были сформулированы исходя из задач задания физически корректных входных данных для систем моделирования освещенности и генерации реалистичных изображений. Основными целями являлись

- обеспечение высокого углового разрешения в выделенной области, где ДФО/ДФП имеет максимальный градиент;
- достаточно полный охват всего телесного угла, в котором происходит рассеяние света;
- минимизация времени измерений.

Для достижения этих целей была разработана оригинальная концепция оптической схемы измерений, которая предусматривает одновременное использование световодов и области изображения, формируемой линзой, где в качестве пространственных координат выступают непосредственно углы. Использование ПЗС-камеры позволяет одновременно измерять большое число пространственных точек, причем время измерений практически не зависит от числа используемых световодов, т.е. измеряемых пространственных компонент ДФО/ДФП. Достигнутая точность измерений (4-8%) по оценкам экспертов близка к максимально возможной при данном уровне технологии. Время измерения было доведено до нескольких часов (3-4 часа) для простого образца автомобильной краски. Образцы сложных материалов типа полупрозрачных пленок, металлические пластины с микро-насечками могут потребовать большого числа дополнительных измерений и более сложной постобработки полученных первичных данных. В таких случаях время измерения может исчисляться днями (в отдельных случаях до 10 рабочих дней).

За время, прошедшее от создания прототипа устройства, представленного в [106, 107], были доработаны многие технические и

программные решения. В настоящее время комплекс функционирует практически в режиме производственной эксплуатации. С его помощью были проведены измерения светорассеивающих свойств большого числа (несколько сотен) разнообразных материалов. Создана большая и по-своему уникальная библиотека измеренных данных.

2.2. Моделирование светорассеивающих свойств поверхности ткани.

Однако не всегда возможно измерить образцы материалов. В одних случаях образцы недоступны, в других же необходимые материалы находятся в процессе разработки, т.е. просто еще не существуют. По этой причине были разработаны алгоритмы для моделирования оптических свойств материалов по их внутренней структуре, в частности, моделирование оптических свойств ткани [33, 35, 37, 42, 44, 47].

Ткани и другие текстильные материалы широко используются в повседневной жизни и, соответственно, в программных приложениях компьютерной графики часто бывает необходимо задавать их оптические свойства. Одним из ярких примеров может служить расчет освещения салона самолета: в салоне тканевыми материалами покрыто большое количество поверхностей, и без данных об их отражающих свойствах точный расчет освещенности практически невозможен.

Рассматриваемая задача физически корректного моделирования и визуализации тканей лежит на стыке двух классов методов компьютерной графики:

- методов, специально предназначенных для моделирования и визуализации текстильных материалов,
- общих методов, предназначенных для расчета оптических свойств произвольных материалов.

Для использования смоделированных сложных оптических свойств ткани в программах реалистичной визуализации будем использовать их задание в виде двунаправленной функции отражения (ДФО).

Моделирование и визуализация текстильных материалов

Среди методов, предназначенных специально для моделирования текстильных материалов, существует подкласс работ, посвященных моделированию физических деформаций текстильных материалов [108, 109]. Другие методы, описанные ниже, посвящены передаче визуальных особенностей материалов.

В работах [110, 111] описывается подход, при котором текстильные материалы фотографируются при различных условиях освещения. Полученные фотографии используются для создания текстур, которые присваиваются трехмерным полигональным моделям одежды. В работах представлены высокореалистичные изображения, полученные авторами с помощью этого подхода.

Работа [112] посвящена фотореалистичной визуализации трикотажа. В ней предложена оригинальная концепция использования специального представления поперечного сечения нити, которое «нанализуется» на траекторию нити, заданную в соответствии с конкретным переплетением нитей изделия.

В работе [113] для моделирования тканей используется комбинация разнообразных методов: представление поверхностей нитей с помощью процедурных текстур; задание оптических свойств поверхности ткани с помощью двунаправленной функции отражения (ДФО). ДФО задается для всей ткани, без учета отдельных нитей. ДФО создается на основе информации о переплетении нитей в ткани и подхода, при котором поверхность ткани представляется состоящей из множества микрограней с различными ориентациями.

Приведенные методы не задаются явной целью расчета физически корректных оптических свойств тканей или их составляющих (например, нитей). Поэтому был также рассмотрен второй класс методов – методы, производящие расчет оптических свойств произвольных объектов.

2.2.1. Характеристики текстильных нитей

Из литературы по текстильному материаловедению [114-117] известно, что поверхность натуральных и синтетических волокон и нитей шероховатая. Для многих текстильных волокон производились измерения и известны их усредненные показатели преломления [117]. Показатели преломления текстильных волокон в среднем равны 1.5.

Известно, что среда текстильных волокон является оптически неоднородной. Например, показано, что хлопковые волокна состоят не только из целлюлозы, но содержат в себе до 12% воска, пектина и минеральных образований [114]. Также в волокнах и нитях могут присутствовать воздушные включения. Синтетические нити могут специально наполняться частицами с высоким показателем преломления для удаления избыточного блеска. В объеме нити могут присутствовать частички пыли и загрязнения разного рода. Наличие оптических неоднородностей в среде нитей приводит к рассеянию в ней света.

В соответствии с уравнениями Френеля для многих объектов реального мира, чей показатель преломления близок к показателю преломления воды, до 95% света (в случае нормального падения), попадающего на их поверхность, пройдет внутрь объекта (показатель преломления воды равен 1.33, усредненный показатель преломления текстильных волокон равен 1.5). Часть преломленного света в результате множественного рассеяния на оптических неоднородностях, присутствующих внутри объема объекта, выйдет обратно на его поверхность. Угловое распределение этого света в общем случае не будет изотропным [118].

Учитывая тот факт, что объемное рассеяние света может существенно влиять на оптические свойства таких материалов, как текстильная ткань, была разработана модель взаимодействия ткани со светом, учитывающая рассеяние света внутри нитей [33, 37, 44]. Поведение света внутри объема нити моделировалось с помощью метода Монте-Карло трассировки лучей. Предлагалось сначала рассчитывать ДФО нитей, а потом на их основе ДФО ткани в целом. Ниже представлены описание предлагаемого подхода и результаты его работы.

2.2.2. Расчет оптических свойств нити

Вклад в оптические свойства ткани (т.е. в ДФО ткани) дает, как отражение света от поверхностей нитей, так и рассеяние света их объемом. В связи с этим предлагается разделить ДФО нити на две компоненты – поверхностную и объемную:

$$ДФО(w_{in}, w_{out}) = ДФО_{нов}(w_{in}, w_{out}) + ДФО_{об}(w_{in}, w_{out}),$$

Поверхностную компоненту ДФО нити предлагается вычислять в соответствии с классическим методом расчета поверхностных оптических свойств объектов, предложенным Куком и Торрансом [85]. Данный подход был выбран в силу следующих соображений:

- 1) Подход реализует физически корректную модель взаимодействия света и шероховатой поверхности объекта;
- 2) В подходе учитываются оптические характеристики моделируемого объекта, а именно его показатель преломления;
- 3) Подход обладает небольшой вычислительной сложностью.

Для определения объемной компоненты ДФО предлагается собственный метод. Будем считать, что объем нити заполнен основной средой с показателем преломления равным усредненному показателю преломления хлопковых волокон ($n = 1.557$) и в основной среде распределены сферические рассеивающие частицы, обладающие показателем

преломления, отличным от основного. На основании этих данных с помощью теории Ми можно рассчитать параметры, определяющие рассеяние света в оптически неоднородной среде, а именно фазовую функцию рассеивающих частиц ($p(\theta)$), их сечения рассеяния (σ_{sc}), поглощения (σ_{abs}) и экстинкции (σ_{ext}). Эти значения далее можно использовать при Монте-Карло трассировке лучей в среде объема нити. Геометрически нить в работе представлялась в виде гладкого цилиндра (шероховатость поверхности не моделировалась явно, а учитывалась при расчете поверхностной компоненты ДФО, как было описано выше), основанием которого служил круг.

Для расчета объемной компоненты ДФО сначала предлагается рассчитывать функцию объемного рассеяния (ФОР) нити методом Монте-Карло трассировки лучей в объеме нити. Далее предлагается вычислять объемную компоненту ДФО путем интегрирования ФОР по поверхности нити, представленной цилиндром.

Дадим определение ФОР. Пусть на поверхность dA падает свет с направления dw_{in} . Тогда:

$$\Phi OP(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB) = dL_{out}(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB) / dF_{in}(dw_{in}, dA),$$

ФОР показывает отношение яркости света dL_{out} , рассеянного поверхностью dB в телесный угол dw_{out} , к потоку dF_{in} , приходящему на поверхность dA из dw_{in} . Подразумевается, что яркость поверхности dB создана только потоком dF_{in} за счет объемного рассеяния света в среде объекта. Определение ФОР проиллюстрировано на рис. 2.17.

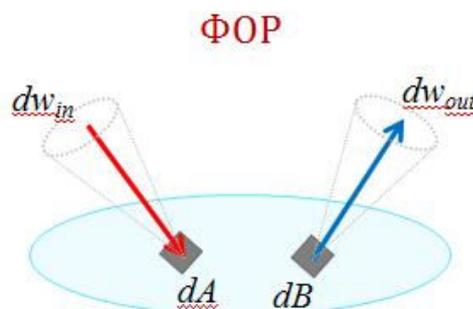


Рис. 2.17. Определение функции объемного рассеяния (ФОР).

Если для некоторой окрестности (обозначим ее как V) элемента поверхности dB задана ФОР, то тогда для dB можно вычислить ДФО путем интегрирования ФОР по этой окрестности:

$$ДФО_{dB}(dw_{in}, dw_{out}) = \int ФОР(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB)dA,$$

где интеграл берется по окрестности V элемента поверхности dB .

Покажем, каким образом на основе приведенных теоретических выкладок предлагается рассчитывать ФОР и ДФО нитей.

Для расчета ФОР предлагается проводить Монте-Карло трассировку лучей в объеме нити следующим образом. Также в описании алгоритма и в его блок-схеме используется синонимичный ему с точки зрения компьютерной графики термин «фотон».

Для небольшого участка поверхности нити в направлении объема нити с полусферы входных направлений падения света испускается множество фотонов. В соответствии с параметрами рассеивающей среды, представляющей объем нити, каждый из фотонов либо поглощается, либо выходит на поверхность нити в результате множественного рассеяния. Для каждого из вышедших фотонов точка и направления его выхода регистрируются. Процесс проиллюстрирован на рис. 2.18. На поверхности нити задана пространственная параметрическая сетка (u, v) для удобства регистрации положений фотонов, выходящих из нити. Для каждого элемента пространственной сетки, определяемого координатами (u_i, v_i) , заданы координатные системы и связанные с ними угловые сетки, которые используются для регистрации направлений выхода фотонов.

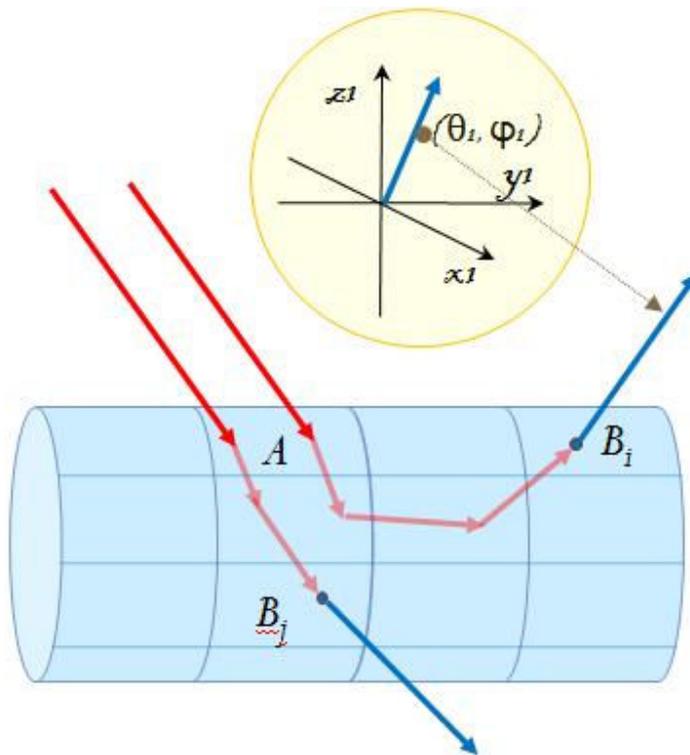


Рис. 2.18. Рассеяние света в нити.

На рис. 2.19 приведена последовательность основных шагов алгоритма трассировки лучей в объеме нити.



Рис. 2.19. Алгоритм Монте-Карло трассировки лучей в объеме нити.

Трассировка состоит из следующих основных этапов:

1) Расчет длины свободного пробега l

Расчет длины свободного пробега производится в соответствии со следующим выражением:

$$\Pr(l) = \exp(-l\sigma_{ext}N),$$

где $\Pr(l)$ – вероятность того, что фотон не будет поглощен или рассеян в среде при прохождении расстояния l , где σ_{ext} – сечение экстинкции (угасания), а N – концентрация поглощающих и рассеивающих частиц.

Величина l определяется следующим образом:

$$l = -\frac{\ln(r)}{\sigma_{ext}N},$$

где r – величина, равномерно распределенная на $(0, 1)$.

2) Поиск пересечения с границей нити

В работе предлагается использовать неявное представление поверхности нити. Для того чтобы найти пересечение поверхности нити с траекторией фотона, было предложено и реализовано аналитическое решение соответствующей геометрической задачи.

3) Выбор события поглощения/рассеяния

Событие поглощения или рассеяния выбирается случайным образом в соответствии со следующими вероятностями:

$$Pr_{sc} = \sigma_{sc} / \sigma_{ext},$$

$$Pr_{abs} = 1 - Pr_{sc},$$

где Pr_{sc} и Pr_{abs} – вероятности событий рассеяния и поглощения соответственно. Если было выбрано событие поглощения, фотон прекращает свое распространение в объеме нити. Обработка события рассеяния описана в пункте 4.

4) Рассеяние

При выборе события рассеяния определяется и задается новое направление распространения фотона в соответствии с фазовой функцией рассеивающих частиц.

5) *Регистрация положения и направления выхода фотона из нити*

Положение и направление выхода фотона, а также его энергия регистрируются на пространственной сетке (u, v) и угловой сетке $(\theta_{out}, \varphi_{out})$, ассоциированной с элементом (u_i, v_i) .

По окончании моделирования распространения света в объеме нити предлагается вычислять ФОР нити следующим образом:

$$\Phi OP(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB) = \frac{F_{out}}{dw_{out} \cdot dB \cdot \cos(\theta_{out}) \cdot F_{in}},$$

где F_{out} есть сумма энергий всех лучей, вышедших в направлении dw_{out} из элемента dB , F_{in} – сумма всех энергий лучей, приходящих на dA с направления dw_{in} , θ_{out} – направление выхода лучей, определяемое dw_{out} .

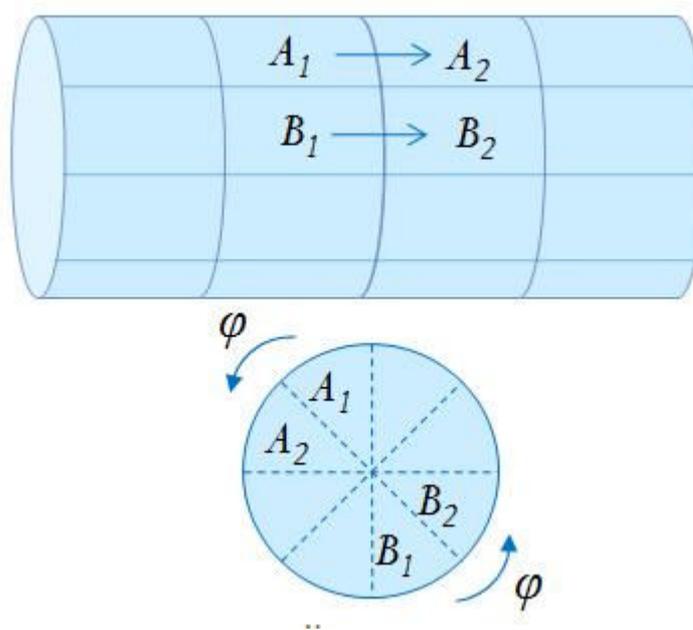


Рис. 2.20. Если освещаемый элемент «сдвигается» вдоль нити и/или «поворачивается» вокруг ее центра, то вся ФОР также «сдвигается» и/или «поворачивается».

Вычисленная ФОР нити является свойством нити. Необходимо отметить ее важное свойство, которое позволяет рассчитать ДФО предложенным в работе способом. Поскольку нить является круговым цилиндром, то если освещаемый элемент сетки на поверхности нити

«сдвигается» вдоль нити и/или «поворачивается» вокруг ее центра, то вся ФОР также «сдвигается» и/или «поворачивается». Т.е. для A_1, A_2, B_1 и B_2 , определенных аналогично продемонстрированному на рис. 2.20 верно:

$$\Phi OP(w_{in}, A_1, w_{out}, B_1) = \Phi OP(w_{in}, A_2, w_{out}, B_2).$$

Для приближения интеграла ФОР по поверхности нити в разработанном решении предлагается использовать следующую сумму:

$$ДФО_{об}(w_{in}, w_{out}) \cong \sum A_i \Phi OP(w_{in}, A_i, w_{out}, B) * A_i * \cos(\theta_{ini}) * f(\theta_{ini}),$$

где:

- θ_{ini} – угол между направлением падения света и нормалью к A_i
- $\cos(\theta_{ini})$ необходим для того, чтобы учесть изменение величины потока света, падающего на A_i под углом θ_{ini}
- $f(\theta_{ini}) = 1$, в случае если $\cos(\theta_{ini}) > 0$,
 $f(\theta_{ini}) = 0$, в случае если $\cos(\theta_{ini}) \leq 0$,
 $f(\theta_{ini})$ контролирует, что расчет производится только для тех A_i , которые напрямую освещены светом от источника;
- суммирование идет по всем ячейкам A_i пространственной параметрической сетки (u, v) .

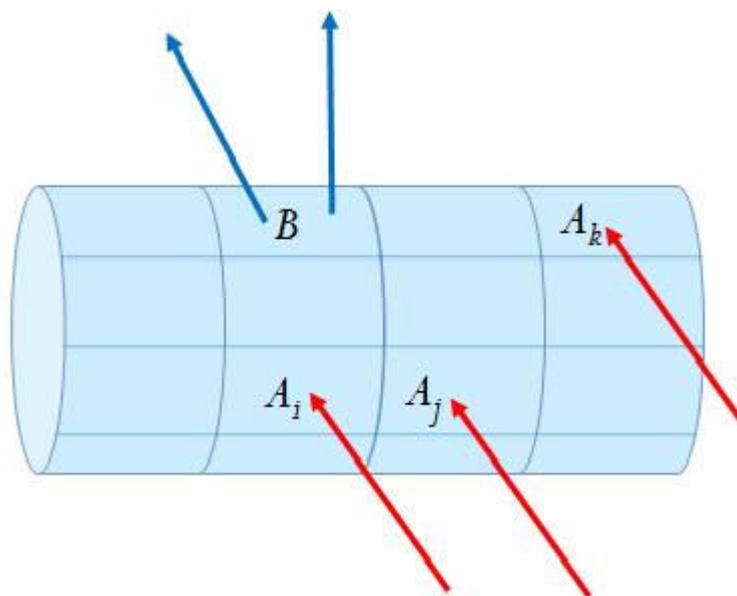


Рис. 2.21. Суммирование вкладов в яркость ячейки от окружающих ее ячеек.

Был разработан алгоритм, производящий вычисление ДФО в соответствии с приведенной формулой. Идея алгоритма заключается в том, что нить освещается параллельным светом с некоторого направления, и вклады в яркость некоторой заранее выбранной ячейки B от окружающих ее ячеек A_i суммируются по уже известной, вычисленной ФОР (рис. 2.21).

Стоит отметить, что полученная ДФО нити определена для всех возможных направлений падения света, а не только для тех, которые принадлежат положительной полусфере относительно поверхности нити (т.е. для тех направлений, которые составляют острый угол с нормалью к поверхности нити). Это объясняется тем, что при рассеянии света в нити, лучи могут выйти в любой точке на ее поверхности, в том числе и с обратной стороны. Таким образом, ФОР определена на всей поверхности нити, что позволяет вычислить ДФО, как для положительных, так и для отрицательных направлений падения света относительно поверхности нити.

2.2.3. Расчет ДФО ткани

ДФО ткани можно рассчитать двумя способами. Первый – это суммирование ДФО нитей, второй – расчет ДФО ткани методом Монте-Карло трассировки лучей.

Основная идея алгоритма суммирования ДФО нитей заключается в том, что ДФО ткани представляет собой усредненное значение ДФО образующих ее нитей. Например, для ткани, состоящей из одного типа нитей, ДФО можно аппроксимировать следующим образом:

$$ДФО_{ткани}(w_{in}, w_{out}) = 1/2 \sum_i ДФО_{нитиi}(w_{ini}, w_{outi}),$$

где параметр i меняется от 0 до 1 для того, чтобы учесть, что одна и та же нить в ткани может быть расположена параллельно и перпендикулярно некоторому заданному направлению. Это приближение оказалось вполне

применимо для простого плетения ткани, показанного на рис. 2.22. Для более сложных плетений оно может быть недостаточно точным.

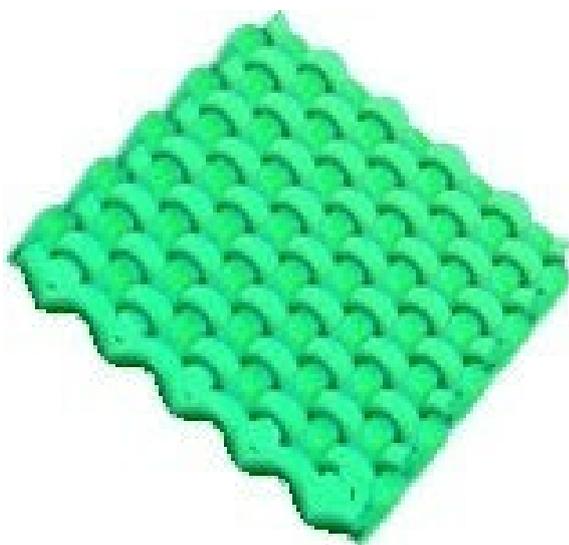


Рис. 2.22. Триангулированный образец ткани.

Альтернативным способом вычисления ДФО ткани на основании вычисленных ДФО нитей является Монте-Карло трассировка лучей. Трассировка лучей должна проводиться для триангулированного образца ткани, полученного с помощью разработанных в работе [33] методов. Нитям в образце ткани должны быть присвоены рассчитанные заранее ДФО. Преимуществом Монте-Карло трассировки лучей по сравнению с суммированием ДФО является учет переотражения света между нитями. Этот метод подходит для любого вида плетения ткани. Недостатком подхода является его сложность и, соответственно, большое время вычислений.

2.2.4. Краткое описание механизма верификации подхода

Для целей проверки корректности разработанного подхода были произведены измерения ДФО реального образца ткани из красного хлопка на установке, описанной в п. 2.1.

Измерения оптических свойств ткани производились по схеме, описанной в [35]. Образец ткани освещался почти параллельным пучком

монохроматического света. Измерения были проведены для длин волн падающего света в пределах 390 - 710 нм с шагом в 10 нм. Энергия света, отраженного образцом, регистрировалась для множества выходных направлений.

Результатом измерений был набор значений коэффициентов яркости ткани для множества направлений падения и отражения света. По определению коэффициент яркости – это отношение яркости измеряемого образца к яркости идеального диффузного отражателя при одних и тех же условиях освещения и направлениях измерений. Показатель яркости прямо пропорционален энергии света, отраженного образцом в заданном направлении, и обратно пропорционален косинусу угла отражения. Полученные данные из спектрального представления переводились в представление RGB и сохранялись в файле специального формата.

Для сравнения рассчитанных и измеренных оптических свойств ткани необходимо было получить на основе рассчитанных данных параметры, аналогичные измеренному коэффициенту яркости реальной ткани [35]. Для этого, прежде всего, было необходимо создать трехмерную модель образца ткани, и задать для нитей рассчитанные оптические свойства (ДФО). Далее эта модель помещалась в трехмерную виртуальную сцену, и производились следующие вычисления:

- 1) Выбиралось некоторое сечение из множества измеренных данных (иными словами выбиралось определенное направление падения параллельного пучка света и множество направлений наблюдения).
- 2) В сцене с моделью ткани устанавливался источник параллельного белого света с направлением, равным выбранному на предыдущем шаге.
- 3) Для каждого из выбранных направлений наблюдений устанавливалась камера и производилась визуализация ткани.
- 4) Значения пикселей, принадлежащих ткани, суммировались.

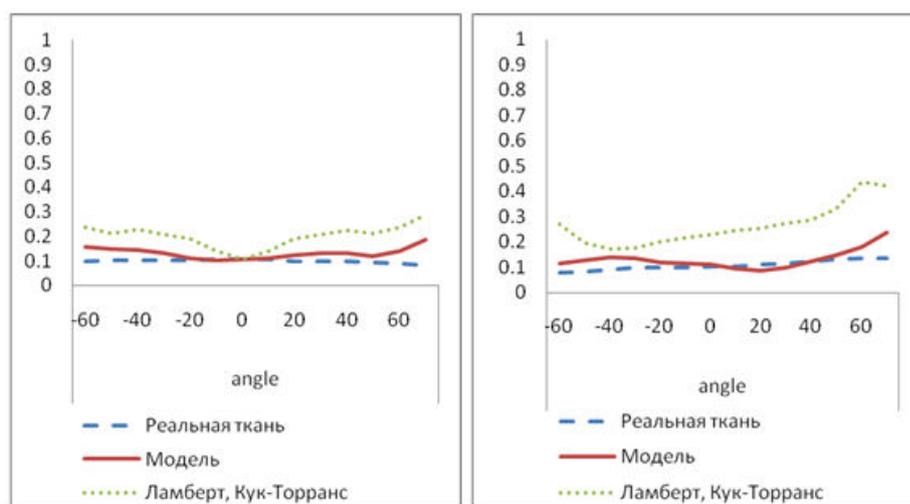
5) На основании полученных сумм RGB рассчитывались величины (назовем их C), пропорциональные коэффициентам яркости реальной ткани.

6) Каждая величина C нормировалась следующим образом. Значение C для модели ткани при нормальном падении и отражении света приравнивалось к соответствующему измеренному значению коэффициента яркости. Рассчитывался коэффициент соответствия, на который были умножены все остальные значения C .

В итоге стало возможным провести сравнение рассчитанных и измеренных данных.

2.2.5. Сравнение рассчитанных и измеренных данных

На рис. 2.23-2.24 приведены графики рассеяния света моделью ткани (красная сплошная кривая) и реальным образцом (синяя пунктирная кривая) в плоскости падения света (т.е. в плоскости, содержащей нормаль к образцу, вектор, определяющий направление падения света и вектор, определяющий направление зеркального отражения).



0° с нормалью

30° с нормалью

Рис. 2.23. Рассеяние света классической моделью, разработанной моделью и реальной тканью при направлениях падения света 0^0 и 30^0 с нормалью.

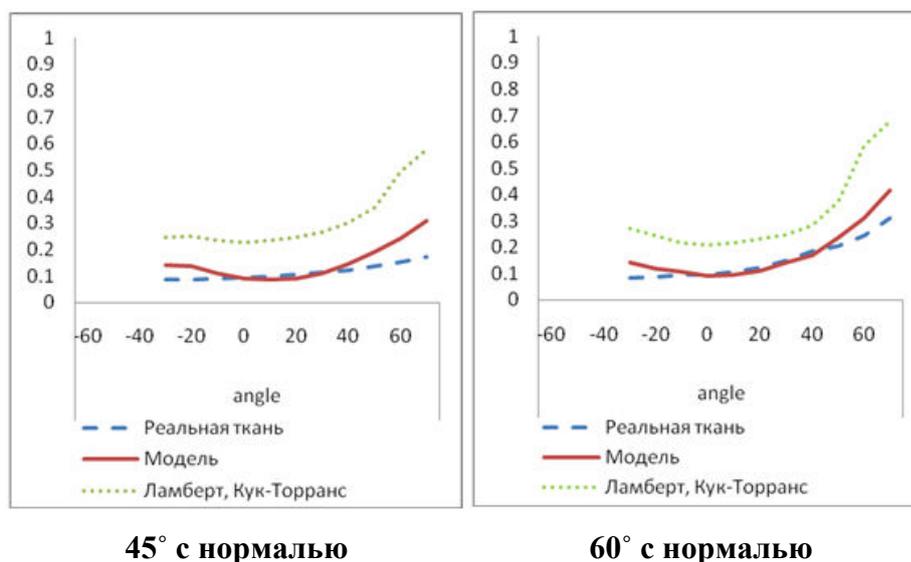


Рис. 2.24. Рассеяние света классической моделью, разработанной моделью и реальной тканью при направлениях падения света 45° и 60° с нормалью.

На всех графиках по оси абсцисс отложены направления отражения света. На графиках представлены значения для углов в пределах от -60 до 70 градусов. Отрицательные значения соответствуют направлениям, которые лежат по ту же сторону от нормали к поверхности, что и направления освещения; положительные – по ту же сторону, что и направления зеркального отражения. 0 на графиках соответствует направлению нормали. По оси ординат отложены значения коэффициентов яркости, деленные на π .

Кроме этого на графиках представлены данные, полученные при задании оптических свойств нитей следующим классическим образом (зеленая пунктирная кривая):

- Объемная компонента устанавливается в соответствии с законом Ламберта,
- Поверхностная компонента вычисляется по методу Кука и Торранса).

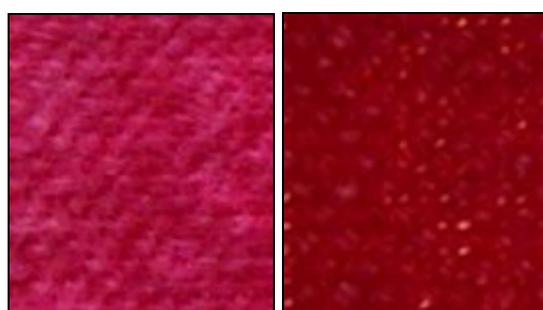
На графиках продемонстрировано, что рассеяние света моделью и реальной тканью имеет качественное соответствие, а также что реализованный подход улучшает соответствие картин рассеяния света моделью и реальной тканью по сравнению с классическим подходом.

Цветовое соответствие

Кроме качественного совпадения графиков рассеяния света удалось добиться определенного соответствия в части моделирования цвета ткани при разных условиях освещения.

На рис. 2.25 приведены фотографии красной хлопковой ткани: на рис. 2.25 (а) – фотография ткани, когда источник света и камера находятся по одну сторону от ткани, на рис. 2.25 (б) – по разные. Можно видеть, что в зависимости от освещения цвет ткани меняется от более фиолетового к темно-красному.

Аналогичные результаты были достигнуты и для рассчитанных данных. На рис. 2.26 приведены изображение модели ткани, освещенной аналогичным способом. Можно видеть, что цвет модели ткани, также как и цвет реальной ткани, меняется от более фиолетового к темно-красному в зависимости от освещения.



а) отраженный свет б) на просвет

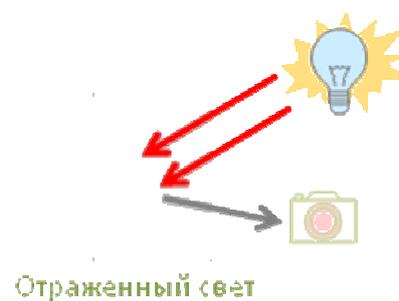
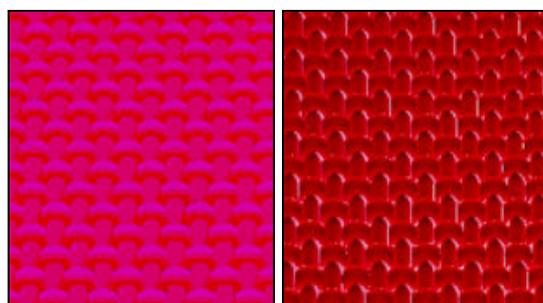


Рис. 2.25. Фотография реальной ткани.



а) отраженный свет б) на просвет

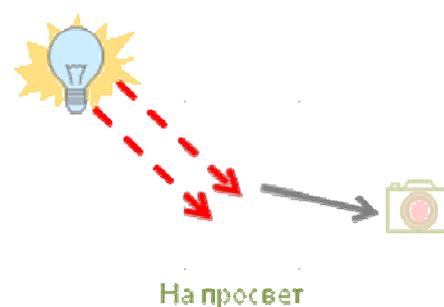


Рис. 2.26. Изображение модели ткани.

	H (оттенок) от 0 до 1	S (насыщенность) от 0 до 1	V ² (яркость) от 0 до 1
Реальная ткань	0.98	0.99	0.8
Рассчитанные данные	0.97-0.99	0.99	0.8

Таблица 2.2. Компоненты цвета в системе HSV для измеренных и рассчитанных данных

В дополнение к визуальному сравнению цвета ткани, освещенной с разных сторон, было проведено сравнение компонент цвета в системе HSV для рассчитанных и измеренных данных. Результаты сравнения приведены в таблице 2.2.

На Рис. 2.27 приведены примеры применения ДФО к обивке автомобильного кресла. На рисунке слева (рис. 2.27-1) к обивке автомобильного кресла применена измеренная ДФО, на рисунке справа (рис. 2.27-2) – ДФО ткани, рассчитанная с помощью предложенного метода суммирования ДФО нитей. Увеличенные фрагменты рисунков 2.27-1 и 2.27-2 приведены справа.

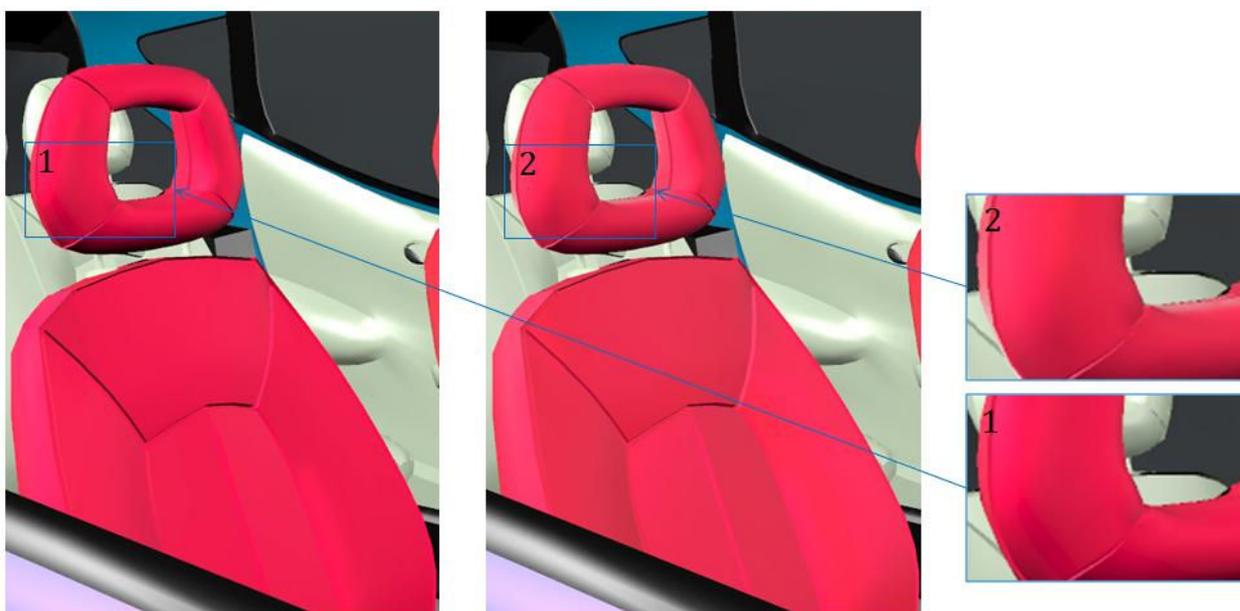


Рис. 2.27. На рисунке слева (1) на автомобильное кресло назначена измеренная ДФО, на рисунке в центре (2) – рассчитанная. Рисунки справа – увеличенные фрагменты рисунков (1) и (2).

² Результирующая яркость изображения объекта на экране определяется освещенностью этого объекта в данной трехмерной сцене

На рисунках продемонстрировано, что разработанное решение позволяет передать как основной цвет ткани, так и его нюансы.

2.2.6. Результаты

На основании данных о том, что нити в тканях представляют собой рассеивающую среду, был предложен новый подход для расчета оптических свойств тканей, также предложен способ получения ДФО нити из ФОР путем интегрирования ФОР по поверхности нити, представленной цилиндром. ФОР, в свою очередь, получена путем моделирования рассеяния и поглощения света в среде нити с помощью метода Монте-Карло трассировки лучей.

Разработанное решение дает приемлемые результаты при визуализации цвета ткани при различных условиях освещения, а также показывает качественное совпадение картин рассеяния света моделью и образцом реальной хлопчатобумажной ткани.

Разработанные алгоритмы применяются в задачах, для которых важно физически корректное моделирование освещенности. Рассчитанная ФОР нити может быть использована для генерации ДФО тканей с разнообразными переплетениями. Полученные физически-обоснованные ДФО тканей могут быть использованы для физически корректных расчетов освещенности в трехмерных сценах, содержащих объекты, покрытые тканями. Например, они были использованы для анализа освещенности салона самолета, могут быть использованы при дизайне интерьеров и в других аналогичных задачах.

2.3. Выводы

Разработан комплексный подход к решению проблемы задания оптических характеристик поверхностей и материалов виртуальной сцены, необходимых для физически корректного моделирования распространения света в ней. В основе разработанного подхода лежит задание свойств

поверхности в виде двунаправленной функции отражения (или пропускания) в наиболее общей и аккуратной форме представления – в табличном виде.

Оптические характеристики материалов являются одним из наиболее сложных аспектов задания исходной сцены моделирования. В то же время в сложных, близких к реальности сценах с многократным отражением света даже небольшая ошибка в задании оптических характеристик материалов может привести к многократной ошибке в результатах моделирования. Это происходит потому, что ошибка накапливается. Например, имея ошибку в 5% в задании материала и десятки отражений света от него в расчетах (такое количество отражений вполне реально для реалистичных сцен) мы можем получить итоговую ошибку ~50%, что является неприемлемым результатом.

Поэтому важным требованием было достижение высокой точности измерения образцов материалов. Практически, как показали проведенные сравнения, разработанный программно-аппаратный комплекс является одним из лучших в мире по точности измерений. Его высокая применимость подтверждается многочисленными успешными производственными моделированиями с использованием измеренных данных.

Алгоритмы моделирования отражающих характеристик ткани являются хорошим приближением к реальности. Безусловно, они не учитывают такие факторы, как случайно выбившиеся из плетения волокна, произвольное кручение нити и др. Учет этих факторов существенно усложнит процесс расчета двунаправленной функции отражения ткани. При этом уже реализованное решение дает результат, достаточно близкий к измеренным образцам реальной ткани. Таким образом, дальнейшее улучшение результата моделирования будет уже небольшим.

3. Методы автоматизации задания светоотражающих свойств оптически сложных покрытий

Часто при визуализации объектов мы сталкиваемся с тем, что видим не вещество, из которого объект сделан (например, дерево или металл), а его покрытие краской или слоем лака с взвешенными частицами. В таком случае получение оптических свойств объекта посредством моделирования взаимодействия света с веществом не имеет смысла. В этом случае необходимо моделировать взаимодействие света с покрывающим слоем, который может иметь сложную структуру.

Такие покрытия являются другим примером материалов, прямые измерения которых бывают часто недоступны, но могут быть смоделированы. Моделирование оптических свойств сложных покрытий поверхности можно фактически выделить в отдельное направление работ по компьютерной графике. Если моделирование материалов покрытия базируется на законах взаимодействия света с композицией материала, и мы получаем правдоподобные результаты, то подобные алгоритмы могут быть использованы при компьютерном дизайне новых материалов.

Одни из подобных первых разработок были проведены для акварельных красок [119]. Авторы применяют широко известную модель Кубелка-Мунка, которая является упрощенным решением уравнения переноса излучения (света) [120]. В настоящее время, с развитием компьютеров и математических методов стал возможным непосредственный расчет распространения света в красящих слоях с использованием уравнения переноса. Дальнейшим развитием этого направления можно считать описанную в п. 3.1 работу по моделированию многослойных красок со сложной микроструктурой (типа перламутровых и «металлик»).

В этой главе мы рассмотрим два примера оптически сложных покрытий: сложные многослойные краски, используемые, в частности, для окраски автомобилей, и чернила для принтера, характеризующиеся высокой концентрацией частиц.

3.1. Вычисление оптических свойств многослойных красок

Многослойные краски применяются не только для окраски автомобилей, но также при окраске ноутбуков, мобильных телефонов и других популярных изделий. Именно внешний вид изделия часто определяет его коммерческий успех. Используя средства компьютерной графики, можно понять, как будет выглядеть изделие уже на начальных стадиях его разработки.

Моделирование современных красок с металлическими и перламутровыми эффектами, чей внешний вид изменяется в зависимости от условий освещения и наблюдения, является нетривиальной задачей. Иногда краски разрабатываются непосредственно для данного изделия с учетом его формы и размеров. Чтобы разработка красок, базируясь на физических и химических свойствах их составляющих, была эффективной, моделирование внешнего вида должно выполняться с интерактивной скоростью.

3.1.1. Существующие решения

В последние годы в литературе по компьютерной графике опубликовано достаточное число работ, относящихся к моделированию оптически сложных красок с перламутровым и металлическим эффектами. Большинство из них используют подходы, сильно отличающиеся от представленного ниже. Например, интерференционные модели, разработанные для моделирования мыльных пузырей [121, 122], масляных

пятен [121], или жемчуга [123], которые описывают физические явления для непрерывных тонких пленок, малопригодны для аккуратного расчета многократного рассеяния света на относительно небольших перламутровых чешуйках, расположенных в связующем веществе и окруженных зернами поглощающего пигмента и металлическими чешуйками.

По тем же самым причинам не могут быть применены методы, использующие множество упрощений таких как: изотропия пленок [124], однородное освещение внутри пленки [125], ограничивающиеся только случаем однослойной краски [124, 126] или фиксирующие ориентацию чешуек параллельно поверхности краски [127]. С другой стороны, подходы, использующие в трехмерном моделировании объекты произвольной формы, например, моделирование облаков [128], слишком универсальны, и поэтому требуют длительных вычислений и малопригодны для моделирования в интерактивном режиме.

Существуют работы, применяющие непосредственное моделирование распространения света внутри объема краски, описываемого на макроскопическом уровне. Используемые методы позволяют моделировать все важные для настоящего приложения оптические эффекты. Некоторые из таких подходов были специально разработаны для аккуратного расчета радужных и перламутровых эффектов [129, 130]. Однако, требуются весьма длительные вычисления, поскольку огромное число лучей должно быть протрассировано через объем краски, чтобы вычислить распределение отраженного света с малыми погрешностями. Те же из них, что используют явное моделирование внутренней структуры краски [129-132], еще менее пригодны, т.к. на стадии разработки неизбежно частое изменение внутренней структуры объема краски. Этот недостаток может быть частично преодолен с помощью неявного статистического описания структуры краски [118, 133, 134] (т.е. введения соответствующей длины свободного пробега, с помощью которой разыгрывается длина пробега света между событиями рассеяния на чешуйках). Все эти методы ресурсозатратны и без выполнения полных

вычислений они не позволяют на качественном уровне оценить результирующую ДФО. Поэтому они непригодны для интерактивного программного комплекса.

Интерактивная скорость визуализации возможна для таких теоретических моделей отражения, как Cook-Torrance [85], или для более сложной, описанной в [86]. Они основаны на структурах, использующих микрофасетки, и весьма эффективны на вычислительном уровне и дают хорошие приближения ДФО для типичных материалов. Однако, некоторые параметры, используемые в этих моделях, не имеют простой физической интерпретации [96]. Отсутствие простых соотношений между реальными физическими величинами и параметрами моделей сильно усложняют их применение для разработки красок с заданным внешним видом. Этот недостаток делает рассматриваемые методы неприемлемыми в нашем случае.

Таким образом, существующие подходы непригодны для нашей задачи либо из-за низкой вычислительной эффективности (методы прямой трассировки), или из-за слишком сильного упрощения реальной структуры краски (теоретические модели).

3.1.2. Расчет оптических свойств многослойной краски

Задача моделирования цвета краски может быть поставлена в формулировке: требуется вычислить распределение отраженного света (ДФО), аккуратно учитывающее многократное рассеяние света в объеме краски и позволяющее изменять состав краски в рамках технологических возможностей. Предлагается подход, основанный на полу-аналитической модели многослойной краски, удовлетворяющий поставленной задаче, при этом была достигнута интерактивная визуализация объектов, покрытых краской [1, 2, 38, 47, 48].

В предлагаемом методе модель краски состоит из плоскопараллельных однородных слоев, каждый из которых составлен из прозрачного лака и

взвешенных в нем пигментных красящих частиц и интерференционных чешуек, ответственных за «искрение» (рис. 3.1).

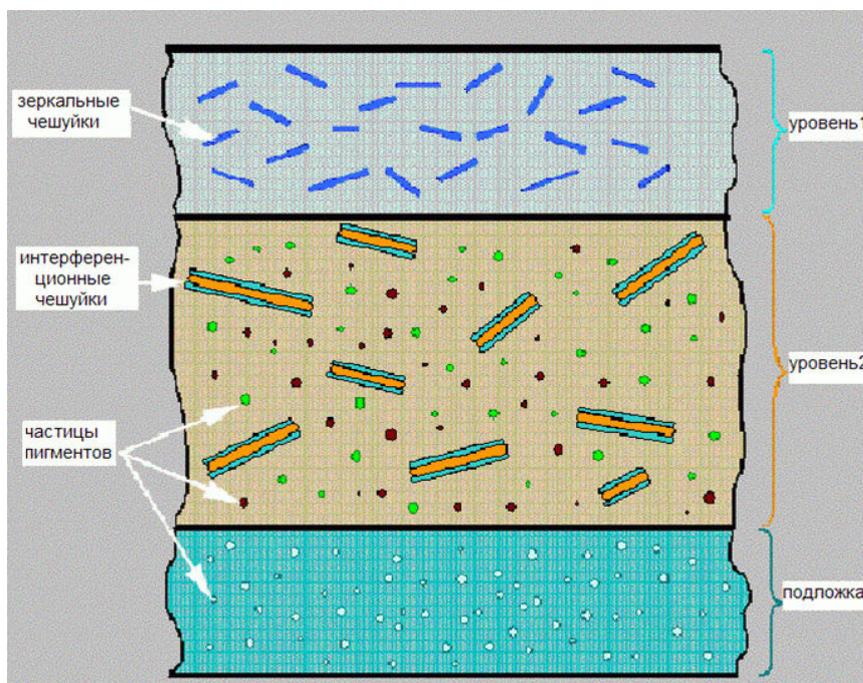


Рис. 3.1. Поперечное сечение используемой модели краски.

Каждый слой краски расщепляется на множество тонких субслоев таким образом, чтобы внутри каждого субслоя можно было бы пренебречь многократным рассеянием. Предполагается, что все события рассеяния света происходят в разных субслоях. Это позволяет описывать рассеяние в тонких субслоях в аналитическом виде. Такая модель рассеяния основана на статистическом подходе и аккуратно описывает взаимодействие света внутри краски, включая радужные и перламутровые эффекты. Рассеяние света каждым слоем краски вычисляется с помощью распределения рассеяния тонкими субслоями методом удвоения [135, 136].

Для расчета светоотражающей характеристики краски необходимо промоделировать движение света сквозь заданные слои ее структуры до отражения от подложки и движение его обратно. Рассеяние света всей краской вычисляется с помощью рассеяния на каждом слое методом сложения [135-137]. Стадия сложения дополняет стадию удвоения, которая вычисляет ДФО реального слоя, используя аналитические выражения для

ДФО тонких воображаемых слоев. Такой подход делает возможным аккуратный учет многократного рассеяния в сложных средах. Он позволяет сформулировать в аналитическом виде весьма точное приближение для ДФО красок с перламутровым и металлическим эффектами.

Методы сложения и удвоения, изначально разработанные для расчета рассеяния в атмосферах планет, применяются к уравнению переноса излучения, преобразованного к форме, удобной для таких задач. В этом смысле метод Hanrahan and Krueger [118] близок, поскольку использует ту же теорию переноса излучения. В работе [118] интегральное уравнение переноса решалось методом Монте-Карло, в предложенном же подходе применяется прямой сеточный метод, который значительно быстрее.

Границы между тонкими субслоями являются воображаемыми – на них не происходит отражения и преломления света, в отличие от границ реальных слоев в многослойных красках. Кроме этого, оказывается, что с помощью дальнейших упрощений, модель может аккуратно учитывать рассеяние света на металлических чешуйках, при этом эффективная ДФО также может быть вычислена в аналитическом виде. Ошибки, вносимые такими упрощениями, пренебрежимо малы при тех слабых плотностях чешуек, которые применяются в реальных красках (объемная концентрация частиц PVC ~5-10%).

Данная аналитическая модель была специально разработана для описания рассеяния света на ансамблях гладких металлических или перламутровых пластинок, состоящих из слюдяных частиц, покрытых двуокисью титана (TiO_2) [138]. В зависимости от толщины покрытия слюды двуокисью титана перламутровая частица отражает свет различного цвета. Она весьма точна, когда пластинки расположены внутри почти прозрачного вещества с низкой концентрацией пигментов. Последнее условие выполняется в случае реальных красок, которые практически прозрачны для того чтобы подчеркнуть металлические эффекты, например, искрение (sparkles) [139].

К недостаткам предложенного подхода, использующего приближение непрерывной среды, следует отнести:

- приближение независимости событий рассеяния, которое не всегда является достаточно точным. Например, свет, рассеянный одной чешуйкой, может быть отражен другой чешуйкой (или подложкой), а потом опять рассеяться на первой чешуйке. Однако стоит заметить, что вероятность таких событий мала;
- использование концентрации площади чешуек в единице объема вместо использования размеров и концентрации самих чешуек. В частности, ДФО для случая небольшой концентрации крупных чешуек и соответствующей концентрации мелких чешуек будут идентичны. Такое упрощение можно считать достаточно точным только при некоторых условиях, налагаемых на максимальный размер чешуек и их концентрацию.

Так как существуют случаи, когда данные ограничения существенны, то была реализована также «полная» модель вычисления ДФО, свободная от этих недостатков. Она основана на Монте-Карло трассировке лучей в прозрачной среде лака. При пересечении луча с частицей пигмента или с рассеивающей чешуйкой дальнейшее направление луча выбирается в соответствии с фазовой функцией данного пигмента (рис. 3.2). Фазовые функции для каждого пигмента рассчитываются заранее. Таким образом, имеется возможность рассчитать ДФО краски не таким быстрым, но более точным методом.

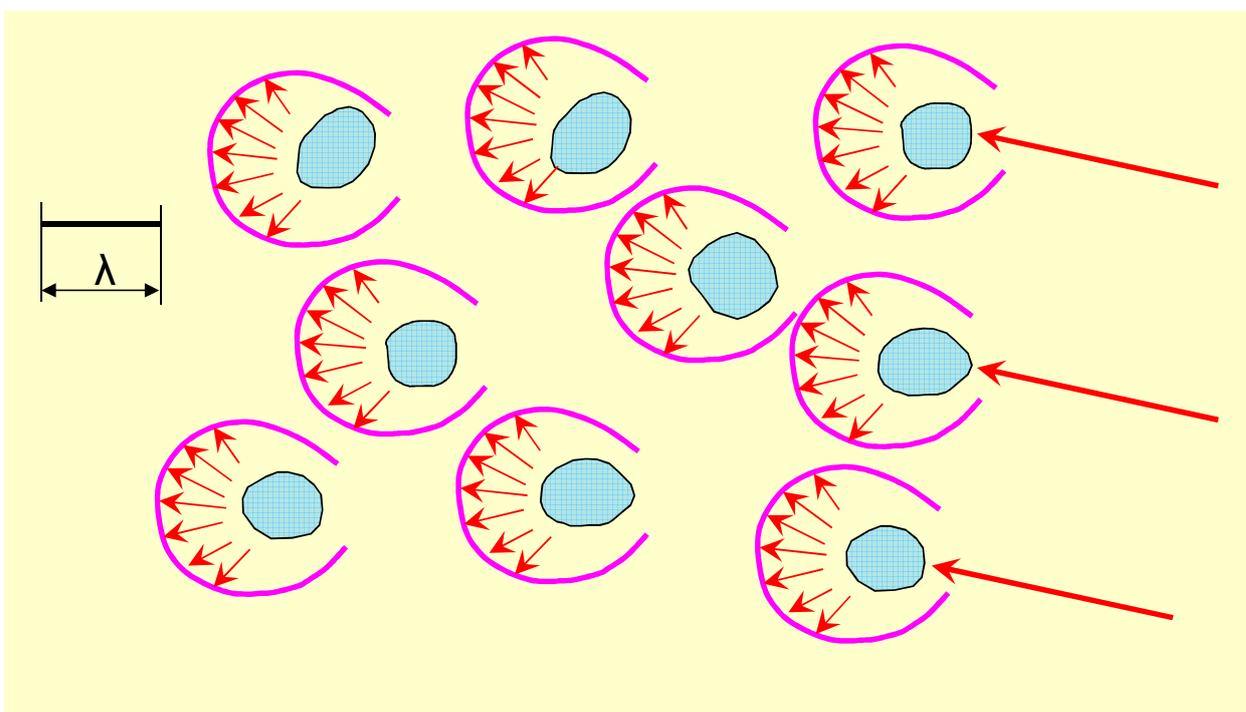


Рис. 3.2. Иллюстрация расчета ДФО краски методом Монте-Карло трассировки лучей с фазовыми функциями рассеяния на частицах (λ – длина волны падающего света).

Другое явление, явно зависящее от размера чешуек, - это грануляция или флуктуации яркости [118]. По мере увеличения размера чешуек, отдельные чешуйки становятся различимы глазом и действуют как маленькие сияющие зеркала (эффект искрения [139]). Искры могут быть описаны как специальная текстура, существенно зависящая от условий освещения и наблюдения. В дальнейшем текстура накладывается на поверхность окрашенного объекта, увеличивая правдоподобность визуализации краски «металлик».

3.1.3. Структура программного комплекса интерактивного моделирования красок

Модель краски является важной составляющей разработанного интерактивного программного комплекса моделирования внешнего вида красок, исходя из их состава. Структура комплекса представлена на рис. 3.3.

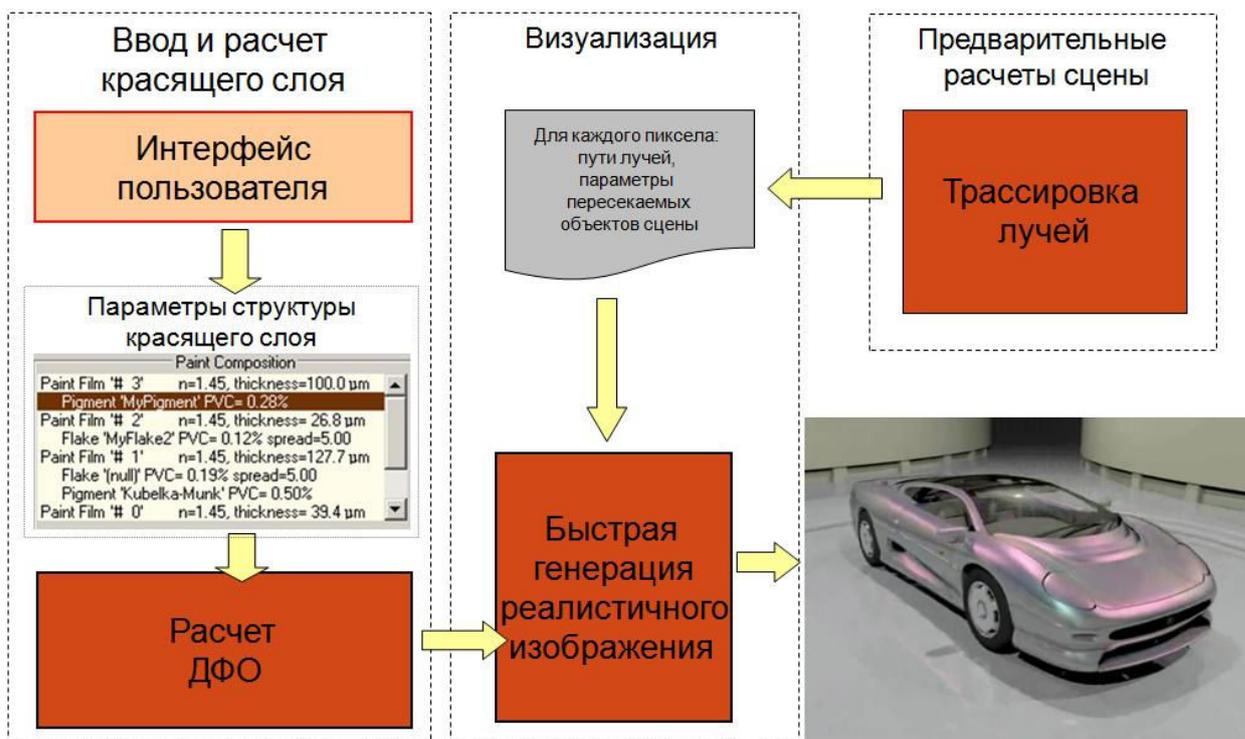


Рис. 3.3. Схема программного комплекса интерактивного моделирования многослойной краски.

Интерфейсная часть программного комплекса позволяет полностью задать структуру моделируемой краски. Для каждого слоя прозрачного лака пользователь задает характеристика лака, виды содержащихся в слое поглощающих частиц и рассеивающих чешуек, которые могут быть либо зеркальными, либо интерференционными. Для каждого вида частиц или чешуек задается их концентрация в слое и размер. При задании зеркальных чешуек можно указать коэффициент отражения в виде спектрограммы. Для интерференционных чешуек необходимо специфицировать толщины слюдяного слоя и покрытия двуокисью титана. Также управляемым параметром является разброс значений нормалей к чешуйкам, позволяющий контролировать их ориентацию в слое. Параметры могут быть изменены в интерактивном режиме, естественно, в технологически допустимых пределах.

Используя эти параметры и структуру краски, вычисляется ДФО для описанной многослойной модели. Полученная ДФО поступает в модуль быстрой визуализации виртуальных сцен, содержащих объекты, окрашенные

разрабатываемой краской. Оптическое моделирование с помощью трассировки лучей обычно требует значительного времени. Эта проблема особенно критична, когда результаты трассировки лучей зависят от параметров моделирования, например, положения или ориентации камеры.

Основная идея интерактивной визуализации состоит в сохранении всего массива трассируемых лучей в совокупности с необходимыми вспомогательными данными на стадии предварительного расчета освещенности сцены и его последующим использованием для быстрой визуализации. Количество трассируемых лучей в рассматриваемых задачах может достигать миллионов или даже миллиардов в зависимости от сложности визуализируемой сцены, размерности изображения и требований к устранению лестничного эффекта. Поэтому карты трассируемых лучей [48] сохраняются на диске в процессе предварительного расчета. Свойства всех поверхностей, за исключением окрашенных разрабатываемой краской, также сохраняются.

На этапе интерактивной визуализации карты трассируемых лучей загружаются по мере необходимости, оптические свойства поверхностей, окрашенных краской, заменяются на рассчитанную ДФО, и формируется итоговое реалистичное изображение. Время визуализации постоянно, зависит только от разрешения изображения и не зависит от сложности геометрии сцены. Например, время, необходимое для полного вычисления ДФО двухслойной краски с перламутровым эффектом и визуализации изображения с разрешением 640 x 480 пикселей, составило всего около 0.14 секунды на компьютере с процессором Pentium III, 500 MHz. Для «полной» модели краски то же время составляет примерно 0.5–5 секунд в зависимости от параметра краски. Время счета увеличивается с усложнением структуры краски. Например, расчет «полной» модели для трехслойной краски, содержащей два вида чешуек и два вида пигментных зерен, требует от 1 до 9 секунд.

В итоге предлагаемый программный комплекс также является вполне пригодным для интерактивной разработки новых красок. В таком случае в качестве результата можно сохранить полученный состав краски в формате, пригодном для ее изготовления.

3.1.4. Опыт моделирования реальных автомобильных красок

Чтобы оценить качество работы всей системы, были выполнены расчеты для красок со сложными цветовыми эффектами, разработанных фирмой Merck KGaA. Часть параметров, задающих состав таких красок, была нам известна, для других параметров были выбраны реалистичные значения.

Образец №1. Простая краска.

Состав краски:

1. Связующее вещество: прозрачная субстанция с коэффициентом преломления 1.45, была использована плотность равная 1 г/см^3 .

2. Чешуйки «Viola fantasy»: пластинки двуокиси кремния (SiO_2) с напылением двуокиси титана TiO_2 . Толщина слоя двуокиси кремния – 448 нм, толщина слоя TiO_2 – 12 нм. Коэффициенты преломления: 1.5 и 2.7 соответственно. Плотность чешуек 2.7 г/см^3 .

Распределение по размерам:

5% чешуек имеют диаметр $< 6 \text{ м}$

10% чешуек имеют диаметр $< 7.9 \text{ м}$

50% чешуек имеют диаметр $< 17.8 \text{ м}$

90% чешуек имеют диаметр $< 35.8 \text{ м}$

95% чешуек имеют диаметр $< 42.2 \text{ м}$

3. Подложка: идеально черная (“carbon”).

Толщина красящего слоя 20 м . Отношение Пигмент/Связующее вещество равно 0.24. В качестве среднего разброса наклона нормалей чешуек была выбрана величина, равная 3° .

Результаты моделирования (рис. 3.4):

В результате была получена фиолетовая краска. Соответствующая ДФО содержит слабые зеленые “хвосты”, соответствующие углам наблюдения, близким к горизонту. По визуальной оценке результат моделирования близок к фотографии оригинала. Более детальное сравнение не представляется возможным, поскольку неизвестны условия освещения и наблюдения для изображения оригинала.



Рис. 3.4. Шар, окрашенный краской «образец №1».

Образец №2. Краска с блестками (эффект «искрения»).

Состав краски:

1. Связующее вещество: прозрачная субстанция с коэффициентом преломления 1.45, была использована плотность равная 1 г/см^3 .
2. Чешуйки «Xirallic»: пластинки окиси алюминия (Al_2O_3) с покрытием TiO_2 . Толщина слоя окиси алюминия - 230 нм, толщина слоя TiO_2 165 нм. Коэффициенты преломления: 1.77 и 2.7 соответственно. Плотность чешуек 3.7 г/см^3 , средний диаметр - 17 μ .
3. Подложка: зеленого цвета чтобы моделировать поглощающие компоненты краски с неизвестными свойствами.

Толщина красящего слоя – 20 м. Массовая доля чешуек Xirallic в сухой краске – 7.3%. В качестве среднего разброса наклона нормалей чешуек была выбрана величина, равная 3°.

Результаты моделирования (рис. 3.5):

Чешуйки “Xirallic” вызывают появление желто-зеленого пятна зеркального отражения (gloss). При наблюдении на малых расстояниях в окрашенной области виден эффект искрения – окрашенные “точки” различной формы, которые сливаются между собой при наблюдении с больших расстояний.

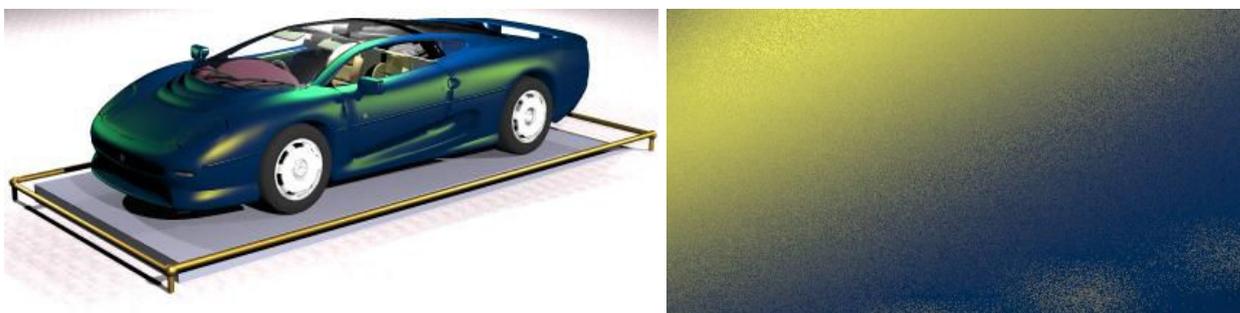


Рис. 3.5. Внешний вид поверхности автомобиля, окрашенного краской «Образец №2». Слева представлен вид издали (угол зрения 40°), справа – вид вблизи: увеличение в 30 раз (угол зрения 1.3°).

Образец №3. Смешивание различных пигментов.

На этом примере можно увидеть, как производители добиваются требуемого оттенка, смешивая пигменты различного цвета. В данном случае с помощью интенсивно окрашенных красных и зеленых чешуек получается краска с перламутровым эффектом и оттенком, близким к белому.

Состав краски:

1. Связующее вещество: прозрачная субстанция с коэффициентом преломления 1.45, была использована плотность равная 1 г/см³.

2. Чешуйки “Xirallic Silver”: пластинки окиси алюминия (Al₂O₃) с покрытием TiO₂. Коэффициенты преломления: 1.77 и 2.7 соответственно. Плотность чешуек 3.7 г/см³, средняя площадь чешуйки – 255 м².

- а) Пигмент1: толщина слоя Al_2O_3 – 230 нм, толщина слоя TiO_2 – 60 нм.
- б) Пигмент2: толщина слоя Al_2O_3 – 300 нм, толщина слоя TiO_2 – 60 нм.
- 3. Подложка: белого цвета.

Толщина красящего слоя – 20 μ . Отношение концентраций чешуек пигментов 1 и 2 – 1:2. В качестве среднего разброса наклона нормалей чешуек была выбрана величина, равная 4° .

Результаты моделирования (рис. 3.6):

Пигменты 1 и 2 интенсивно окрашены и имеют различные цвета. Цвет краски, изготовленной из этих чешуек, близок к белому. При использовании белой подложки с альбедо 0.95 для всех цветов ДФО имеет слегка красный блик (highlight) и «хвост» слабо-зеленоватого оттенка.

Чтобы проверить влияние вычислений в RGB режиме на результирующий цвет, были выполнены аналогичные спектральные вычисления. Различие было практически незаметным. Результаты моделирования оказались также малочувствительными к изменениям концентрации чешуек, небольшим вариациям покрытия чешуек и коэффициентов преломления материалов. Результаты весьма чувствительны к цвету подложки. Для немного розовой подложки с альбедо ($R=0.96$, $G=0.9$, $B=0.92$) цвет «хвоста» ДФО становится близким к белому.

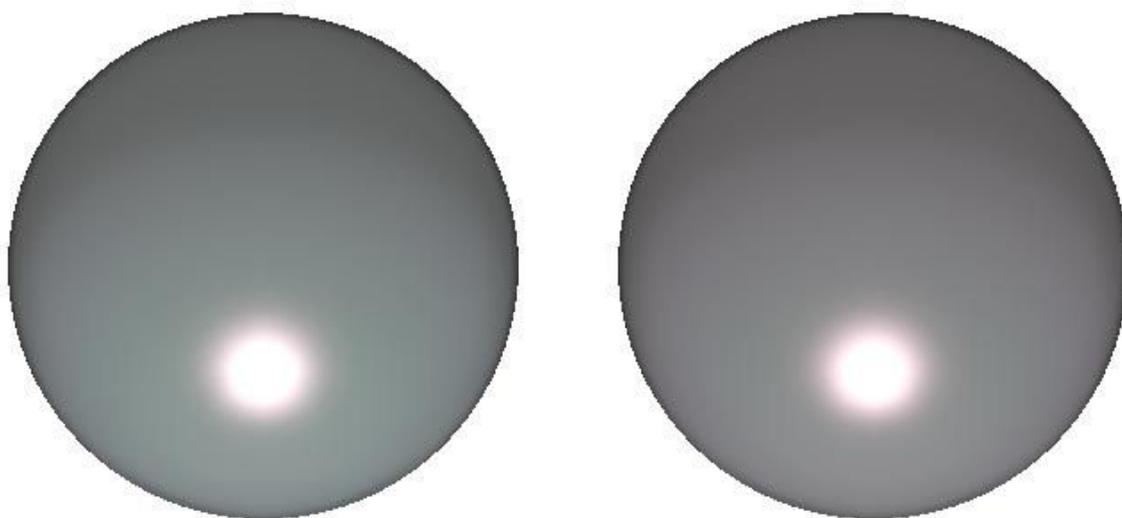


Рис. 3.6. Шар, окрашенный краской «Образец №3». Слева результат для идеально белой подложки ($R=G=B=0.95$), справа – подложка немного розовая ($R=0.96$, $G=0.9$, $B=0.92$).

Пример №4. Подбор структуры краски по ее внешнему виду.

Задача автоматического подбора состава краски, применимого для ее изготовления, по внешнему виду существующей краски является одной из востребованных в автомобильной промышленности. Современные краски имеют достаточно сложный внутренний состав; ингредиенты краски, их концентрации и процесс ее создания часто являются закрытой информацией. Но даже когда изначальный состав краски известен, это не гарантирует совпадение цвета при кузовном ремонте автомобиля потому, что краска меняет свой цвет под воздействием солнечного света, осадков и химических реагентов, применяемых в дорожных работах.

Для проверки возможностей программного комплекса моделирования красок решать задачу подбора состава краски компанией Merck были предоставлены 4 образца реальных красок, созданных с помощью чешуек Iriodin: WF 67/99/250, WF 67/99/192, WF 9/00/78 и WF 9/00/27. ДФО этих образцов были измерены на измерительном комплексе, описанном в п. 2.1. После этого была предпринята попытка воссоздать состав этих красок в предположении, что реальная краска состоит из одного слоя.

Результат моделирования (рис. 3.7 и 3.8):

Удалось получить достаточно близкий цвет восстановленной краски, однако во всех случаях полное совпадение достигнуто не было. Данный эксперимент можно рассматривать как первый шаг к решению задачи автоматического подбора состава краски, которая является весьма востребованной производителями автомобильных красок. На рисунках левая сторона каждой сферы окрашена измеренной ДФО реального образца, а правая сторона – ДФО, рассчитанной с помощью программного комплекса моделирования краски.

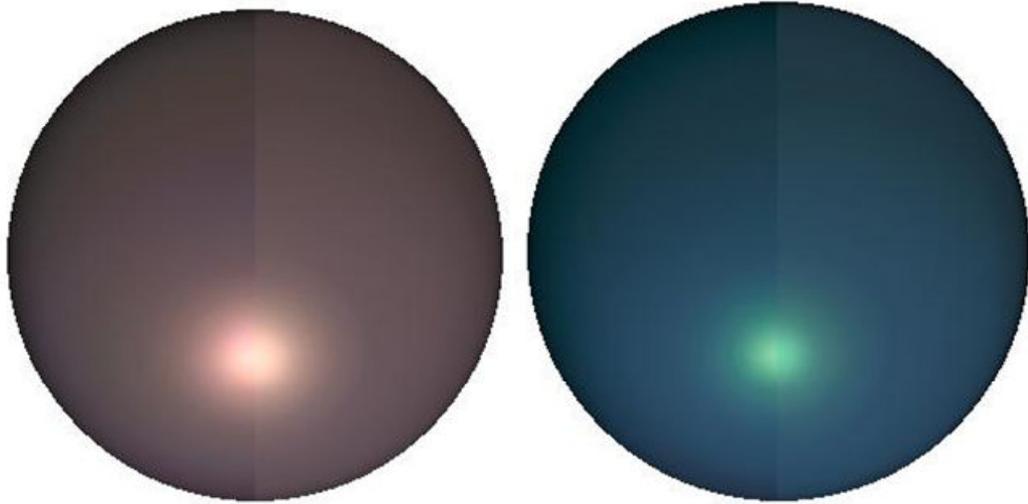


Рис. 3.7. Визуализация измеренной (левая половина сферы) и рассчитанной (правая половина) ДФО перламутровых красок WF 67/99/250 (слева) и WF 67/99/192 (справа).

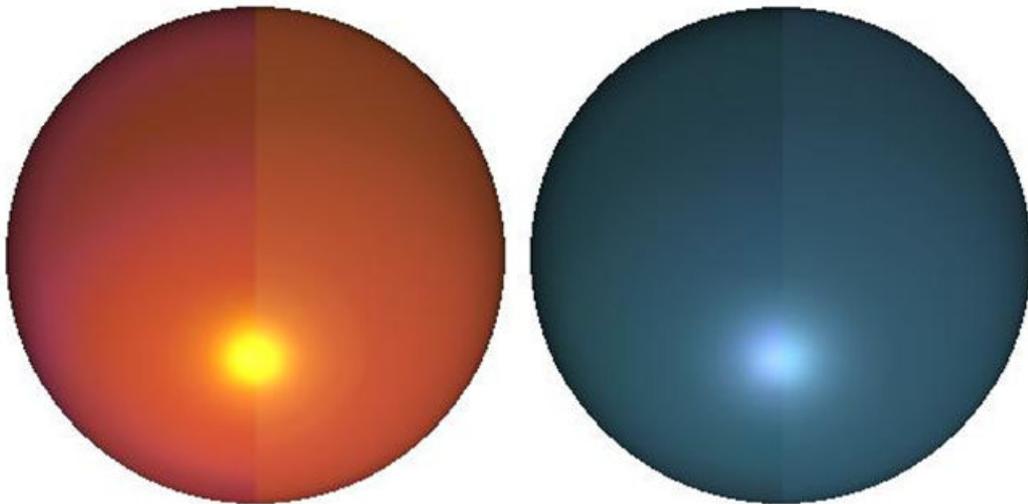


Рис. 3.8. Визуализация измеренной (левая половина сферы) и рассчитанной (правая половина) ДФО перламутровых красок WF 9/00/27 (слева) и WF 9/00/78 (справа).

3.1.5. Результаты

На основании построенной модели многослойной краски были предложены алгоритмы расчета двунаправленной функции отражения света, в общем виде описывающей внешний вид краски с различных направлений и при различных условиях освещения. Был реализован программный комплекс, позволяющий моделировать ДФО краски и реалистично визуализировать ее в некоторой сцене с интерактивной скоростью.

Разработанное решение дает приемлемые результаты при визуализации сложных автомобильных красок при различных условиях освещения, а также показывает хорошее совпадение рассчитанных и измеренных ДФО красок.

Использование комплекса расчета краски в режиме интерактивной визуализации позволяет перейти к задачам моделирования новых красок. Разработанные подходы можно в дальнейшем использовать для решения наиболее востребованной задачи в области моделирования оптически сложных красок – задачи восстановления структуры и состава краски по ее внешнему виду, так называемая задача подгонки цвета.

Проведенные эксперименты с красками фирмы Merck показали хорошее соответствие предложенной модели с реальностью. Как основной цвет результирующей краски, так и цвета таких сложных зон, как блик и около бликовое яркое пятно, близки к цветам реального образца. Полученные в результате моделирования ДФО красок могут быть использованы для физически корректных расчетов освещенности в трехмерных сценах, содержащих окрашенные объекты. Например, они были использованы для анализа и выбора окраски автомобилей, мобильных телефонов и ноутбуков.

3.2. Моделирование ДФО поверхности, покрытой красящим слоем с высокой концентрацией частиц

Результаты моделирования красок оказались весьма успешными и позволили перейти к более сложной задаче моделирования и визуализации покрытий с высокой концентрацией пигментных частиц, например, при разработке новейших типов принтерных чернил для фирмы Seiko Epson. С точки зрения компьютерной графики задача моделирования принтерных чернил выглядит похожей на предыдущую (п. 3.1.). Нам нужно также сформировать двунаправленную функцию отражения (ДФО) поверхности

для окрашенного слоя, состоящего из прозрачной среды (лака) и красящих пигментных частиц. Однако малые размеры частиц и их высокая концентрация полностью меняют вычислительные методы, применимые для данного случая. Вычислительная сложность связана не только с необходимостью использовать методы решения волновых уравнений для моделирования всего слоя, но и с последующим формированием ДФО (функции, определенной для «дальних» расстояний) из полученного волнового решения.

В литературе по компьютерной графике работ, посвященных моделированию покрытий с высокой концентрацией частиц, найти не удалось. Это, в частности, обуславливается развитием вычислительной мощности компьютеров, – ранее такие задачи просто не ставились. Сейчас же их уже можно решать на мощных многоядерных персональных компьютерах. Конечно, задача требует больших вычислительных ресурсов, и интерактивная скорость пока невозможна.

3.2.1. Постановка задачи моделирования красящего слоя с высокой концентрацией частиц

Требуется разработать алгоритмы моделирования слоя принтерных чернил, используемых при печати фотографий, чтобы понять, как при визуализации наблюдатель будет воспринимать эти «виртуальные» чернила при нанесении их на бумагу. В этой задаче красящий слой состоит из малых частиц пигмента с размерами $\sim 100\div 500$ нанометров при объемной концентрации пигмента PVC (Pigment Volume Concentration), доходящей до 50%. Малые размеры частиц, высокая концентрация и малая толщина слоя (~ 1 микрона) не позволяют применять уравнение переноса излучения, как в случае с многослойными красками. Поэтому был разработан программный комплекс, в котором непосредственно решаются волновые уравнения, естественно, при некоторых ограничениях и упрощениях [38, 45, 47].

Основное упрощение касается самого использованного волнового уравнения. Точные уравнения, описывающие распространение света, хорошо известны – это уравнения Максвелла [140]. При характерных размерах неоднородностей среды, многократно превышающих атомные размеры, возможно применение так называемых макроскопических уравнений Максвелла, когда свойства сред описываются соответствующими диэлектрической и магнитной проницаемостями. Как правило, в оптике, в частности в нашем случае, магнитная проницаемость равна 1, а диэлектрическая проницаемость может быть комплексной величиной. Существует небольшое число точных аналитических решений макроскопических уравнений. Все они получены для простых пространственных геометрий с высокой симметрией. В нашем случае со сложной пространственной геометрией аналитическое решение невозможно и может быть получено только с помощью применения численной процедуры. Поэтому в качестве волнового уравнения было выбрано так называемое скалярное приближение, уравнение Гельмгольца [140], так как оно требует значительно меньше компьютерных ресурсов.

Скалярное приближение широко применяется в оптике при расчетах распространения неполяризованного излучения. В случае простых геометрий различие между результатами точных электромагнитных и скалярных расчетов может быть заметным. Однако в случае стохастических сред, когда сильное, в значительной степени изотропное, рассеяние приводит к деполяризации излучения, применение скалярного приближения вполне оправдано.

Рассеяние вычислялось для бесконечного плоского красящего слоя, составленного из одного элементарного фрагмента размерами $\sim 10 \times 10$ микрон, а затем периодически повторенного в двух измерениях. Использование периодических структур – это прием, достаточно часто применяемый в оптических расчетах [120]. В таком случае угловые распределения рассеянного света в дальней зоне содержат конечное

дискретное число направлений. Интенсивность луча (мощность, переносимая в данном направлении) в достаточной степени зависит от геометрии элементарного фрагмента. Чтобы получить гладкие угловые распределения, т.е. ДФО, необходимо произвести расчеты для различных (случайных, но подчиняющихся одной и той же статистике) реализаций элементарного фрагмента, а затем усреднить результаты по ансамблю таких реализаций. Нетрудно видеть, что подобная процедура эквивалентна усреднению по ансамблю, применяемому в статистической физике, и достаточно точно отражает реальную картину рассеяния на красящем слое.

В данном случае расчеты проводятся для монохроматического освещения. Поскольку излучение с разными длинами волн взаимно некогерентно, то построение спектральных ДФО никаких трудностей не вызывает. При расчетах для периодического слоя угловые распределения имеют дискретную угловую структуру. Полное количество направлений и их плотность определяются размерами элементарного фрагмента. Используемые размеры позволяют получить гладкие угловые распределения для всех существенных направлений. Более того, поскольку согласно постановке нашей задачи красящий слой располагался на подложке (бумаге) с Ламбертовским отражением, задача получения ДФО для системы слой + бумага имеет даже более простое решение.

Уже упоминалось, что красящий слой, как правило, имеет стохастическую структуру, в которой объемная концентрация зерен пигмента (распределенных случайно по объему слоя) может составлять 50% и более. Экспериментальное измерение реальной геометрии слоя практически невыполнимо. Поэтому возникает необходимость генерации такой геометрии с помощью численной процедуры.

Таким образом, вся задача моделирования свелась к решению трех самостоятельных задач:

1. Генерация геометрии фрагмента красящего слоя, состоящего из частиц заданных форм и размеров и вычисление распределения коэффициента преломления на используемой пространственной сетке.
2. Решение задачи дифракции на тонком периодическом красящем слое с явным распределением коэффициента преломления конечно-разностными методами.
3. Вычисление ДФО красящего слоя, расположенного на Ламбертовской подложке, исходя из результатов решения задачи дифракции.

3.2.2. Генерация геометрии красящего слоя

Дифракционный расчет рассеяния света красящим слоем предполагает задание его геометрии в явном виде. Были проанализированы многочисленные изображения слоя с просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), растрового электронного микроскопа (РЭМ) и атомно-силового микроскопа (АСМ). На базе этого анализа была создана модель структуры реальных красящих слоев, состоящих из прозрачного связующего вещества, наполненного зернами пигмента различной формы. Зерна пигментов в объеме слоя, как правило, располагаются хаотически и однородно. Но возможны случаи, когда зерна имеют преимущественную ориентацию или образуют конгломераты (агломинация).

Генерация геометрии для небольших концентраций пигментных зерен достаточно проста. Она может быть осуществлена последовательным случайным разбрасыванием центров и ориентаций частиц по объему фрагмента слоя. При этом, если новая добавляемая к ансамблю частица пересекается с уже существующими частицами или выходит за границы фрагмента, то такая частица отбрасывается, и происходит случайное разыгрывание следующей частицы. Процедура заканчивается, когда фрагмент слоя наполняется необходимым числом частиц.

В случае очень тонких красящих слоев (толщина ~ 1 микрона) объемная концентрация зерен пигмента может достигать значительной величины \sim

30% и более. При таких концентрациях случайное разбрасывание не дает необходимого результата и следует применять более сложную процедуру, например, подобную методу молекулярной динамики.

Предложенный алгоритм можно описать следующим образом. Сначала в расчетной области случайно разбрасывается необходимое число частиц, которые могут пересекаться между собой. Затем между частицами вводится упругое взаимодействие, в нашем случае чисто отталкивающее, которое приводит к возникновению сил между пересекающимися частицами или при пересечении частицей границы области. Под действием сил частицы могут перемещаться (и вращаться), и таким образом пересечения между частицами и частиц с границами устраняются. Когда все нежелательные пересечения устранены процедура заканчивается. Для придания ансамблю частиц предпочтительной ориентации может быть введено дополнительное взаимодействие, аналогичное взаимодействию магнитного момента частицы с внешним магнитным полем. При этом степень ориентированности ансамбля частиц регулируется с помощью величины такого поля.

Перемещение частиц под воздействием сил можно находить различными методами, например, методами спуска, минимизируя энергию взаимодействия всего ансамбля. В случае большого числа частиц и высоких концентраций можно использовать динамические подходы (интегрирование соответствующих уравнений движения). Для данной задачи динамики первого порядка было достаточно. Это означает, что частицы не обладают инерцией, и движение частицы мгновенно прекращается, как только исчезает действующая на нее сила. В таком случае нет необходимости вводить массы частиц. Нетрудно видеть, что настоящий подход практически эквивалентен минимизации энергии ансамбля взаимодействующих частиц методом наискорейшего спуска.

После того как геометрия красящего слоя получена, вычисление распределения коэффициента преломления на пространственной сетке (исходные данные для задачи дифракции) не вызывает никаких затруднений.

Отметим, что в нашем случае красящий слой может состоять из зерен различных пигментов различной формы.

Форма пигментных частиц

Анализ красящих слоев показал, что с достаточной точностью в качестве пигментных зерен можно использовать аксиально-симметричные частицы. Такие частицы могут быть аппроксимированы некоторым количеством жестко соединенных между собой шаров. Например, цилиндрическая частица может быть аппроксимирована несколькими одинаковыми шарами с центрами, расположенными на оси цилиндра. Точность аппроксимации будет зависеть от количества шаров и расстояний между их центрами. Примеры возможных частиц, построенных из шаров, приведены на рис. 3.9.

Нетрудно видеть, что используемая аппроксимация частиц шарами позволяет конструировать частицы самой разнообразной формы. Естественно, время расчета геометрии сильно зависит как от числа частиц, так и от точности задания частиц (числа шаров, необходимого для задания частицы). Анализ показал, что во многих случаях форма частиц пигмента близка к форме рисового зерна (две правые формы на рис. 3.9). Поэтому часто использовались частицы именно такой формы.

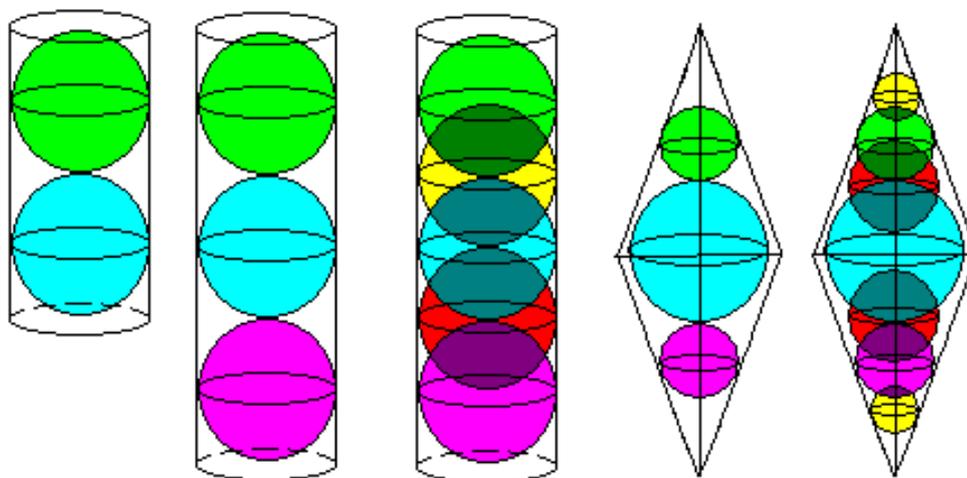


Рис. 3.9. Примеры частиц красящего пигмента.

Описание алгоритма генерации геометрии слоя

Вычисление геометрии слоя состоит из нескольких последовательных итераций (число итераций определяется заранее). Каждая итерация стартует с ансамбля, состоящего из некоторого числа непересекающихся частиц, находящихся в неподвижном состоянии (в самом начале расчета частиц нет совсем). Итерации состоят из следующих шагов.

1. *Добавление к ансамблю новых частиц.* Новые частицы распределены случайно (их координаты центров и ориентация оси симметрии). Количество добавляемых частиц зависит от объемных концентраций частиц различных видов, используемых в вычислениях. Все вновь добавленные частицы записываются в текущий список движущихся частиц, содержащий частицы, которые могут пересекаться с другими частицами или с границами расчетной области. Поскольку перед началом каждой итерации все пересечения устранены, то в текущий список добавляются только новые частицы.

2. *Вокселизация.* Чтобы ускорить вычисления производится “вокселизация” расчетной области, т. е. вся расчетная область разбивается на одинаковые элементарные подобласти (вокселы). Вокселизация частиц состоит в определении соответствующего воксела для каждой частицы. При рациональном выборе размера воксела возможно взаимодействие только между частицами, расположенными в соседних вокселах. Использование вокселизации позволяет существенно ускорить перебор возможных пар взаимодействующих частиц при вычислении сил и вращающих моментов.

3. *Вычисление сил и вращающих моментов.* Для каждой частицы из текущего списка движущихся частиц вычисляются силы и моменты, возникающие при возможном пересечении со всеми

остальными частицами. Силы и моменты, действующие на каждую взаимодействующую частицу, суммируются, а сама частица добавляется в новый список движущихся частиц. Перебор взаимодействующих пар выполнен так, чтобы избежать двойного учета взаимодействий.

4. *Взаимодействие с границами области.* Если частица пытается выйти за границу расчетной области, на нее начинает действовать упругая возвращающая сила, аналогичная силе между пересекающимися частицами. Возвращающая сила направлена по нормали к границе, ее величина растет по мере удаления частицы от допустимого объема области. Вычисленные силы добавляются к силам, вычисленным в п. 3. Все частицы, вышедшие за границы, добавляются в новый список движущихся частиц.

5. *Перемещения и вращения.* С помощью вычисленных сил и вращающих моментов определяется шаг интегрирования. Затем происходит перемещение и вращение частиц.

6. *Модификация текущего списка движущихся частиц.* Вычисленный новый список движущихся частиц переписывается в текущий список. После этого новый список очищается.

7. Если пересечения не устранены и число шагов интегрирования не превышает заранее заданный лимит, то происходит переход к п. 2. В противном случае переход к п. 1.

Итерации прекращаются, когда достигается необходимая объемная концентрация пигментов.

Естественно, настоящий алгоритм имеет ограничения по объемной концентрации. Однако, для реальных концентраций пигмента, например, для шарообразных частиц, при объемной концентрации пигмента $< 60\%$, результаты работы генератора геометрий вполне удовлетворительные.

Было проведено большое количество расчетов, для каждого из которых были вычислены необходимые статистические характеристики

распределений частиц, полученных с помощью генератора геометрий [45]. Все расчеты дали вполне удовлетворительные результаты, а статистические характеристики распределений находились в допустимых пределах.

3.2.3. Решение задачи дифракции

Рассматривается стационарный режим, когда красящий слой освещается падающей скалярной монохроматической волной. В этом случае волновое уравнение становится уравнением Гельмгольца [140]:

$$\Delta u + k^2(\mathbf{x})u = 0$$

где $k(\mathbf{x}) = \eta(\mathbf{x})k_0$ – есть локальное волновое число, k_0 – волновое число в вакууме (воздухе) и η – локальный показатель преломления. В нашем случае показатель преломления различен в воздухе, частицах пигмента и в объемлющей среде.

Формально необходимо проинтегрировать уравнение Гельмгольца во всей области, включая красящий слой и воздух по обе стороны от него. Прямой подход, который использует дискретизированное поле во всей расчетной области, невозможен из-за ограниченности вычислительных ресурсов. Вместо этого все пространство разделяется на три части: воздух выше красящего слоя, сам слой и воздух ниже слоя. В полупространствах заполненных воздухом выше и ниже слоя показатель преломления постоянен, а уравнение имеет хорошо известные аналитические решения. Таким образом, нет необходимости оперировать с полем выше и ниже слоя на пространственной разностной сетке. Для поля внутри красящего слоя аналитическое решение не существует, поэтому решение находится с помощью численной процедуры.

Решение дифракционной задачи должно быть найдено в трех разных областях. На границах этих областей, т.е. на границах воздух – красящий слой, должны быть заданы условия сшивки для искомого решения. Для

уравнения Гельмгольца условия сопряжения имеют следующий вид: поле u вместе с его нормальной производной должно быть непрерывно на границах:

$$u|_{z=0-0} = u|_{z=0+0}$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}|_{z=0-0} = \frac{\partial u}{\partial z}|_{z=0+0}$$

$$u|_{z=H-0} = u|_{z=H+0}$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}|_{z=H-0} = \frac{\partial u}{\partial z}|_{z=H+0}$$

Расположение расчетной области и система координат показаны рис. 3.10. Параллелепипед любого цвета соответствует элементарному фрагменту.

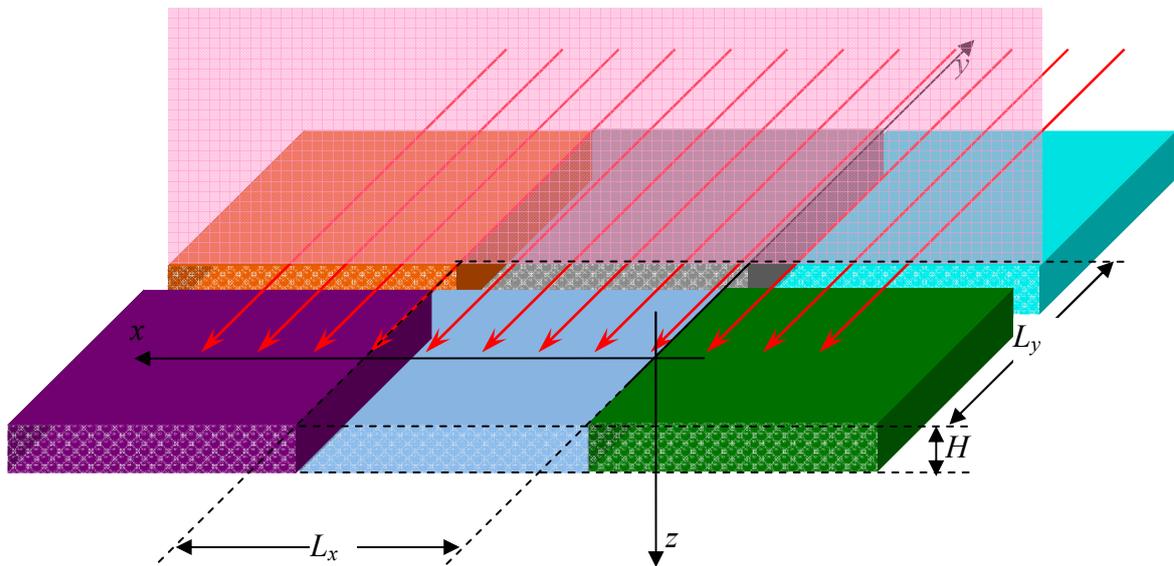


Рис. 3.10. Красящий слой представлен в виде пластины, параллельной плоскости Oxy . Падающая волна показана стрелками; направление падения лежит в плоскости Oxz .

Естественно, численная процедура не может использовать бесконечную расчетную область. Поэтому практический подход состоит в использовании бесконечного красящего слоя, состоящего из элементарного фрагмента (имеющего форму параллелепипеда), повторяющегося периодически в двух измерениях (рис. 3.10). Такой подход широко используется в дифракционных задачах [120]. Все “плитки” (элементарные фрагменты) одинаковы. Из непрерывности следует, что поле на левой

вертикальной границе зеленой плитки равно полю на правой границе синей плитки. И так на всех вертикальных границах. В случае нормального падения (вдоль оси Oz) освещающее поле и поле внутри каждой плитки, а также рассеянное поле для каждой плитки будут одинаковы. Таким образом, полное поле будет периодическим в двух измерениях. Отсюда получаем периодические граничные условия на вертикальных границах между плитками:

$$u(x + L_x, y) = u(x, y)$$

$$u(x, y + L_y) = u(x, y)$$

Подробно решение задачи дифракции описано в [141].

3.2.4. ДФО красящего слоя, расположенного на Ламбертовской подложке

В настоящей работе рассматривался тонкий красящий слой (чернила), нанесенный на специальную бумагу в процессе печати фотографии. Необходимо понять, как при визуализации он будет восприниматься наблюдателем. Для начальных расчетов использовалась упрощенная модель, в которой слой чернил располагается над бумагой и не имеет с ней оптического контакта (рис. 3.11). Это означает, что модель пренебрегает процессом диффузии чернил внутрь бумаги. Анализ рассеивающих свойств бумаги показал, что с достаточной точностью бумагу можно моделировать как плоскую поверхность, обладающую Ламбертовским отражением с интегральным коэффициентом отражения, близким к 1.

В нашем подходе и красящий слой, и подложка рассматриваются как поверхности, однозначно характеризующиеся их двунаправленными функциями отражения (ДФО) и пропускания (ДФП). Такое рассмотрение является точным для статистически однородного слоя конечной толщины, и предполагает, что отражение от подложки полностью некогерентно.

Отметим, что падающий на бумагу свет состоит из двух компонент:

1. первичное освещение, прошедшее через красящий слой
2. свет, отраженный подложкой, а затем отраженный красящим слоем назад в сторону подложки.

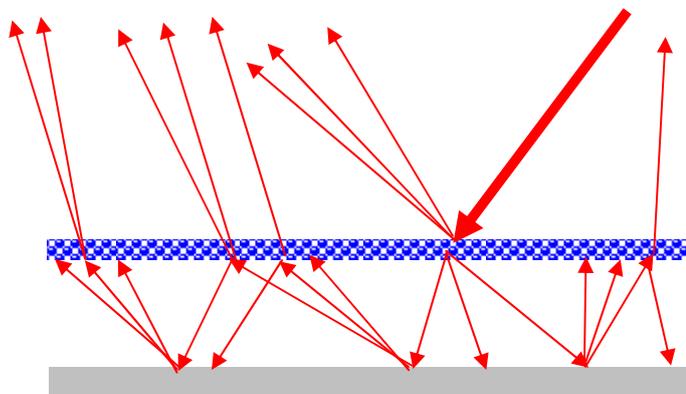


Рис. 3.11. Красящий слой, расположенный на диффузной подложке (бумаге), и переотражения света между слоем и подложкой. Для наглядности расстояние между слоем и подложкой преувеличено. Первичное освещение показано жирной стрелкой.

Для получения итогового ДФО бумаги с нанесенными чернилами необходимо протрассировать сцену, показанную на рис. 3.11, и проанализировать отраженный свет на бесконечном удалении. При рассеянии луча на красящем слое используется результат решения дифракционной задачи. Для расчета сцены используется Монте-Карло трассировка лучей. Поэтому нам не нужна гладкая функция рассеяния (ДФО и ДФП) красящего слоя, а достаточно использовать волновое решение в полученном виде, т.е. набор рассеянных волн – направлений рассеянной энергии.

3.2.5. Структура программного комплекса расчета красящего слоя с высокой концентрацией пигмента

В разработанный программный комплекс [47] входит интерфейсная программа, посредством которой пользователь может:

- задать параметры красящего слоя, такие как форму и размеры частиц, их концентрацию, показатель преломления материала частицы в спектральном виде, ориентацию вытянутых частиц, показатель преломления и размер слоя;
- задать вычислительные параметры, такие как точность представления частиц (число сфер в частице), параметры алгоритма генерации частиц (число вокселей, шаг интегрирования, дополнительные силы для выравнивания частиц и т.д.), параметры волнового расчета;
- задать характеристики подложки, условия освещения;
- визуализировать структуру красящего слоя в увеличенном масштабе, как показано на рис. 3.12, для проверки его задания.

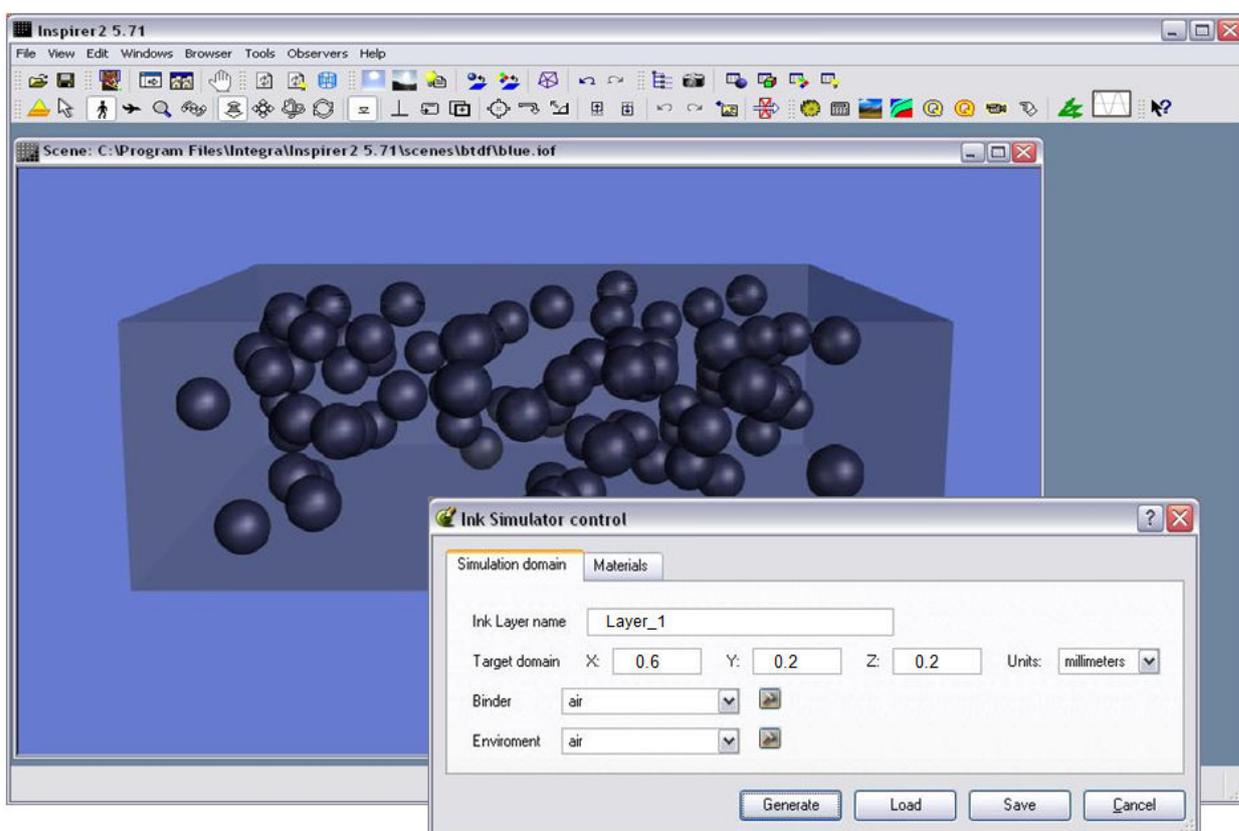


Рис. 3.12. Интерфейсная программа и визуализация структуры красящего слоя.

Интерфейсная программа сделана на базе браузера трехмерных сцен Inspirer2, также разработанного в отделе компьютерной графики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, поэтому структуру красящего слоя можно не только визуализировать, но и перемещаться по ней. В целом эта программа предоставляет удобный графический интерфейс для задания и верификации входных параметров моделирования.

Интерфейсная программа вместе с генератором геометрии составляют блок ввода данных и параметров вычисления. Отдельными блоками являются также модуль волновых вычислений и модуль вычисления ДФО красящего слоя на подложке. Так как объем данных, передаваемых между блоками, является большим, они передаются через промежуточные файлы. Структура программного комплекса представлена на рис. 3.13.

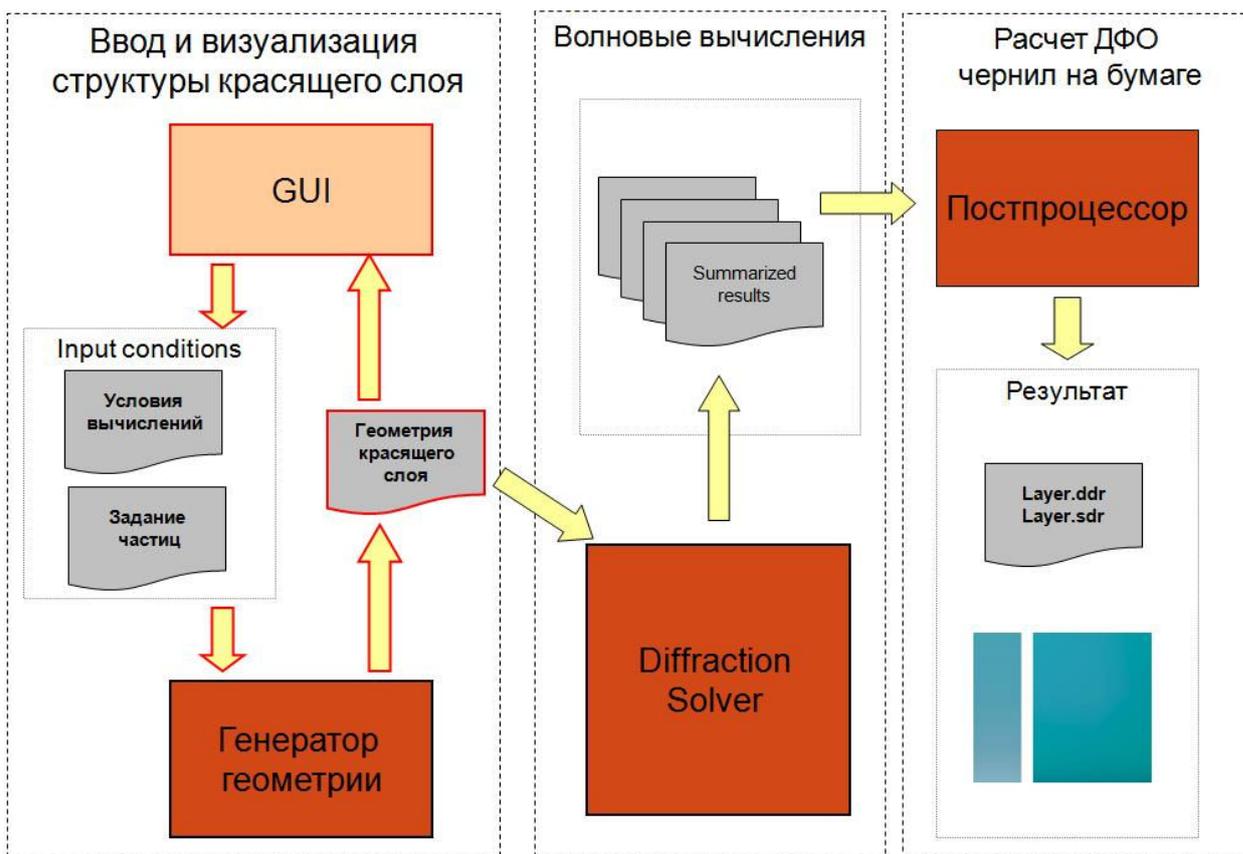


Рис. 3.13. Структура программного комплекса моделирования чернил.

Разработанная структура программного комплекса является достаточно гибкой. Она позволила выделить наиболее сложную часть комплекса – расчет волнового решения в слое – в отдельную программу, независимую ни от спецификации входных данных, ни от их дальнейшей обработки. В реальности этой программе на вход подаются только показатели преломления материала в узлах трехмерной сетки, покрывающей пространство расчета. Больше никакой дополнительной информации, например, что это – красящий слой с высокой концентрацией пигмента, не требуется. Также результатом программы является решение дифракционной задачи – набор волн. В результате разработанный комплекс легко может быть применен для других задач расчета оптических характеристик поверхностей.

Для примера рассмотрим применение его для вычисления свойств поверхности с микрорельефом, размерности (высоты) которого имеют значения порядка микрона. Такие поверхности встречаются в светопроводящих системах, используемых в панели приборов автомобилей и самолетов. В результате интересно, как будет выглядеть рассеянный пучок света, прошедший сквозь прозрачную пластину с микрорельефом, на некотором расстоянии. Для решения этой задачи необходимо изменить генератор геометрии, который достаточно прост: узлы ниже микрорельефа содержат показатель преломления материала пластины, а узлы выше микрорельефа – показатель преломления воздуха. Также изменяется сцена, которую нужно протрассировать для получения распределения рассеянного пучка на расстоянии. Центральный, и наиболее сложный, модуль программного комплекса может быть использован без изменения.

3.2.6. Примеры моделирования чернил

Физические свойства слоя и подложки

При экспериментальном моделировании чернил для корпорации Seiko Epson были использованы следующие входные данные:

- Оптические свойства подложки (бумага): идеальная белая Ламбертовская поверхность с интегральным коэффициентом диффузного отражения 0.9.

- Коэффициент преломления связующего вещества слоя $\eta=1.558$. Связующее вещество является прозрачным, дисперсия коэффициента преломления мала.

Пигменты. В расчетах были использованы три реальных пигмента Red, Yellow, Blue, а также искусственный пигмент Green.

- Действительная часть коэффициента преломления всех пигментов $\text{Re}(\eta) = 1.4$.

- Мнимая часть коэффициента преломления пигментов $\text{Im}(\eta)$ представлена на Рис. 3.14.

В расчетах были использованы различные объемные концентрации пигментов, а также смеси Yellow и Blue при полной концентрации 15%, 30% и 50%. Пигмент Green был “сконструирован” как молекулярная смесь пигментов Blue и Yellow, чтобы определить разницу результатов для смеси частиц, состоящих из разных пигментов, от результатов для частиц, состоящих из смеси пигментов.

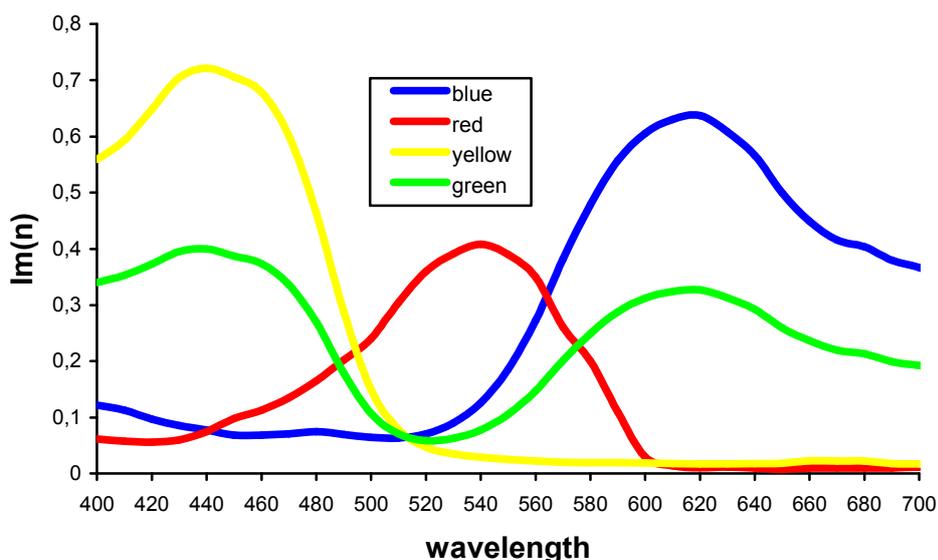


Рис. 3.14. Спектрограммы мнимых частей коэффициентов преломления использованных пигментов.

В работе было исследовано влияние многочисленных параметров на визуальное отображение красящего слоя. К ним относятся:

- Объемная концентрация частиц пигмента
- Размер частиц
- Форма частиц
- Ориентация частиц
- Агглютинация

Параметры изменялись в достаточно широких пределах – были промоделированы около 260 вариантов различных комбинаций параметров.

Формы и размеры частиц. Были использованы шарообразные и цилиндрические зерна пигментов. Диаметр шарообразных зерен изменялся от бесконечно малой величины (молекулярная смесь) до 450 nm. Длина цилиндрических частиц была равна 6 радиусам цилиндров. Размер цилиндрических частиц определялся с помощью “эффективного диаметра”, т.е. диаметра равновеликого шара. Были использованы цилиндры со следующими значениями эффективного диаметра: 100 nm, 200 nm и 300 nm.

Ориентация частиц. Для цилиндрических частиц были использованы три типа ориентации: хаотическая, в плоскости слоя и перпендикулярно плоскости слоя. Расположение частиц в слое при этих ориентациях показаны на рис. 3.15.



Рис. 3.15. Ориентации цилиндрических частиц: хаотическая, преимущественно вдоль слоя, преимущественно поперек слоя.

Агглютинация. Для шарообразных частиц диаметром 100 nm была смоделирована агглютинация: неоднородное пространственное

распределение частиц (частицы пигмента образуют кластеры), вызванное их взаимным притяжением. Соответствующее пространственное распределение частиц представлено на рис. 3.16.

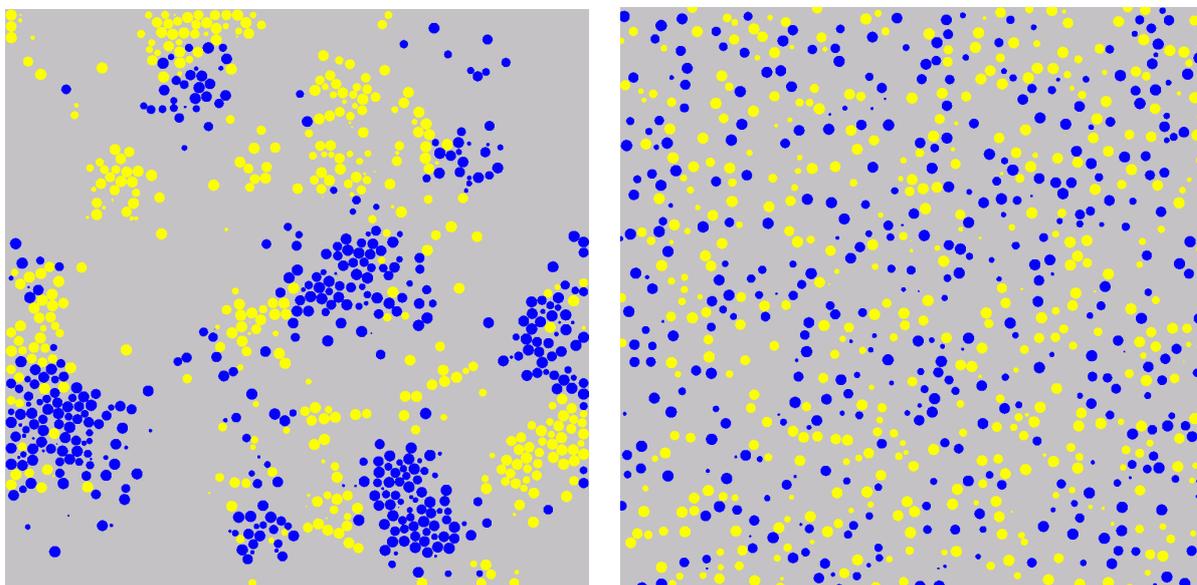


Рис. 3.16. Структура красящего слоя с агглютинацией и без агглютинации. Горизонтальное сечение слоя. Объемные концентрации пигментов: 7.5% Blue + 7.5% Yellow.

Визуализация результатов моделирования

В работе было проведено моделирование около 260 вариантов различных комбинаций параметров слоя. Цветные изображения для части таких вариантов приведены в таблицах (см. ниже).

Каждое изображение в таблицах состоит из двух частей (рис. 3.17). Левая вертикальная полоса изображает красящий слой на бумаге при естественном освещении. Вертикальная координата задает угол наблюдения, меняющийся от 0° (верх) до 60° (низ). Квадратное изображение справа представляет диффузную ДФО при освещении параллельным светом под заданным углом. Вертикальная координата есть такой же угол наблюдения, горизонтальная координата задает угол освещения, изменяющийся от 0° до 60° слева направо. Для лучшего сравнения яркость всех изображений одинакова и выбрана так, чтобы чисто Ламбертовская поверхность (с

интегральным коэффициентом диффузного отражения, равным 1) давала цвет (255,255,255) в цветовом пространстве RGB.

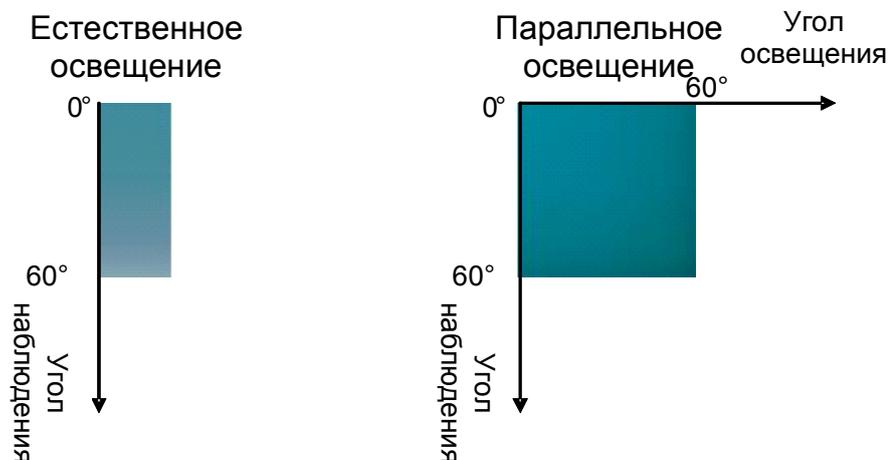


Рис. 3.17. Визуальное представление результатов моделирования. Левая часть (прямоугольник) представляет красящий слой при естественном освещении, правая часть (квадрат) представляет слой при освещении параллельным светом.

Результаты моделирования были объединены в таблицу, показывающую влияние размеров частиц (рис. 3.18). Изображения содержат визуальное представление ДФО красящего слоя на бумаге (белая Ламбертовская поверхность с коэффициентом диффузного отражения 0.9).

Каждая строка таблицы содержит результаты моделирования для одного и того же пигмента (смеси пигментов) и объемной концентрации. В самой левой колонке таблицы приведен состав пигментов красящего слоя и их объемные концентрации. Пигменты обозначены первыми буквами их названий. Каждая колонка частицы соответствует определенному размеру частиц и их ориентации. В колонке “бесконечно малые частицы” (infinitesimal particles) приведены результаты для однородного слоя (молекулярная смесь связующего вещества и пигментов) при соответствующих объемных концентрациях.

	infinitesimal particles	Balls 30 nm	Balls 100 nm		Balls 200 nm	Balls 300 nm		Balls 450 nm	cylinders $D_{eff} = 100$ nm			cylinders $D_{eff} = 200$ nm			$D_{eff} = 300$ nm		
			normal	agglutinated		normal	rough surface		isotropic	horiz aligned	vertically aligned	isotropic	horiz aligned	vertically aligned	isotropic	horiz aligned	vertically aligned
R15%																	
Y15%																	
Y12.5% + B2.5%																	
Y7.5% + B7.5%																	
G15%																	
Y25% + B12.5%																	
B15%																	
R30%																	
Y30%																	
Y25% + B5%																	
Y15% + B15%																	
G30%																	
Y5% + B25%																	
B30%																	
R50%																	
Y50%																	
Y42% + B8%																	
Y25% + B25%																	
G50%																	
Y8% + B42%																	
B50%																	

	infinitesimal particles	Balls 30 nm	Balls 100 nm		Balls 200 nm	Balls 300 nm		Balls 450 nm	cylinders $D_{eff} = 100$ nm			cylinders $D_{eff} = 200$ nm			$D_{eff} = 300$ nm		
			normal	agglutinated		normal	rough surface		isotropic	horiz aligned	vertically aligned	isotropic	horiz aligned	vertically aligned	isotropic	horiz aligned	vertically aligned
B30%																	
R50%																	
Y50%																	
Y42% + B8%																	
Y25% + B25%																	
G50%																	
Y8% + B42%																	
B50%																	

Рис. 3.18. Результаты моделирования.

Влияние агглютинации представлено на рис. 3.19. Визуальное представление ДФО красящего слоя на бумаге (белая Ламбертовская поверхность с коэффициентом диффузного отражения 0.9).

	100 nm	200 nm	100 nm Aggl.	300 nm
R15%				
Y15%				
Y12.5%+B2.5%				
Y7.5%+B7.5%				
G15%				
Y2.5%+B12.5%				
B15%				
R30%				
Y30%				
Y25%+B5%				
Y30%+B30%				
G30%				
Y5%+B25%				
B30%				

Рис. 3.19. Результаты моделирования. Влияние агглютинации.

Каждая строка таблицы (рис. 3.19.) содержит результаты моделирования для одного и того же пигмента (смеси пигментов) и объемной концентрации. В самой левой колонке таблицы приведен состав пигментов красящего слоя и их объемные концентрации. Пигменты обозначены первыми буквами их названий. Каждая колонка частицы соответствует определенному размеру частиц.

Анализ результатов моделирования

Таблица на рис. 3.18 дает общее представление о влиянии размеров частиц. Нетрудно видеть, что цвет красящего слоя становится более насыщенным при росте концентрации пигмента (что вполне естественно) и при уменьшении размеров частиц (такое поведение цвета трудно предположить без моделирования). Кроме этого, влияние размеров сильнее при малых концентрациях пигмента и ослабевает с ростом концентрации. Для шарообразных и цилиндрических частиц роль размера практически одна и та же.

В результатах, приведенных на рис. 3.19, нетрудно видеть, что насыщенность цвета при агглютинации соответствует насыщенности цвета для частиц большего размера, что вполне естественно, поскольку образование кластеров увеличивает эффективный размер пигментных зерен.

К такому же выводу можно прийти, анализируя изображения для смеси шарообразных частиц пигментов Blue и Yellow при равных концентрациях в 7.5% и аналогичным результатом для пигмента Green при концентрации 15%. Для более крупных частиц с диаметрами 300nm и 500nm различие в цветах заметно, хотя и невелико. При уменьшении диаметра пигментных зерен это различие пропадает.

3.2.7. Результаты

Была разработана архитектура комплекса вычислений оптических характеристик тонкого красящего слоя с высокой концентрацией пигмента, что приводит к необходимости непосредственного решения волновых уравнений. Комплекс состоит из 3-х практически независимых модулей. Взаимодействие модулей организовано через файлы с данными общего вида, что позволяет легко модифицировать комплекс для других задач расчета оптических свойств сред или поверхностей с рассеивающими частицами с размерами, близкими к длине волны света, и с высокими концентрациями.

На основании разработанной модели чернильного слоя и его взаимодействия с подложкой были предложены алгоритмы расчета двунаправленной функции отражения света, в общем виде описывающей внешний вид чернил с различных направлений и в различных условиях освещения. Был реализован программный комплекс, позволяющий моделировать ДФО чернил.

Проведенное компьютерное моделирование принтерных чернил показало соответствие результатов вычислений внешнему виду чернил, нанесенных на бумагу. Программный продукт, построенный на описанных алгоритмах, используется производителем комплексов печати фотографий и цветных принтеров. С помощью программного моделирования можно отследить тенденции изменения итогового цвета в зависимости от использования частиц различной формы и при различных концентрациях, влияния выравнивания частиц в процессе высыхания и т.д. Это позволяет существенно снизить затраты при разработке новых типов чернил.

3.3. Выводы

Разработанные алгоритмы моделирования красочных покрытий позволяют получить входные данные для сцен, содержащие поверхности с такими покрытиями, в случае, когда образцы материалов недоступны. В действительности каждый новый тип покрытия требует серьезной исследовательской работы и разработки новых подходов и алгоритмов. Например, для визуализации кожи человека, покрытой косметическим кремом, подходы, описанные в этой главе, неприменимы. Эта задача также востребована промышленностью, но пока приемлемые решения не разработаны.

Моделирование каждого типа покрытий является настолько сложной задачей, что даже два таких на первый взгляд близких материала, как краски

и принтерные чернила, потребовали разработки разных программных комплексов, имеющих принципиально разную архитектуру.

Все разработанные подходы и решения получения оптических характеристик были проверены на соответствие действительным свойствам материалов. Тесты и выполненные реальные практические расчеты показали хорошее соответствие, приемлемое для использования полученных данных в качестве начальных условий физически корректного моделирования распространения света в конкретных средах.

Представленные в этой главе подходы и алгоритмы позволяют существенно повысить точность задания исходных данных и сделать его более эффективным. Более того, они позволяют перейти к другому классу задач – разработке и дизайну новых материалов. При этом разрабатываемые материалы могут быть сразу назначены на объекты виртуальной сцены и визуализированы при различных условиях освещения, что дает дизайнеру возможность оценить внешний вид конечного продукта без дорогостоящего производства его реальных физических прототипов.

Моделирование покрытий дополняет и расширяет разработанный комплексный подход к решению проблемы задания оптических характеристик поверхностей и материалов виртуальной сцены, изложенный в главе 2.

Глава 4. Повышение производительности генерации реалистичных изображений

Не менее важной проблемой современной компьютерной графики является скорость генерации реалистичных изображений. Методы моделирования распространения света в виртуальной сцене чрезвычайно ресурсозатратны. В то же время пользователи предъявляют все более высокие требования к скорости выполнения расчетов без существенной потери качества реалистичного изображения, что является необходимой составляющей повышения производительности их труда.

Программный комплекс генерации реалистичных изображений Inspire2, разработанный в отделе компьютерной графики ИПМ при непосредственном участии автора, используется во многих научных и промышленных организациях по всему миру для расчета распределения освещенности и предсказания внешнего вида продукции (более подробно круг применений представлен во введении). В этом классе приложений применение суперкомпьютеров и даже кластеров компьютеров не является приемлемым для пользователя. С точки зрения пользователей «идеальной» компьютерной платформой является ноутбук или многоядерный персональный компьютер. При этом они хотели бы получать высокореалистичные изображения в реальном времени или режиме, близком к нему. То есть большинство пользователей хотело бы работать с программным комплексом в интерактивном режиме и видеть немедленную реакцию на свои действия.

Исходя из этой предпосылки и ресурсоемкости моделирования распространения света, выделим четыре основных класса скорости визуализации:

- 1) Реальное время. Реальное время характеризуется генерацией изображений со скоростью более 25-30 кадров в секунду. Реакция на

действия пользователя происходит быстро и «гладко», т.е. он практически не видит задержки отклика на свое действие.

- 2) Интерактивный режим. Интерактивный режим характеризуется скоростью генерации изображения от 10-15 до 0.5-1 кадров в секунду (т.е. до 1-2 секунды на кадр). Реакция на действия пользователя происходит за «разумное» время, но явно видна задержка визуализации. Однако в данном временном промежутке пользователь все еще интуитивно считает реакцию программного комплекса достаточной для проведения каких-либо интерактивных операций, например, движения камеры вокруг или сквозь виртуальные объекты сцены.
- 3) Приемлемое время отклика. Приемлемое время отклика характеризуется временем генерации изображений от нескольких секунд до 1-2 минут. При этом времени уже нельзя говорить об интерактивной реакции, однако, в терминологии Интернета, у пользователя еще остается ощущение присутствия «on-line», т.е. того, что программный комплекс непосредственно выполняет его команду.
- 4) Фоновый режим. Этот режим характеризуется временем генерации изображения от нескольких минут. Такие долгие вычисления уже неприемлемы при работе в интерактивном режиме программного комплекса и должны переноситься в фоновый режим, давая возможность пользователю заниматься другими задачами.

Ниже описаны программные решения, направленные на получение максимально возможной скорости визуализации при сохранении приемлемого качества итогового изображения.

4.1. Использование графических ускорителей

4.1.1. Реалистичная визуализация в реальном времени с применением OpenGL

На данном этапе получение скорости визуализации в реальном времени для производственных сцен возможно только с помощью графических ускорителей.

Возможность создания визуализации на базе современных методов интерактивной трассировки лучей рассматривалась в [142-144]. Хотя метод трассировки лучей является физически корректным, все же он не обеспечивает производительность реального времени на общедоступных персональных компьютерах. Впечатляющие результаты, достигнутые в проекте Real Time Ray Tracing [144]: скорость визуализации ~20 кадров в секунду без расчета глобальной освещенности и 2-4 кадра в секунду с глобальным освещением для изображений размером порядка 600x800 точек, – были получены на больших компьютерных кластерах (44-48 процессоров). На сегодняшний день проект, рассматривающийся как чрезвычайно многообещающий и интересный в середине 2000-х, практически перестал существовать. Это еще раз доказывает тезис, что суперкомпьютеры и кластеры остаются невостребованной платформой для задач компьютерной графики.

Другим направлением достижения реального времени визуализации является использование специализированных процессоров для трассировки лучей, позволяющее достичь необходимой производительности [145, 146]. Но такие процессоры дороги и мало распространены из-за их узкой специализации и недостаточного спроса для их производства в индустриальном масштабе.

Поэтому для визуализации в реальном времени была выбрана платформа OpenGL [147, 148] в качестве базового уровня визуализации.

Аппаратная поддержка визуализации через OpenGL является чрезвычайно быстрой даже для персональных компьютеров благодаря индустрии компьютерных игр [149]. Также эта платформа позволяет эффективно решать задачи виртуальной реальности, такие как визуализация рассчитанных пространственных данных (например, температура воздуха, скорость его движения) в контексте реалистичного изображения сцены [23].

При разработке OpenGL визуализации ставилась задача максимально приблизить получаемое изображение к изображению, полученному трассировкой лучей. При этом выделяются следующие важные элементы для восприятия реалистичности изображения, которые необходимо поддерживать при визуализации через OpenGL:

- наличие теней от источников света;
- естественное (дневное) освещение для сцен вне помещений;
- зеркальные отражения для зеркал, стекол, глянцевых покрытий и прочих отражающих поверхностей;
- эффекты вторичной освещенности, каустики преломленного света;
- правильное изображение оптически сложных материалов, поддержка ДФО для задания свойств поверхностей.

Подробно алгоритмы, использованные для поддержки этих элементов при визуализации в реальном времени, были описаны в [24, 150]. Примеры изображений, полученных в реальном времени, показаны на рис. 4.1.

Визуализация в реальном времени на базе OpenGL была реализована в программном комплексе Inspirer2. Практическое использование этого режима визуализации показало, что программный комплекс способен строить вполне реалистичные изображения с естественным освещением, визуализацией двунаправленных функций отражения, вторичной освещенностью со скоростью 25 и более кадров в секунду, т.е. в реальном времени на сценах, состоящих из нескольких сотен тысяч треугольников.



Рис. 4.1. Изображения, полученные в реальном времени.

Реализованный программный комплекс является мощным интерактивным средством просмотра, изучения и модификации трехмерных сцен с реалистичной визуализацией.

4.1.2. Визуализация результатов моделирования освещенности

Расчет корректной глобальной освещенности (см. Введение) обычно занимает значительное время. В зависимости от сложности виртуальной модели время моделирования может варьироваться от десятков минут до часов и даже суток. В то же время полученные результаты моделирования освещения хотелось бы визуализировать в режиме реального времени, предоставить возможность пользователю виртуально передвигаться по модели, оценить ее с различных точек. Для этого рассчитанная освещенность сохраняется в специальных картах освещенности. В процессе расчета освещенность сохраняется на треугольной сетке сцены в виде значений освещенности в вершинах треугольников. Для получения точного решения

используется достаточно мелкая, адаптивно создаваемая сетка. Дополнительное разбиение такой сетки производится в областях, где имеет место большой градиент освещенности.

Таким образом, исходные результаты моделирования представляются в виде значений освещенностей в вершинах треугольников на детальной треугольной сетке. Скорость визуализации такой сетки зависит от числа треугольников, т.е. от детальности представления сцены. Часто она не может быть эффективно визуализирована из-за большого числа элементов. Для достижения интерактивной скорости эти карты должны быть оптимизированы по размеру и представлены в виде, загружаемом в независимые системы визуализации, основанные на использовании графических ускорителей, например [151].

Одним из популярных, широко используемых в Интернете и стандартизированных форматов представления трехмерных сцен является VRML (Virtual Reality Modeling Language) [152], для которого существуют как бесплатные, так и коммерческие браузеры. Поэтому разработка экспорта рассчитанных карт освещенности в VRML формат существенно расширяет возможности визуализации результатов моделирования освещенности. Например, карты освещенности могут быть рассчитаны на мощном персональном компьютере или кластере, а их визуализация и просмотр – на популярных сейчас планшетах. VRML формат позволяет формировать изображения трехмерных сцен с использованием текстур. Таким образом, учитывая, что в сценах, описывающих модель автомобиля, самолета или здания, широко применяются текстуры, единственным практическим подходом является представление карт освещенности с помощью текстур для всех поверхностей сцены. Поэтому была разработана программа конвертации карт освещенности, являющихся результатом физически корректного моделирования распространения света, в VRML формат [39, 46, 52].

Основной проблемой использования текстур для представления карт освещенности и яркости в VRML формате является проблема их большой

размерности. Графические ускорители, используемые всеми браузерами, поддерживающими VRML формат, имеют ограничения по объему используемых текстур. При превышении этого объема либо часть текстур перестает воспроизводиться, либо скорость воспроизведения существенно падает.

Следует учесть, что при использовании обычных текстур в представлении сцены широко применяется их повторяемость. Небольшое по размеру изображение, например, поверхность кирпичной стены или даже часть фасада дома повторяется много раз для представления большой поверхности – стены или здания. Использование этой повторяемости для представления карт освещенности и яркости становится невозможным, поскольку одинаковые (повторяющиеся) части геометрии, как правило, имеют разную освещенность. В силу этих причин размерность используемых текстур возрастает многократно.

Другой причиной, приводящей к большому размеру результирующей текстуры, является использование в сцене обычных текстур высокого разрешения. Результирующая текстура объединяет карту освещенности и обычную текстуру, поэтому ее разрешение должно быть достаточным, чтобы без искажений передать рисунок изначальной обычной текстуры.

И, наконец, третьей причиной высокого разрешения результирующих текстур является наличие в сцене участков с большим градиентом яркости. Изображение на этих участках будет размазано, если разрешение текстуры будет недостаточным. На рис. 4.2 представлено изображение двери в салоне самолета при недостаточном разрешении текстуры. Проблема вызвана тенью на двери, которая при недостаточном разрешении текстуры размывается и происходит ее "утечка" за пределы затеняющей поверхности. На рис. 4.3 представлено изображение той же двери в самолете, полученное при существенном увеличении разрешения текстуры. Проблема с "утечкой" тени практически исчезла.



Рис.4.2. Неправильное изображение освещенности при недостаточном разрешении текстуры.



Рис.4.3. Та же сцена при увеличенном разрешении текстуры. Проблема с некорректной освещенностью исчезла.

Поэтому задача программы, экспортирующей результаты моделирования освещенности в VRML формат, состоит в обеспечении максимально возможного качества экспортируемых карт освещенности при заданных ограничениях – количестве и разрешении текстур.

Дополнительной проблемой является ограничение не только на полный объем текстур, но также на их количество и максимальную размерность отдельных текстур. Эти ограничения зависят от используемого графического ускорителя и драйвера. Типичные значения, при которых графический ускоритель может использоваться эффективно, – это несколько десятков текстур при разрешении отдельной текстуры не более 4096x4096 точек. Была реализована возможность контролировать эти параметры в процессе экспорта карт освещенности. Таким образом, пользователь может найти оптимальное соотношение между качеством итогового изображения и эффективностью его визуализации для достижения интерактивной скорости.

Следует отметить, что при подготовке текстур приходится разбивать всю геометрию сцены на компоненты – небольшие части, для которых можно определить такое отображение текстуры на плоскость поверхности,

что искажения будут находиться в заданных пределах. Наиболее практичным и достаточно эффективным подходом для решения этой задачи является разбиение всей геометрии сцены на группы связанных между собой треугольников, нормали которых отличаются от выбранного направления не больше чем на заданную величину. Для каждой такой группы строится отдельная текстура. В результате этого шага получается очень большое количество текстур, необходимых для полного покрытия сцены. Для реальных сцен это число может составить десятки тысяч. В то же время многие из текстур могут иметь небольшие размеры, поэтому наиболее разумным решением является упаковка некоторого множества таких текстур в одну – так называемый «атлас».

Микрософт DirectX SDK предоставляет соответствующие процедуры, позволяющие эффективно упаковывать множество текстур в один такой атлас [153]. Как правило, разрешение атласа по каждому измерению выбирается кратным степени двух (2^n), что позволяет избежать дополнительных расходов памяти при передаче текстур в графический ускоритель. Полное количество атласов и их конкретное разрешение выбирается пользователем в зависимости от требования к качеству отображения карт освещенности и возможностей оборудования, в первую очередь графического ускорителя. Задача программы, экспортирующей результаты моделирования освещенности в VRML формат, состоит в обеспечении максимально возможного качества экспортируемых карт освещенности при заданных ограничениях – количестве и разрешении атласов.

4.1.3. Оптимизация качества текстур

Оптимизация качества экспортируемых карт освещенности происходит в несколько этапов.

На первом этапе вся геометрия сцены (треугольная сетка) разбивается на компоненты так, чтобы для каждой из них можно было определить

отображение поверхности на плоскость текстуры, и искажения лежали бы в заданных пределах. В нашей системе используется разбиение на группы связанных между собой треугольников, поскольку текстура, представляющая карту освещенности, должна быть разрезана вдоль границ связанной компоненты. Здесь возможны скачки яркости. Для уменьшения искажений отображения в группу собираются треугольники, нормали у которых отличаются от выбранного направления не больше чем на заданную величину.

На втором этапе для каждой такой группы строится карта яркости – текстура заданного разрешения в RGB пространстве. Для построения текстуры может использоваться как линейный, так и нелинейный операторы сжатия динамического диапазона яркостей [22]. Исходное разрешение текстуры выбирается достаточно высоким (~1.0-0.1 см в физических единицах на реальных поверхностях сцены) так, чтобы возможно было получить изображения высокого качества. Если для данной группы треугольников в сцене назначена обычная текстура, то разрешение результирующей текстуры выбирается не ниже разрешения обычной текстуры, чтобы избежать ее размывания.

На третьем этапе происходит сжатие построенных текстур до минимально допустимого значения. Вычисляется среднее значение яркости в RGB пространстве для всех последовательных четверок текстурных пикселей. Разрешение текстуры можно уменьшить в четыре раза (в два раза по каждому измерению), если для каждой четверки это среднее значение отличается от значения каждого пикселя из четверки на величину, меньшую заданного пользователем порога. Процедура повторяется, пока выполняется вышеозначенное условие. Использование такой процедуры сжатия существенно сокращает необходимый объем памяти, потому что в реальных сценах всегда существуют не освещенные поверхности (внутренние поверхности реальных объектов). Для них текстуры можно сжать до минимального размера.

На четвертом этапе построенные текстуры упаковываются в атласы с использованием DirectX. Для этого множество построенных текстур необходимо разбить на группы, каждая из которых будет упакована в отдельный атлас. Для больших реальных сцен суммарный объем (разрешение) текстур, построенных на третьем этапе, существенно превосходит суммарное разрешение максимально допустимого количества атласов. Поэтому в реальности приходится использовать меньшее разрешение текстур для того, чтобы вписаться в заданные ограничения по размерности. Желательно при этом уменьшить разрешение всех текстур примерно одинаково, чтобы их качество было бы равномерно по всей сцене. Для этой цели используется следующий алгоритм:

(1) Все текстуры, построенные на этапе 3, сортируются в порядке убывания их размерности (количеству пикселей).

(2) Выбирается некоторая величина A , определяющая максимальную суммарную размерность текстур, которые можно собрать в одну группу. Максимальное разрешение атласа используется в качестве начального приближения для этой величины.

(3) Мы добавляем текстуры в заданную группу до тех пор, пока их суммарное разрешение не превысит заданную величину A . Группа начинает формироваться с наибольших текстур. Если данная текстура не может быть добавлена в формируемую группу, то мы пытаемся добавить следующую, меньшую по размеру. Как результат этой процедуры, некоторое количество групп N_a будет получено.

(4) Процедура, описанная в п. 1-3, фактически определяет некоторую функцию $N_a = F(A)$, которая задает результирующее количество групп (атласов) для максимального суммарного разрешения группы A . Максимальное количество атласов задано пользователем, поэтому для вычисления максимального суммарного разрешения группы A необходимо решить соответствующее нелинейное уравнение $F(A) = N$, где N – максимальное количество атласов, заданное пользователем. Решение

находится методом деления отрезка пополам, поскольку функция $F(A)$ не возрастающая ($F(A_1) \leq F(A_2)$ при $A_1 > A_2$).

При решении этого уравнения определяется состав групп исходных текстур для каждого из будущих атласов.

(5) На пятом этапе каждая из определенных выше групп текстур упаковывается в отдельный атлас. При упаковке определяются текстурные координаты внутри данного атласа для всех треугольников, которые к нему отнесены. Потом создается результирующая текстура путем растеризации карты освещенности для каждого из треугольников на текстуре атласа. При этом в каждом пикселе текстуры суммируются значения освещенностей (либо яркостей) от всех треугольников поверхности сцены, чьи проекции на текстурную плоскость его пересекают. Процедура повторяется несколько раз со сдвигом текстурных координат вершин растеризуемых треугольников для сглаживания результирующей текстуры атласа.

4.1.4. Результаты

Предложенная схема построения карт освещенности с упаковкой их в атласы была опробована на виртуальных моделях размерности 1-3 млн. треугольников. Количество исходных текстур составляло до 10000, а создаваемых атласов – ~50 при разрешении каждого 2048x2048.

На приведенных рисунках представлен салон самолета Boeing. Практически все освещение салона – не прямое, поэтому расчет такой модели достаточно сложен и требует большого времени вычислений. На рис. 4.4 показана изначально рассчитанная карта освещенности, сохраненная в вершинах треугольников. На рис. 4.5 представлена визуализация полученного в результате экспорта VRML файла с упакованными в атласы текстурами. Для визуализации использовался VRML браузер Cortona [151].



Рис. 4.4. Изначальная рассчитанная карта освещенности салона Boeing.



Рис. 4.5. Карта освещенности в VRML формате с упакованными текстурами.

Из сравнения рисунков видно, что качество представления освещенности практически не ухудшилось. При этом генерация изображения методом обратной трассировки лучей требует ~47 минут (Intel Core2 Duo 1.2GHz, RAM 2Gb). В то же время полученный VRML файл может быть визуализирован в интерактивном режиме (несколько кадров в секунду), и пользователь может путешествовать по салону самолета в реальном времени.

4.2. Реалистичная визуализация когерентной трассировкой лучей

Ослабляя требование визуализации в реальном времени и переходя к классу интерактивной визуализации, мы уже можем говорить о построении изображения с помощью физически корректного метода трассировки лучей.

С ростом вычислительной мощности современных микропроцессоров трассировка лучей «в реальном времени» становится все более популярной в компьютерной графике. Существует два основных подхода к ее реализации: трассировка лучей на графических процессорах и применение ОКМД (SIMD) инструкций для когерентной трассировки.

Алгоритмы трассировки лучей на графических процессорах (GPU Ray Tracing) развиваются сейчас бурными темпами [154-156]. Однако недостаточная гибкость подсистемы памяти, отсутствие возможности выделять память динамически, отсутствие 64-битной адресации порождает много трудностей при реализации алгоритмов со сложными структурами данных, которые требуются для физически корректного моделирования распространения света [157]. В последнее время появились многообещающие работы, посвященные компрессии данных и возможностью трассировать большие сцены на GPU [158-159]. Несмотря на быстрое развитие технологии GPU Ray Tracing [160-163], она пока все еще не применима для создания универсального программного комплекса реалистичной визуализации, который должен работать с промышленными сценами, состоящими из миллионов объектов, поддерживать задание источников освещения в распространенных форматах (RaySet, IES, HDR1 панорамы), поддерживать сложные оптические свойства объектов.

Когерентная трассировка лучей (то есть трассировка нескольких когерентных лучей, выполняемая одновременно одним процессором) стала предметом научных исследований в последние годы. Практически все микропроцессоры поддерживают ОКМД (одна команда - много данных) или SIMD (Single Instruction Multiple Data) расширения, которые позволяют выполнять арифметические и логические действия над несколькими числами с плавающей запятой одновременно. Важным аспектом также является возможность поддержки ОКМД расширения для графических процессоров, что позволит использовать алгоритмы когерентной трассировки и в GPU.

Изначально различные процессоры имели разные SIMD расширения: Intel SSE (Streaming SIMD Extension), AMD 3DNow! и Motorola AltiVec. Из всех этих расширений именно Intel SSE стало широко применяться для реализации когерентной трассировки лучей. Также процессоры AMD стали поддерживать SSE, а компьютеры Apple стали использовать процессоры Intel. Таким образом, SSE получило наибольшее распространение и стало фактическим стандартом SIMD инструкций для персональных компьютеров. Поэтому далее термины когерентная, SIMD и SSE трассировка лучей будут использоваться как синонимы.

Наиболее известным проектом SSE трассировки лучей является проект института Макса Планка [142], который использует SSE для интерактивной трассировки лучей. Среди других проектов можно назвать проект Manta – интерактивный трассировщик лучей с открытым исходным кодом, созданный для визуализации огромных моделей на суперкомпьютерах с разделяемой памятью или многоядерных рабочих станциях [164].

Использование SSE инструкций существенно ускоряет процесс генерации изображений и приводит для некоторых сцен к интерактивной визуализации. Вычислительные затраты на трассировку лучей являются значительной, но не единственной частью при создании фотореалистичных изображений. Визуализация также включает моделирование рассеивающих свойств поверхностей и физически корректного освещения от сложных источников света. Для получения качественного изображения также необходимо использовать алгоритмы устранения лестничного эффекта и сжатия динамического диапазона яркостей, чтобы преобразовать радиометрические величины, в которых происходит моделирование, в цветовые значения, изображаемые графическим монитором.

Далее описаны алгоритмы, которые позволяют использовать SSE инструкции и получать ускорения расчетов до 3-4-х раз на всех стадиях визуализации: расчет освещенности, обработка сложных материалов и источников света и др.

4.2.1. Архитектура базовой системы визуализации

Физически корректная визуализация с помощью когерентной трассировки лучей была реализована на основе системы визуализации Inspirer2 [27, 34]. Эта система поддерживает как интерактивную визуализацию, описанную в разделе 4.1.1, так и построение высококачественных изображений в фоновом режиме. В действительности, и для интерактивного и для фоновом режиме визуализации использование SSE трассировки лучей дает свои преимущества. Фоновая, высококачественная визуализация может быть ускорена в 2 – 3 раза, поскольку с помощью SSE команд можно трассировать 4 когерентных луча одновременно. В отношении интерактивной визуализации SSE трассировка луча может быть использована в гибридном подходе, обеспечивая физически корректные отражения и преломления поверх OpenGL изображения.

Общая архитектура системы Inspirer2 представлена на рис. 4.6.

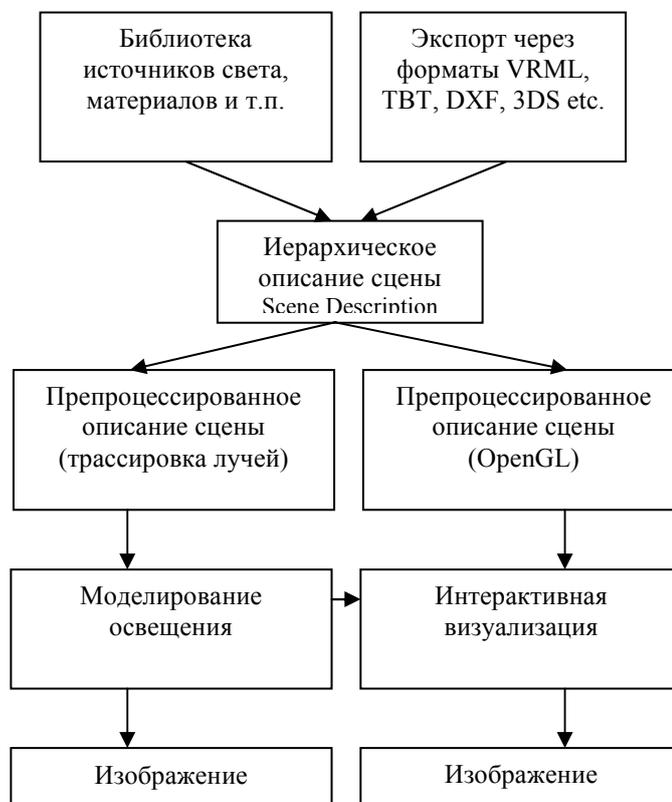


Рис 4.6. Архитектура системы Inspirer2.

С одной стороны она удовлетворяет требованию единого задания сцены в физических величинах, а с другой обеспечивает разное внутреннее представление для различных режимов визуализации. Иерархическое описание физических атрибутов сцены преобразуется в два препроцессированных описания сцены: одно для OpenGL визуализации, а другое для трассировки лучей (включая трассировку методом Монте-Карло). Такое архитектурное решение облегчает процесс интеграции нового режима когерентной трассировки, поскольку позволяет добавить его, разработав свое внутреннее представление.

Когерентная трассировка лучей, как и другие компоненты системы, были реализованы на языке C++. Ассемблер не использовался. Для того чтобы использовать SSE функциональность, были разработаны классы, которые представляют высокоуровневую оболочку над SSE интринсиками (специальными функциями, которые транслируются компилятором в SSE код), поддерживаемыми Microsoft/Intel C++ компиляторами. Поскольку современные компиляторы способны оптимизировать высокоуровневый код достаточно эффективно, то это не должно являться причиной большой потери производительности, в то время как значительно облегчается будущая поддержка написанного кода.

4.2.2. Когерентная трассировка лучей

Трассировка лучей обычно рассматривается как наиболее затратная по времени часть любого физически корректного алгоритма визуализации. По оценке Whitted время, затрачиваемое на трассировку лучей, составляет 95% общего времени визуализации [3]. Для физически корректного моделирования относительное время трассировки меньше, и составляет около 65 – 75%, согласно моим оценкам [165]. Это ставит важность SSE оптимизации трассировки лучей на первое место.

SSE операции выполняются над четырьмя 32-битными числами с плавающей запятой одновременно. Таким образом, SSE трассировка лучей позволяет трассировать четыре луча параллельно. Относительно однолучевой трассировки алгоритм принципиально не изменяется. Для ускорения трассировки использовался метод представления пространства в виде бинарного BSP дерева (binary space partition). Таким образом, алгоритм трассировки луча состоит из фазы прохождения по дереву и фазы нахождения пересечений луча с объектами сцены, находящимися в выбранном подпространстве. Для построения BSP дерева использовался алгоритм, описанный в работе [166].

Четыре луча, трассируемые одновременно благодаря SSE, могут проходить различные ветви дерева в алгоритме трассировки лучей. По существу, это означает, что необходима временная блокировка нескольких лучей из четверки. Для этого используется маска активных лучей. Обычно, это SSE переменная (четверка 32-битных чисел с плавающей запятой), которая содержит либо $0x00000000$, либо $0xffffffff$ (в двоичном представлении) в каждой из четырех позиций. Маска блокирует лучи, которые не проходят через текущую ветвь BSP дерева, и те, для которых первое пересечение уже найдено. Маскирование – это широко используемый прием в SSE программировании, который уменьшает ветвление и позволяет сделать алгоритм более потоковым. Проиллюстрируем его на простом примере [157]. В примере алгоритм вычисления функции $y(x)$ зависит от знака x (рис. 4.7). Поэтому создается маска 0 для $x \leq 0$ и маска 1 для $x > 0$. Для всех четырех аргументов выполняется как операция $x + 1$, так и $2x$. С помощью маски результат совмещается. Серым цветом показана холостая работа.

$$y = \begin{cases} x + 1, & \text{если } x > 0; \\ 2x, & \text{если } x \leq 0; \end{cases}$$

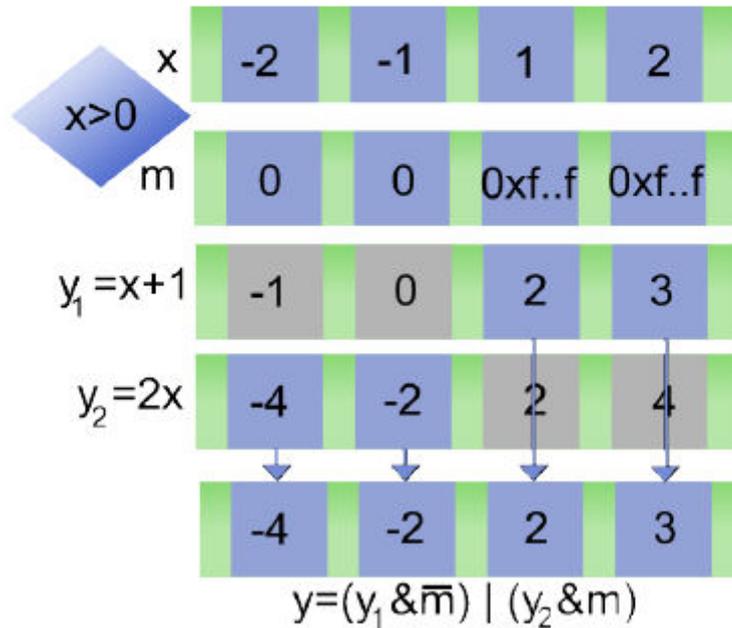


Рис. 4.7. Пример маскирования при SSE реализации функции, зависящей от входных данных.

Когерентный алгоритм трассировки лучей выполняется следующим образом. Во-первых, все лучи проверяются на пересечение с боксом сцены. Если все лучи не пересекают его, то алгоритм немедленно сообщает, что пересечений нет. Если некоторые лучи пересекают сцену, то маска лучей обновляется, и лучи, не пересекающие бокс сцены, исключаются ею. Затем алгоритм начинает прохождение по BSP дереву. Если лучи имеют различные знаки в векторе направления, то они могут проходить узлы дерева в разном порядке. Тогда группа лучей делится на подгруппы с одинаковыми знаками в векторе направления (когерентные подгруппы). Это несколько снижает эффективность от использования SSE, но такие случаи бывают достаточно редко. Более того, лучи, которые имеют одно начало, например, лучи из камеры или теневые лучи от точечного источника света, всегда имеют одинаковый порядок прохождения узлов дерева.

После разделения лучей на когерентные группы алгоритм устанавливает маску для текущих лучей и начинает трассирование BSP дерева. Для каждого не листового узла алгоритм прохождения BSP выполняется следующим образом. Если все лучи идут в один подузел (только в правый или только в левый), то алгоритм лишь обновляет адрес текущего узла и фактически переходит в этот подузел. Если некоторые из лучей проходят через оба подузла, то дальний узел записывается в стек, маска активных лучей обновляется, и алгоритм идет в ближайший подузел. Заметим, что благодаря тому, что лучи разбиты на группы, ситуации, когда лучи проходят узлы в разном порядке, не воспроизводятся. При достижении листового узла дерева выполняется пересечение луча с объектом, представленным треугольниками.

Для определения пересечения луча с треугольником используется модифицированный барицентрический проекционный алгоритм (тест), реализованный на SSE, как описано в [142]. После тестирования всех объектов в узле, те лучи, для которых пересечение найдено, деактивируются, поскольку они не нуждаются в дальнейшем прохождении по дереву. Если все объекты в листовом узле первого уровня были протестированы, то эти пересечения являются *первыми пересечениями* для этих лучей. Схема в реальности имеет два метода пересечения. Первый метод, который находит только первое пересечение лучей, описан выше. Другой находит *все пересечения* до первого непрозрачного объекта. Он работает также как и первый за исключением того, что лучи, которые столкнулись с прозрачным объектом, не маскируются немедленно, а продолжают трассироваться до столкновения с первым непрозрачным объектом.

4.2.3. Оптические свойства материалов и ДФО

Поскольку когерентная трассировка лучей дает ускорение в 2-3 раза в сравнении с обычными алгоритмами трассировки, другие части алгоритма физически корректной визуализации становятся узким местом

производительности. Как отмечалось ранее, время, затрачиваемое на трассировку лучей, составляет порядка 70% от общего времени визуализации. Использование SSE ускоряет трассировку лучей в среднем примерно в 3.5 раза, следовательно, общее время генерации изображения сокращается примерно наполовину. Поэтому необходимо также ускорить остальные компоненты алгоритма визуализации.

С такой же проблемой встречались и другие разработчики когерентной трассировки. Так в [167] авторы отмечают, что после реализации SSE трассировки вычисление затенения фактически стало узким местом. По их мнению, даже простая модель Фонга может заметно замедлить визуализацию, не говоря уже о включении более сложных двунаправленных функций отражения (ДФО). Поэтому необходимо было реализовать когерентную обработку материалов и ДФО.

Физически корректная спецификация материалов в программном комплексе, разработанном в отделе компьютерной графики ИПМ, обычно состоит из следующих компонент:

1. Простого набора атрибутов материала, представимого моделью Фонга [83].
2. Атрибутов зеркального отражения и преломления.
3. Текстур.
4. ДФО материала.

Первые две позиции могут быть явно реализованы на SSE. Расчет освещения требует трассировки теневых, отраженных и преломленных лучей, что легко осуществить с помощью эффективной SSE трассировки, описанной выше. Однако текстурирование и поддержка ДФО не так легко реализуется на SSE. Аспекты их реализации описаны ниже.

Текстура (двумерная матрица цвета) накладывается на поверхность объекта сцены для изменения его внешнего облика. Текстуры принадлежат материалам, а материалы приписываются треугольникам, из которых состоят объекты. Текстурное отображение осуществляется с помощью текстурных

координат, заданных для каждой вершины треугольника, содержащего текстурированный материал. Для вычисления текстурных координат в точках столкновения четверки лучей с треугольником используются барицентрические координаты, полученные в процедуре пересечения лучей с треугольником. С их помощью текстурные координаты могут быть проинтерполированы. Это легко сделать с помощью SSE для четырех точек одновременно, если они принадлежат одному треугольнику. Если точки принадлежат разным треугольникам, то интерполяция выполняется за несколько проходов с маскированием неактивных точек. Далее интерполируются текстурные значения.

Поддержка сложных свойств материалов критична для физически корректной визуализации. Поэтому в программном комплексе используется ДФО в самом общем, табличном представлении (см. гл. 2). ДФО параметризуется на основе углового описания направлений освещения и наблюдения. В зависимости от числа углов, использованных в параметризации, ДФО бывает 3-х и 4-х мерными. Трехмерные часто называют изотропными, а четырехмерные – анизотропными. Поскольку ДФО могут иметь особенности, они не могут быть табулированы регулярно из-за больших требований по памяти. Поэтому для нахождения ячейки, в которой будет осуществляться интерполяция, применяется бинарный поиск.

Алгоритм вычисления ДФО состоит из вычисления углов лучей падения и наблюдения с помощью обратных тригонометрических функций. Затем выполняется бинарный поиск, для того чтобы определить интерполяционную ячейку. Внутри ячейки значения ДФО интерполируются для данных направлений лучей.

Для того чтобы эффективно реализовать все вышеописанное с использованием SSE, были разработаны алгоритмы когерентного бинарного поиска для четырех значений одновременно и аппроксимации вычисления обратных тригонометрических функций. А интерполяция внутри ячейки явно реализуется на SSE. Подробное описание подхода приведено в [168]. На рис.

4.8 показан пример визуализации сцены, содержащей материал (краска автомобиля), описываемый с помощью ДФО, с использованием SSE.



Рис 4.8. Визуализация оптически сложного материала, описываемого ДФО.

В табл. 4.1 приведены результаты сравнения производительности SSE реализации ДФО на примере анизотропной ДФО размером 17 x 7 x 17 x 13. Сравнение производилось на компьютере Intel Centrino 1800 MHz Mobile Pentium-IV CPU с 512 MB RAM.

Количество вызовов	100000	200000	400000
Без SSE (сек.)	0.137	0.248	0.495
SSE (сек.)	0.040	0.078	0.156
Ускорение	3.43	3.17	3.17

Таблица 4.1. Сравнение производительности реализации анизотропной ДФО с использованием SSE и без него.

Таким образом, было получено ускорение около 3.2 раза в среднем, что меньше 4, поскольку вычисление ДФО содержит множество ветвлений, которые снижают эффективность использования SSE. Важно отметить, что одновременно обрабатывается только один материал. Если четверка лучей попадает не в один и тот же материал, а в разные, то различные материалы

обрабатываются по очереди. При этом ненужные в данный момент лучи маскируются.

4.2.4. Источники света

Для того чтобы когерентная реализация физически корректной визуализации была достаточно эффективной, освещение должно быть реализовано с помощью SSE инструкций. Термин “освещение” здесь обозначает процесс вычисления падающей интенсивности света в данной точке без учета видимости от источника. Видимость может быть реализована с помощью описанной выше процедуры SSE трассировки для теневых лучей.

Для простых источников реализация когерентного освещения осуществляется непосредственно. Как и для материалов, алгоритм работает одновременно только с одним источником света. Если по какой-то причине (например, источник находится с другой стороны треугольника), освещение не нужно вычислять для некоторых лучей, то они маскируются.

Поскольку для большинства источников света выполняются достаточно простые вычисления, то те же вычисления теперь выполняются над четверками лучей. Ситуация усложняется с точечными источниками света, которые имеют гониограммы. Интенсивность источника света с гониограммой табулирована двумерной нерегулярной таблицей, чем похожа на ДФО. Для того чтобы определить интенсивность для определенного направления, во-первых, необходимо вычислить сферические координаты, во-вторых, определить ячейку, которой принадлежит текущее направление, и проинтерполировать интенсивность внутри найденной ячейки. Эти шаги в точности повторяют то, что необходимо сделать для вычисления ДФО. Фактически, оба алгоритма используют несколько общих функций.

Производительность когерентной реализации была измерена для различных видов источников света. Обе реализации (SSE и без SSE) имеют достаточно высокую точность, поэтому изображения, полученные обоими подходами, практически неотличимы. В табл. 4.2 приведены оценки

эффективности SSE реализации некоторых источников света. Сравнение проводилось на компьютере Pentium 4, 2.8 GHz, 1 GB 433MHz RAM.

Тип источника света	без SSE (сек)	с SSE (сек)	Ускорение
Равномерно направленный	1.137	0.157	7.24
Конический	0.816	0.211	3.87
Параллельный	0.444	0.103	4.31
Линейный	6.696	1.149	5.83
Прямоугольный	145.25	24.375	5.96
С гониограммой	2.573	0.588	4.38

Таблица 4.2. Сравнение реализаций источников света без SSE и с SSE.

Как можно заметить, для большинства источников света ускорение превысило 4. Только конический источник получил чуть меньшее ускорение. Также источник света с гониограммой получил меньшее ускорение, чем, например, равномерно направленный, потому что гониограмма требует бинарного поиска, в котором возникает некогерентность данных.

4.2.5. Оператор сжатия динамического диапазона яркости

Физически корректная визуализация невозможна без оператора сжатия динамического диапазона. Эта необходимость возникает из-за того, что изображение, полученное в результате моделирования, представлено в радиометрических единицах в диапазоне $[0, \infty)$, а монитор обладает ограниченным динамическим диапазоном. Возникает задача сжимающего отображения с сохранением большинства важных деталей.

Использовался метод, который описан в работах [23, 150]. Главной сложностью с SSE реализацией этого алгоритма является вычисление степенной функции x^y , которая может быть представлена с помощью функций логарифма и экспоненты.

$$x^y = 2^{y \log_2 x}$$

Двоичный логарифм от числа с плавающей запятой можно представить как сумму: логарифм от мантиссы и порядок, которые легко получить с помощью битовых операций. Логарифм мантиссы аппроксимируется полиномом. Подобная идея используется и для вычисления экспоненты. Сначала экспонента приводится к основанию 2, а затем представляется в виде $2^x = 2^{\lfloor x \rfloor} 2^{x - \lfloor x \rfloor}$, где $\lfloor x \rfloor$ – это целая часть числа. Первый множитель вычисляется двоичным сдвигом, а второй аппроксимируется полиномом. При этом заметного ускорения в вычислении степенной функции, логарифма и экспоненты можно достичь только с использованием инструкций SSE2, которые позволяют выполнять целочисленные команды одновременно над четверками чисел, при этом данные все время остаются в SSE регистрах.

4.2.6. Результаты

Алгоритмы, описанные выше, были реализованы на языке C++ в среде разработки Visual Studio 2003. Для SSE команд ассемблер не использовался. Доступ к SSE инструкциям осуществлялся через интринсики (intrinsics), которые, в свою очередь, были обернуты в классы-оболочки. Такой подход позволил обеспечить хорошую сопровождаемость кода ценой незначительной потери производительности.

В табл. 4.3 приведены результаты сравнения скорости визуализации с включенным и выключенным SSE режимом для сцен VW Polo (рис. 4.8), Lexus и Cockpit, показанные на рис. 4.9. Сравнение производилось на компьютере Intel Core2 Quad 2.5 GHz. Изображения строились в разрешении 1024 x 768 пикселей. Глубина трассировки обозначает максимальную высоту дерева лучей, т.е. глубина 0 соответствует только лучам из камеры, глубина 1 – одному отражению (или преломлению) и т.д. Сцена VW Polo содержит измеренную табулированную ДФО. Сцены Lexus и Cockpit содержат текстурированные поверхности.



Рис. 4.9. Сцены Lexus и Cockpit, использованные для сравнения скорости визуализации.

Сцена	Cockpit	Lexus	VW Polo
Количество треугольников	291 К	725 К	198 К
Количество источников	4	4	2
Глубина трассировки	3	5	2
Ускорение (раз)	2.3	3.1	2.6
Время без SSE (сек.)	4.7	4.9	1.5
Время с SSE (сек.)	2.0	1.6	0.6

Таблица 4.3. Сравнение скорости визуализации.

Достигнутая скорость визуализации меньше 2 секунд на кадр для производственных сцен является для многих приложений уже вполне приемлемой, позволяющей пользователю системы реалистичной визуализации рассматривать, передвигать объект дизайна в интерактивном режиме. Уменьшение разрешения изображения, глубины трассировки или количества источников света позволяет достичь и более высокой скорости визуализации. Однако уменьшения параметров трассировки или объектов сцены может сказаться на реалистичности изображения.

В итоге алгоритмы физически корректной когерентной визуализации ускоряют генерацию изображения более чем в 2.5-3 раза. Ускорение было достигнуто в основном за счет использования SSE инструкций, которые

могут дать ускорение до 4 раз в случае полной когерентности. Значительно повлияли на ускорение тщательный подбор алгоритмов и структур данных, а также усилия по оптимизации кода.

Ускорение трассировки лучей с использованием ОКМД инструкций (SSE трассировка лучей) является перспективным направлением. Примерно через год после выхода нашей статьи в журнале «Программирование» [34] Intel Software Network опубликовала статью о SSE трассировке [169]. Однако статья Intel целиком посвящена алгоритмам ускорения трассировки лучей и не касается таких аспектов, как ускорение обработки источников освещения, текстур, ДФО поверхностей и др.

4.3. Длительная генерация изображения

Любое время генерации изображения, превышающее несколько секунд, уже может быть названо достаточно длительным в зависимости от ожиданий пользователя. Здесь выделяются два класса скорости визуализации: приемлемое время отклика и построение изображения в фоновом режиме. Отличительной чертой этих классов можно считать то, что ресурсозатратный расчет глобальной освещенности производится не заранее (т.е. время визуализации не содержит расчет освещенности), как это было для реального времени и интерактивной визуализации, а в процессе построения изображения. Это дает возможность от изображения к изображению менять условия освещения сцены.

4.3.1. Интернет-приложение построения реалистичного изображения

Термин «приемлемое время отклика» был введен в проекте разработки Интернет-сервиса построения реалистичного изображения, время было ограничено одной минутой (в крайнем случае – двумя минутами). Этот термин означал, что данное время пользователь сервиса еще готов ждать

реакции системы на свою команду. Если для генерации изображения требуется больше времени, то тогда надо это делать в фоновом режиме, и дать возможность пользователю заниматься другими задачами.

В настоящее время широко распространена практика представления продуктов, изделий, технологий на сайтах Интернет. Как правило, на таких сайтах размещают не только текст, но и обширные галереи изображений и/или мультимедийных данных, что позволяет показать свойства, которые трудно передать в вербальной форме (стиль, эстетичность, эргономичность и т.п.). Посетитель сайта может вращать изображения, осматривая модель со всех сторон при различных опциях цвета корпуса, внутренней отделки, съемных элементов. Пример презентации светодизайна можно найти на сайте [170], где показаны возможности лаборатории Тринова по светотехническому дизайну помещений. Изображения в разделе «Проектирование» получены на основе моделирования освещенности в сценах, представляющих помещения или целые здания при заданных условиях освещения.

В упомянутых презентациях, как и на других Web-страницах подобного рода, обычно используются подготовленные заранее высококачественные фотографии или изображения, полученные в результате моделирования. Очевидно, презентации можно было бы сделать более содержательными и информативными, если предоставить средства для динамического моделирования и синтеза изображений при заданных пользователем условиях освещения, опций отделки изделий и др.

Для достижения этой цели был реализован программный комплекс, предназначенный для разработки Интернет-приложений компьютерной (машинной) графики, позволяющий синтезировать реалистичные изображения. Программный комплекс, получивший название LKernel (Lighting Kernel), был разработан в отделе компьютерной графики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [1, 2, 25, 26]. Приложения на основе этого программного комплекса позволяют создавать активные Интернет-презентации, где

посетитель сайта сам может выбирать всевозможные опции визуализации, моделировать сцену, а соответствующие изображения синтезируются в процессе сеанса работы в Интернете. Одно из естественных приложений программного комплекса – это средство предоставления Интернет-сервисов дизайна интерьеров или светотехнического проектирования.

Ключевым требованием, предъявляемым к подобному программному комплексу, является то, что генерируемые изображения должны быть получены в результате физически корректного моделирования распространения света, включая расчет глобальной освещенности. 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, программных решений.

Приложение компьютерной графики для генерации реалистичного изображения выполняется в глобальной распределенной среде, включающей компьютер пользователя и компьютер (или несколько компьютеров) на сайте, который предоставляет приложение. Для того чтобы обеспечить возможность работы с максимальным числом пользователей необходимо учитывать, что доступные вычислительные ресурсы на компьютере пользователя могут быть ограничены, а скорость сетевого обмена с ним – не слишком высокой. Более того, в последнее время получили большое распространение планшеты, не предназначенные для вычислений, однако являющиеся удобным устройством для выхода в Интернет. Поэтому было принято решение о том, что ресурсоемкие вычисления, связанные с моделированием освещенности и синтезом изображений, должны выполняться на компьютерном кластере сайта, предоставляющего приложение. На нем также хранятся данные сцен, представление которых

может включать сотни тысяч и даже миллионы объектов. Архитектура этого решения представлена на рис. 4.10.

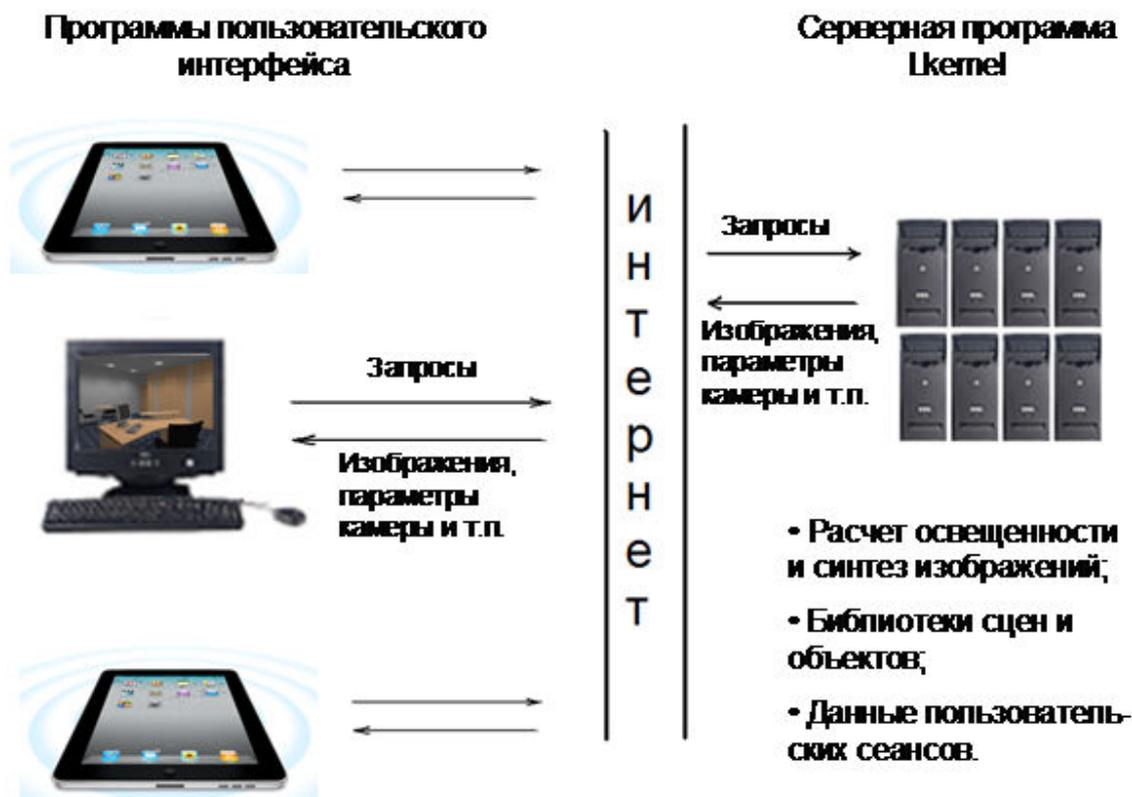


Рис. 4.10. Организация Интернет-приложения для синтеза реалистичных изображений.

На компьютере пользователя работает программа, выполняющая функции графического интерфейса и отображения сцены. Для выполнения содержательных действий, связанных с редактированием сцен, моделированием освещенности и синтезом изображений, эта программа посылает запросы вычислительному компоненту, выполняющемуся на сервере сайта. В ответ на запросы пользователей серверный компонент возвращает структуры и изображения, представляющие библиотеки сцен, результаты действий редактирования, текущие параметры камеры и т.п. Серверный компонент выполняет моделирование освещенности, синтез

изображений, поддерживает одновременную работу нескольких пользователей и обеспечивает размещение данных, ассоциированных с множеством текущих сеансов. В состав комплекса входит также минимальный инструментарий администрирования.

Компоненты, реализующие пользовательский интерфейс приложений, могут создаваться независимыми группами разработчиков на основе формальной спецификации интерфейса серверного компонента. Пользовательский интерфейс приложений проектируется и реализуется в соответствии с потребностями компании или организации, которую представляет данный сайт, а также общим стилем оформления данного сайта.

Подробное описание интерфейсов, функциональности, возможностей администрирования серверного компонента приведено в [26, 150].

4.3.2. Методы достижения приемлемого времени отклика

К началу работы над проектом метод детерминистической трассировки лучей для генерации изображений был уже достаточно хорошо оптимизирован. Поэтому в данном проекте основной задачей стало ускорение расчета глобальной освещенности, ресурсоемкость которого существенно выше, чем построения изображений трассировкой лучей.

Главной причиной необходимости большого объема вычислений при расчете глобальной освещенности является стохастический шум, присущий всем Монте-Карло алгоритмам. Поскольку освещенность в основном является гладкой функцией, для которой шум хорошо заметен, то получение качественных изображений невозможно без избавления от него. Стандартное решение проблемы при использовании алгоритмов Монте-Карло с псевдослучайной числовой последовательностью – увеличение времени вычислений до тех пор, пока достигнутая точность метода не станет достаточно высокой, и шум не исчезнет. Однако время вычислений в таком случае возрастает и становится неприемлемым.

Поэтому для ускорения расчета глобальной освещенности использование псевдослучайной числовой последовательности было заменено на использование квазислучайных выборок. Преимущество квази-Монте-Карло метода заключается в значительно меньшем стохастическом шуме, а также, при определенных условиях, более высокой скорости сходимости. Подробнее вычисление глобальной освещенности методом квази- Монте-Карло описано в работах [14, 157].

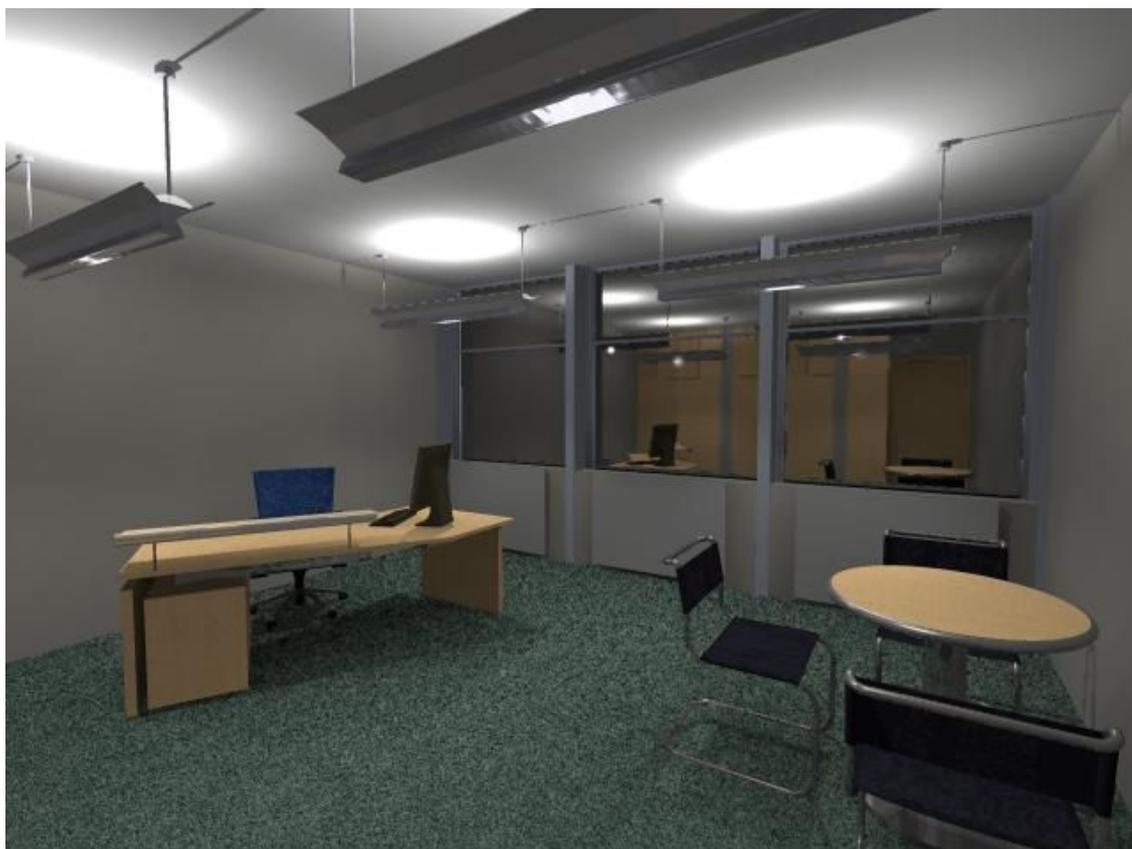


Рис. 4.11. Сцена Office

На ранних стадиях работы над проектом был проведен ряд измерений, направленных на оценку эффективности распараллеливания вычислений, а также предполагаемых к использованию методов оптимизации, о которых рассказано далее. Результаты этих измерений приведены ниже в этом разделе. Сцены, использованные при измерениях и показанные на рис. 4.11 и 4.12, были предоставлены фирмой-производителем осветительных приборов Zumtobel, Австрия.



Рис. 4.12. Сцена Montage

В таблице 4.4 приведены результаты измерений, демонстрирующих ускорение вычислений, достигнутое за счет использования квази-случайных выборок вместо псевдослучайных последовательностей при расчете освещенности методом Монте-Карло. Измерения проводились для сцен Office и Montage с различными значениями итоговой точности. Время вычислений указано в секундах.

Сцена	Точность (%)	T_{MC}	T_{QMC}	Ускорение (раз)
Office	97	332.164	224.057	1.48
Office	98	757.918	486.441	1.56
Montage	97	54.202	32.624	1.66
Montage	98	135.731	70.717	1.92
Montage	99	972.882	243.072	4.00

Таблица 4.4. Сравнение времени вычислений при использовании псевдослучайных последовательностей (T_{MC}) и квази-случайных выборок (T_{QMC}) в расчетах глобальной освещенности методом Монте-Карло.

Другим способом ускорения расчета глобальной освещенности, разработанным в данном проекте, стало исключение первичных лучей из процесса трассировки лучей методом Монте-Карло. Трассировка первичных лучей была заменена на детерминистический расчет прямой освещенности. При этом строятся дополнительные карты прямой освещенности, которые потом используются и как вторичный источник света для дальнейшего его моделирования методом Монте-Карло, и для визуализации сцены. В итоге суммарное время, необходимое для создания изображения, уменьшается. Эффективность этого способа сильно зависит от освещенности сцены. Ускорение вычислений в сравнении с квази- Монте-Карло методом может составлять как всего несколько процентов (ускорение порядка 12% было достигнуто для сцены Office), так и несколько раз (ускорение в 2,5 раза было достигнуто для сцены Montage).

Кроме алгоритмических методов для максимального ускорения синтеза изображений и расчета глобальной освещенности были также реализованы параллельные вычисления. Идея параллельной реализации алгоритма обратной трассировки, применяемого для генерации изображений, основана на том, что значения яркости отдельных пикселей могут вычисляться независимо. Экран адаптивно разделяется на несколько непересекающихся регионов так, чтобы обеспечивалась равномерная загрузка процессоров. Каждый процессор выполняет трассировку для заданных регионов, исполняя последовательную версию алгоритма. Завершенные фрагменты объединяются в итоговое изображение. Параллельная реализация прямой трассировки при расчете глобальной освещенности основана на том, что трассировка каждого луча может проводиться независимо. Более подробную информацию об используемых методах распараллеливания можно найти в работах [171-174].

Измерения, проведенные для расчета глобальной освещенности с использованием многопроцессорных и многомашинных конфигураций,

показывают, что оба вида параллелизма (multithreading и распределенные вычисления) позволяют достичь существенного ускорения вычислений, а их реализации обладают хорошими показателями масштабируемости [26, 150, 174]. Общая эффективность ускорения является результатом компромисса при использовании алгоритмических (квази- Монте-Карло, исключение первичных лучей) и аппаратных методов.

На рис. 4.13 показано ускорение вычисления глобальной освещенности, достигнутое для тестовых сцен.

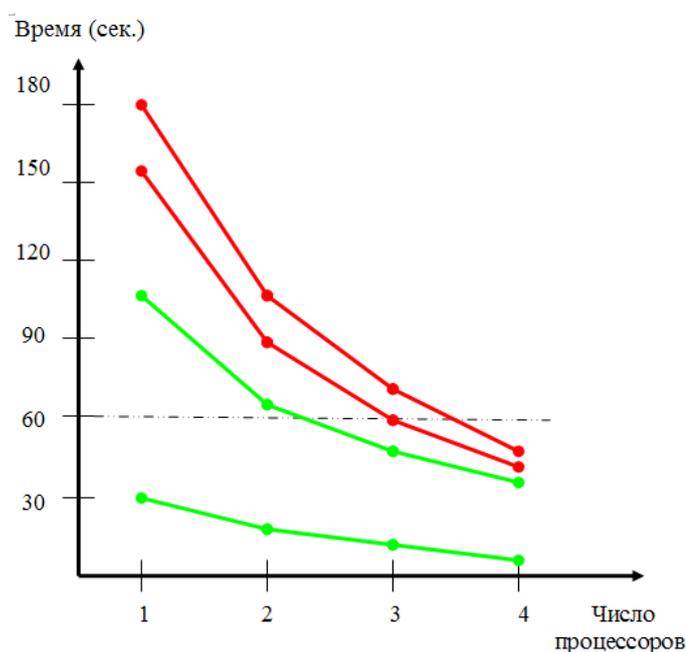


Рис. 4.13. Ускорение вычисления глобальной освещенности (красные графики – сцена Office, зеленые – Montage).

Красные графики соответствуют сцене Office с двумя различными условиями освещения. Зеленые графики соответствуют сцене Montage также с двумя различными условиями освещения. В результате время вычисления менее одной минуты достигается уже для четырех процессоров.

Таким образом, разработанные методы ускорения вычислений (как алгоритмические, так и аппаратные) были реализованы достаточно эффективно. Они позволили довести время расчета освещенности для достаточно сложных фиксированных сцен до десятков секунд, а в отдельных случаях - даже до нескольких секунд. Такие времена можно считать

приемлемыми для Интернет-приложений, синтезирующих реалистичные изображения на основе физически корректного моделирования освещенности.

Приложения на базе данного комплекса могут служить основой активных презентаций в Интернете, позволяющих пользователю конструировать виртуальную реальность, используя библиотечные сцены, объекты и источники света, и получать ее изображения. Также приложения, основанные на ядре Lkernel, могут применяться для предоставления Интернет-сервисов дизайна интерьеров или светотехнического проектирования.

4.3.3. Генерация реалистичного изображения в фоновом режиме

К сожалению, не всегда мы можем получить изображения высокого качества за приемлемое время отклика. Сцены могут быть настолько сложными, что расчет глобальной освещенности потребует десятков часов. В этом случае расчет должен проводиться в фоновом режиме. Для таких долгих вычислений важным становится прогнозирование времени окончания расчета. Зная, когда закончатся вычисления, пользователь может более эффективно планировать свое время, решать какими задачами ему заниматься в данное время.

При построении фотореалистичных изображений, эффективным является сочетание методов прямой Монте-Карло трассировки лучей, рассчитывающих распределение глобальной освещенности на объектах сцены, с методами обратной трассировки, суммирующих яркости объектов сцены с прямыми яркостями от источников света по трассе луча от наблюдателя в направлении сцены [12, 175]. При прямой Монте-Карло трассировке лучей энергия фотонов накапливается на объектах сцены в виде глобальной освещенности. Когда количество протрассированных лучей достаточно велико, можно говорить, что распределение световых характеристик с некоторой степенью точности соответствует реальности, и,

очевидно, чем больше лучей было использовано в трассировке, тем выше точность моделирования. Конечно, данная оценка точности моделирования является качественной и очень общей. Поэтому оценка точности моделирования является актуальной задачей физически корректного моделирования освещения сложных сцен. И от оценки точности мы можем перейти к прогнозированию времени, необходимого для достижения желаемой точности.

Вычисление глобальной освещенности осуществляется методом Монте-Карло и, как любой вероятностный метод, содержит стохастические ошибки вычисления. Также необходимо понимать, что световые характеристики вычисляются на элементах объектов сцены конечных размеров (в вершинах треугольной сетки, формирующей геометрию сцены, или в текстурных ячейках, привязанных к геометрии сцены). Поэтому точная оценка световых характеристик в заданных точках сцены невозможна. Оценка может быть сделана с точностью до размера области, в которой аккумулировался падающий свет. Таким образом, погрешность вычисления состоит из двух основных ошибок – ошибки «дискретизации» сцены, связанной с конечными размерами элементов сцены, и ошибки «сходимости», связанной со случайным процессом вычислений.

Ошибка «дискретизации» – это ошибка интерполяции освещенности в пределах элемента сцены, накапливающего световой поток. Каждый элемент сцены накапливает единственную величину, и, очевидно, чем больше элемент сцены, тем более проблематично осуществлять точное распределение этой величины в пределах элемента сцены. Поэтому для улучшения качества интерполяции этой величины используются соседние элементы, и чем меньше размер элемента сцены, тем более точно может быть восстановлена интерполяционная функция. Естественным условием уменьшения ошибки «дискретизации» является уменьшение элементов сцены, аккумулирующих падающих свет. Однако уменьшение элементов сцены при сохранении времени моделирования, как правило, приводит к

увеличению ошибки «сходимости». Поэтому оптимальным решением является адаптивное разбиение сцены, критерием которого будет сведение ошибок «дискретизации» и «сходимости» к одному значению.

Данная работа не рассматривает аспекты адаптивного разбиения сцены, и потому анализ ошибок «дискретизации» не производится. Предполагается, что размер элементов сцены достаточен для выполнения аккуратной интерполяции освещенности или яркости. Дальнейшая часть посвящена оценке точности расчета распределения освещенности на треугольной сетке, описывающей геометрию сцены, и прогнозированию времени окончания расчета.

Глобальная освещенность сцены является компонентом модели построения реалистического изображения сцены, и ее расчет требует высокого уровня точности. Поскольку термин «высокий» уровень точности не является количественной характеристикой, необходима методика оценки уровня точности, в рамках которой, можно было бы определить значение «высокого» уровня точности.

Для метода Монте-Карло ошибка «сходимости» может быть определена как дистанция между идеально правильной картой освещенности и вычисленной картой. Принимая во внимание, что размеры и форма треугольников, на которых и запоминаются карты освещенности, меняются по сцене, необходимо выполнить усреднение вычисленной дистанции по размеру сцены (суммарной площади всех треугольников сцены). Данная дистанция есть среднеквадратическое отклонение рассчитанного распределения глобальной освещенности от идеальной карты освещенности, и может служить оценкой ошибки вычислений. Выражение среднеквадратического отклонения имеет следующий вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int (E_0(x, y) - E(x, y))^2 dx dy}{S}},$$

где:

E_0 – идеальная карта освещенности,

E – карта освещенности, вычисленная методом Монте-Карло,
 S – суммарная площадь поверхности всех треугольников, на которых
была рассчитана карта освещенности.

Выражение имеет размерность освещенности на единицу площади.
Более удобным выражением для оценки среднеквадратического отклонения
может служить выражение данной оценки в относительных единицах. В
последнем случае абсолютное значение среднеквадратического отклонения
нормируется на среднее значение освещенности сцены. В качестве среднего
значения могут быть использованы как среднеквадратическое, так и
среднеарифметическое значения освещенности.

$$\sigma_{rel} = \frac{\sigma}{\langle E \rangle} \left\{ \begin{array}{l} \langle E \rangle = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^K E_i S_i \quad (\text{арифметическое усреднение}) \\ \langle E \rangle = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{i=1}^K E_i^2 S_i} \quad (\text{квадратическое усреднение}) \end{array} \right\}$$

где:

E_i – значение освещенности в i -ом треугольнике сцены,

S_i – площадь i -ого треугольника,

K – количество треугольников сцены.

Основным недостатком такого определения ошибки вычислений
является невозможность применения его на практике. Идеальная карта
освещенности неизвестна, она есть результат моделирования при
бесконечном времени вычисления. Поэтому в условиях реального
моделирования в качестве оценки идеальной карты освещенности
используется карта, вычисленная при других (независимых) начальных
значениях датчиков случайных чисел. Было принято решение использовать в
качестве двух независимых карт освещенности «четную» и «нечетную»
карты. Результаты трассировки четных лучей сохраняются в «четной» карте,
а результаты трассировки нечетных лучей – в «нечетной» карте. Глобальная
карта освещенности (яркости) есть карта, сформированная нечетными и
четными лучами.

При этом выражение для оценки погрешности вычисления глобальной освещенности примет следующий вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int (E_{\text{нечет}}(x, y) - E_{\text{чет}}(x, y))^2 dx dy}{S}},$$

где:

$E_{\text{нечет}}$ – карта освещенности, вычисленная для нечетных лучей,

$E_{\text{чет}}$ – карта освещенности, вычисленная для четных лучей.

Несмотря на простоту принятого решения (использовать «четные» и «нечетные» карты), оно показало себя достаточным для задач оценки точности моделирования освещенности. Это было проверено в результате тысяч вычислений, проведенных для реальных, производственных сцен.

4.3.4. Прогнозирование времени расчета, необходимого для достижения заданной точности вычислений

Для оценки необходимого времени моделирования можно использовать хорошо известную теоретическую зависимость [176]:

$$\sigma_{rel} \approx \frac{1}{\sqrt{t}}$$

Таким образом мы можем оценить прогнозируемое время, необходимое для достижения заданной точности. Очевидно, что высокая степень точности прогноза времени моделирования возможна при значительном количестве протрассированных лучей.

Алгоритмы оценки точности и прогнозирования времени моделирования не являются трудоемкими с точки зрения вычислительных ресурсов, поэтому оценка точности и прогноз могут вычисляться без видимой задержки времени моделирования.

Для управления вычислениями, задания критерия остановки, указания достигнутой оценки точности и прогнозирования времени вычислений был разработан специальный графический интерфейс (рис. 4.14). Интерактивный анализ точности вычислений включает в себя график зависимости точности

от времени вычислений (до настоящего времени это реальная зависимость, после настоящего времени – прогноз). На нем отображается значение достигнутой точности (цифра 2 на рис. 4.14), прошедшее время и количество протрассированных лучей (цифра 1), установленная пользователем желаемая точность (цифра 3) и прогнозируемое время для достижения заданной точности с прогнозируемым количеством лучей (цифра 4).

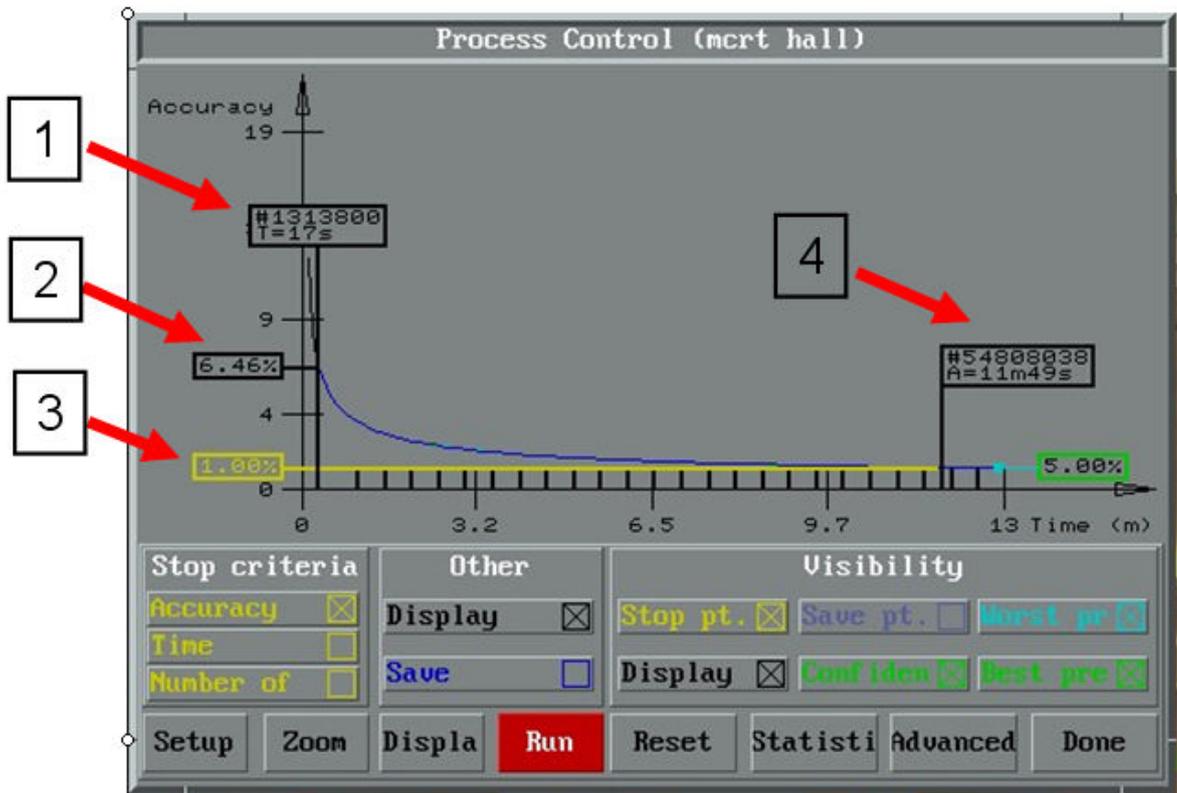


Рис. 4.14. График зависимости точности от времени вычислений с прогнозом необходимого времени для достижения заданной точности.

Рис. 4.14-4.15 демонстрируют прогресс вычисления глобальной освещенности интерьерной сцены. График прогнозируемого времени вычислений обновляется каждый раз по мере накопления новой порции данных. Начальный прогноз, сделанный через 17 секунд расчета (показанный на рис. 4.14), хотя и не является абсолютно точным (однопроцентное значение ошибки, показанное на рис. 4.15(б), достигается через 12 минут и 5 секунд, а не через 11 минут и 49 секунд, как прогнозировалось вначале), он достаточно достоверен.

Надо отметить, что прогноз времени вычисления достаточно точен с первых секунд (в пределах 2-3% от общего времени расчета), и по мере продолжения вычислений прогноз становится более достоверным. Так, предсказанное время для требуемого однопроцентного значения ошибки практически правильно показано на рис. 4.15(a), т.е. примерно через три с половиной минуты расчета.

Поскольку точность моделирования может оцениваться интерактивно, возможно использовать широкий спектр критериев окончания моделирования (по прошествии заданного времени, по достижению желаемой точности, по количеству выпущенных лучей). Кроме того, критерий окончания моделирования может быть установлен по достижению заданной точности вычисления глобальной освещенности, при этом точность может оцениваться как в абсолютных, так и в относительных величинах.

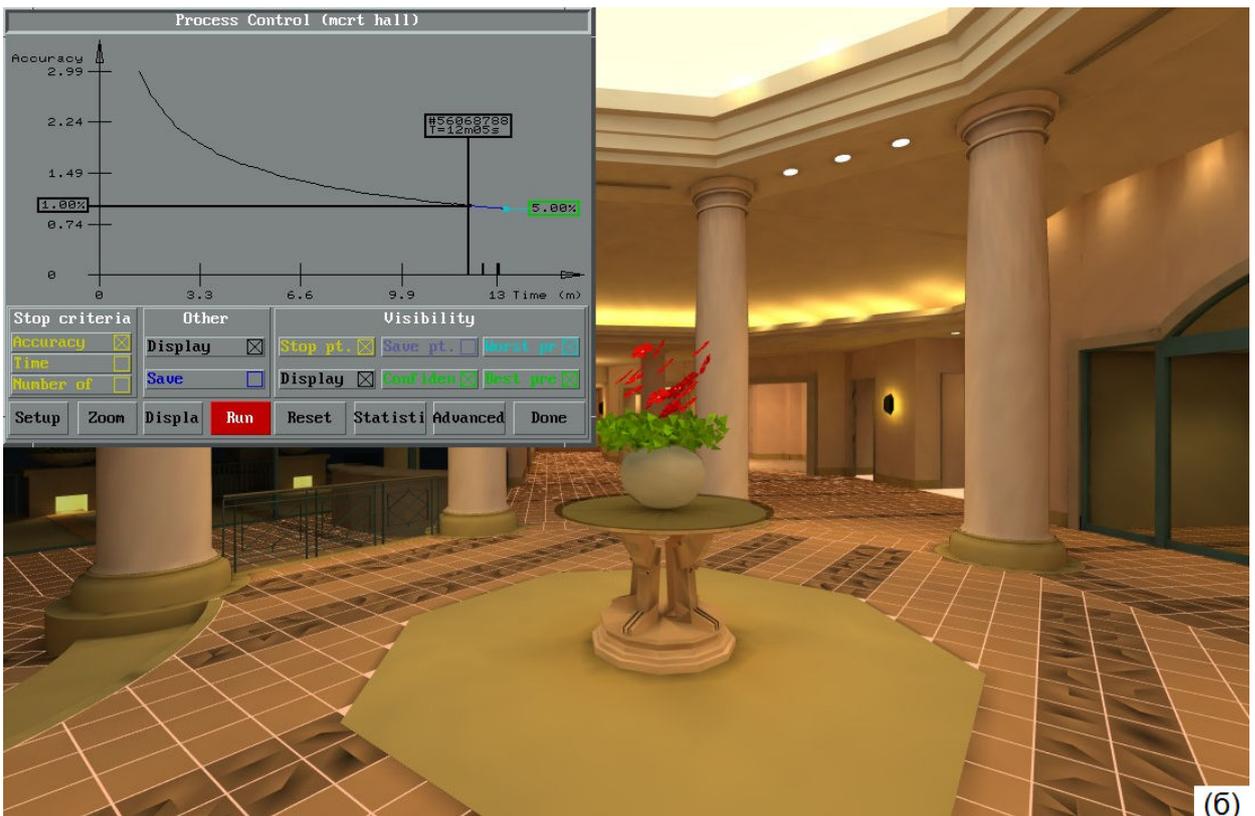
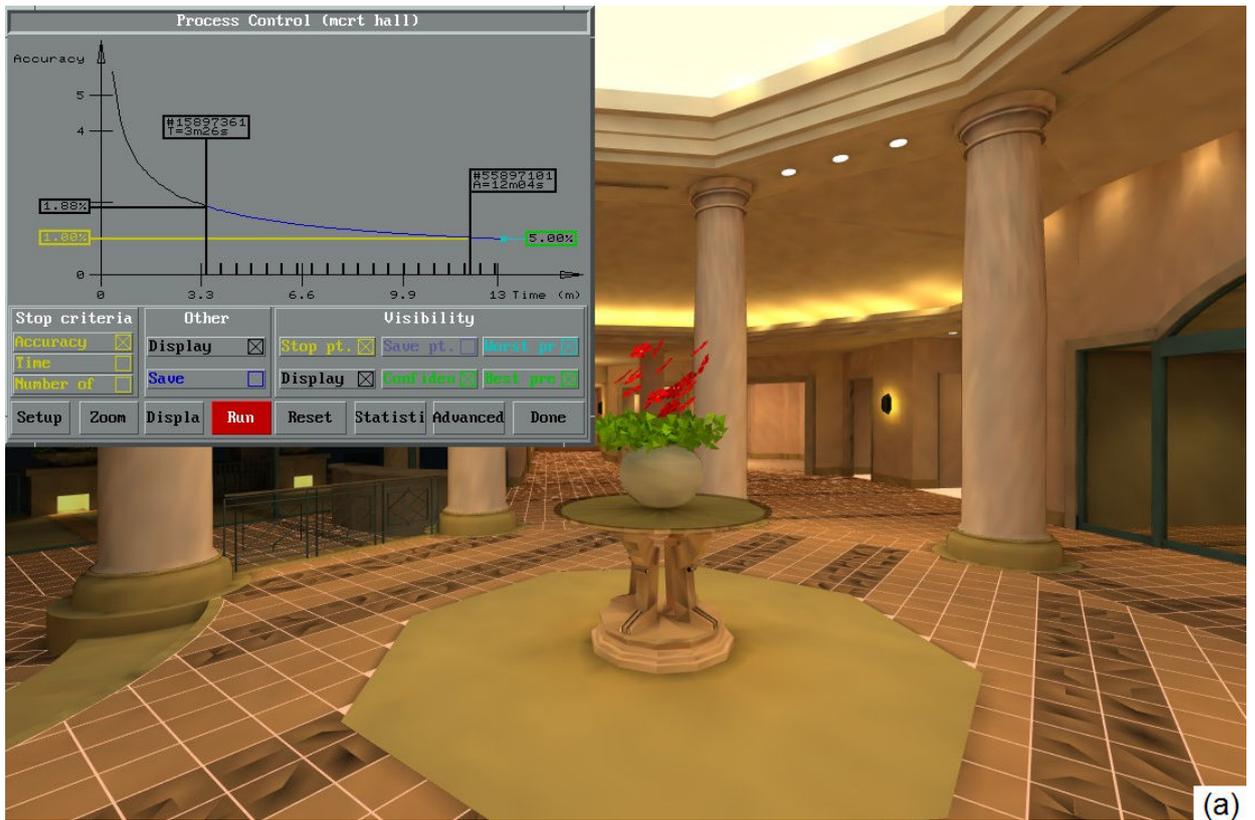


Рис. 4.15. Результаты моделирования, оценка точности и график прогнозируемого времени расчета через 3 минуты и 26 секунд расчета (а) и после окончания расчета (б).

4.3.5. Результаты

Длительное время вычислений предполагает ожидание пользователем генерации реалистичного изображения. Ожидание в течение пары минут еще может быть признанным приемлемым, особенно для предоставляемого через Интернет сервиса, где пользователь привык к ожиданию загрузки сайта, отклика на свои действия и т.д. В случае больших времен вычисления должны выполняться в фоновом режиме. Для длительных вычислений характерно включение расчета глобальной освещенности в общее время генерации изображения. Это дает возможность от изображения к изображению менять условия освещения, оптические свойства любых объектов сцены.

Специфика доступа конечных пользователей через Интернет, где особенно важно малое время отклика, потребовала реализации алгоритмов ускорения и усовершенствования средств параллелизма в программах расчета глобальной освещенности и визуализации. Разработанные методы ускорения вычислений (как алгоритмические, так и аппаратные) были реализованы достаточно эффективно. Они позволили довести время расчета освещенности для сложных фиксированных сцен до десятков секунд, а в отдельных случаях - даже до нескольких секунд. Такие времена можно считать приемлемыми для Интернет-приложений, предоставляющих синтез реалистичных изображений, основанный на физически корректном моделировании освещенности.

Алгоритмические и программные решения оценки точности вычисления глобального освещения и прогнозирования необходимого времени были интегрированы в программный комплекс Specter [177]. Программный комплекс Specter более пятнадцати лет применяется для моделирования промышленных моделей светопроводящих систем и больших (несколько миллионов объектов) архитектурных сцен. За этот период были проведены тысячи моделирований, в каждом из которых использовался

механизм оценки точности и прогнозирования времени окончания вычислений. Он показал себя достаточно надежным и удобным средством управления процессом вычислений.

4.4. Выводы

Скорость генерации реалистичного изображения напрямую влияет на производительность труда инженеров и дизайнеров. Интерактивные скорости визуализации позволяют им эффективно решать более широкий спектр задач и решать задачи более комплексно. Поэтому предъявляются все более высокие требования к минимизации времени визуализации без существенной потери качества изображения.

В последнее время повышение производительности современных компьютеров достигается с помощью эффективных архитектурных решений (многоядерность, ОКМД инструкции, GPGPU), а не простым увеличением тактовой частоты процессора, как это было порядка 10 лет назад. Это значит, что автоматического повышения скорости генерации изображений с покупкой нового процессора уже не происходит. С другой стороны традиционные алгоритмические подходы к ускорению синтеза реалистичных изображений методом трассировки лучей являются уже хорошо проработанными и устоявшимися. Практически ими уже нельзя получить значительного дальнейшего ускорения. Поэтому достижение существенного сокращения времени визуализации невозможно без учета современных решений компьютерной архитектуры.

В работе представлены как решения, позволяющие достичь интерактивной скорости визуализации, так и решения, позволяющие повысить производительность труда в случае длительных вычислений.

В свете интенсивного использования Интернета и появления компьютерных планшетов, как эффективного средства работы с Интернетом,

все более актуальными становятся решения построения реалистичных изображений через Интернет и визуализации результатов моделирования освещения через VRML формат (поддержку VRML формата для планшетов iPad анонсировали разработчики браузера Cartona). Эти решения требуют минимальных ресурсов от пользовательского компьютера.

Разработанные алгоритмы показали себя достаточно эффективными и используются в промышленном программном комплексе реалистичной визуализации. Алгоритмы каждого класса скорости визуализации, определенного в этой главе, применяются для разных пользовательских задач. Эти алгоритмы дополняют друг друга, например, сначала рассчитывается глобальная освещенность сцены, используя алгоритм предсказания времени окончания вычислений, а потом освещенность конвертируется в VRML формат, и исследуется в интерактивном режиме, используя VRML браузер.

Заключение

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Разработан комплекс программных технологий и методов, позволяющих автоматизировать процесс спецификации виртуальной сцены и исходных данных для моделирования распространения света в различных оптических средах и синтеза реалистичных изображений. Созданные технологии и алгоритмы позволяют существенно снизить трудоемкость процесса описания сцены. В результате появляется возможность эффективно задавать физически корректные оптические характеристики поверхностей и материалов, источников освещения, окружающей обстановки для их использования в приложениях компьютерной графики и визуализации.
2. Разработаны теоретические основы повышения производительности реалистичной визуализации. Предложены эффективные подходы, методы и алгоритмы, значительно ускоряющие процесс генерации реалистичных изображений. Они, в частности, позволяют визуализировать сложные производственные виртуальные модели и сцены в интерактивном режиме с использованием обычных бытовых компьютерных платформ.
3. На основе созданных технологий и алгоритмических решений реализованы и внедрены в научную и промышленную практику программные комплексы моделирования освещенности и синтеза реалистичных изображений. Разработан и построен высокоточный программно-аппаратный комплекс для измерения оптических характеристик материалов. Использование этих комплексов приводит к существенному повышению производительности труда проектировщиков оптических систем, дизайнеров, конструкторов.

Список литературы

- [1] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов. Методы машинной графики в автоматизированном проектировании // Труды 5-й международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2005)". Москва, ИПУ РАН, 25-27 октября 2005 г.
- [2] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов. Машинная графика в задачах автоматизированного проектирования // «Информационные технологии в проектировании и производстве», № 1, 2006, с. 64-73.
- [3] T. Whitted. An Improved Illumination Model for Shaded Display // Communication of ACM, Vol. 23, № 6, June 1980, pp. 343-349.
- [4] A. Appel. Some Techniques for Shading Machine Renderings of Solids // AFIPS 1968 Spring Joint Computer Conference Proceeding, pp. 37-45.
- [5] R.L. Cook, K.E. Torrance. A reflectance model for computer graphics // Computer Graphics, Vol. 15, № 3, 1981, pp. 307-316.
- [6] T. Nishita, I. Okamura, E. Nakamae. Shading model for point and linear sources // ACM Transactions on Graphics, Vol. 4, № 2, 1985, pp. 124-146.
- [7] A. Schmitt, H. Muller, W. Leister. Ray tracing algorithms – Theory and practice. Theoretical foundations of Computer graphics and CAD. Edited by R.A. Earnshaw, NATO ASI Series, Vol. 40, 1988, pp. 997-1029.
- [8] J. T. Kajiya. The rendering equation // Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings), 1986, vol. 20, pp.143-150.
- [9] Andrew S. Glassner. Principles of Digital Images Synthesis. Morgan Kaufman, 1995, vol. 1 and 2.
- [10] C.M. Goral, K.E. Torrance, D.P. Greenberg, B. Battaile. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces // ACM Computer Graphics (SIGGRAPH '84), Vol. 18, № 3, 1984, pp. 213-222.

[11] M.F. Cohen, D.P. Greenberg, D.S. Immel, P.J. Brock. An efficient radiosity approach for realistic image synthesis // IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 6, № 2, 1986.

[12] M. Pharr, G. Humphreys. Physically Based Rendering. From Theory to Implementation. Morgan Kaufman (Elsevier), 2004, 1019 pages.

[13] A. Khodulev, E. Kopylov. Physically accurate lighting simulation in computer graphics software // Proceeding of GraphiCon'96 - The 6-th International conference on Computer Graphics and Visualization, St. Petersburg, Vol. 2, 1996, pp. 111-119.

[14] 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.

[15] К.Д. Дмитриев «Разработка и модернизация методов генерации физически аккуратных изображений на ЭВМ» / Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук по спец. 05.13.11 – "математ. и програм. обеспечение вычислит. машин, комплексов и компьютерных сетей". ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, М: 2002 (науч. рук. Ю.М. Баяковский, науч. конс. В.А. Галактионов).

[16] Ю.М. Баяковский, В.А. Галактионов. О некоторых фундаментальных проблемах компьютерной (машинной) графики // "Информационные технологии и вычислительные системы", № 4, 2004, с. 3-24.

[17] CIE – International Commission on Illumination,
<http://www.cie.co.at/cie/index.html>

[18] F. Maamari. TC.3.33. List of proposed test cases // ENTPE – France, 2002.

[19] F. Maamari, M. Fontoyont, M. Hirata, J. Koster, C. Marty, A. Transgrassoulis. Reliable Datasets for Lighting Programs Validation, Benchmark Results // Proceedings of CISBAT 2003, EPFL Lausanne, 2003, pp. 241-246.

[20] A.B. Khodulev, E.A. Kopylov, D.D. Zdanov. Requirements to the Scene Data Base // The 8-th International Conference on Computer Graphics and Visualization Graphicon'1998, Moscow, 1998, pp. 189-195.

[21] D.P. Greenberg. Outlook on Computer Graphics // Computer, January 1998, p. 36.

[22] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов. Эффективный оператор сжатия динамического диапазона яркостей // "Программирование", № 5, 2004, с. 35-42.

[23] В.Р. Васильев, А.Г. Волобой, Н.И. Вьюкова, В.А. Галактионов. Контекстная визуализация пространственных данных // «Информационные технологии и вычислительные системы», № 4, 2004, с. 25-34.

[24] A. Ignatenko, B. Barladian, K. Dmitriev, S. Ershov, V. Galaktionov, I. Valiev, A. Voloboy. A Real-Time 3D Rendering System with BRDF Materials and Natural Lighting // The 14-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2004, Conference Proceedings, Moscow, 2004, pp. 159-162.

[25] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, Н.И. Вьюкова, В.А. Галактионов, Н.Б. Дерябин. Интернет сервис для моделирования освещенности и синтеза фотореалистичных изображений // 15-ая Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению – Графикон-2005, Новосибирск, 2005, с. 332-338.

[26] 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, с. 66-80.

[27] A. Adinetz, B. Barladian, V. Galaktionov, L. Shapiro, A. Voloboy. Physically Accurate Rendering with Coherent Ray Tracing // Proceedings of GraphiCon'2006 - The 16-th International conference of Computer Graphics and Applications, Novosibirsk, 2006, pp. 8-15.

[28] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, Л.З. Шапиро. Интеграция моделирования освещенности методом трассировки лучей в системы автоматизированного проектирования // 16-ая Международная конференция по компьютерной графике и ее приложениям – Графикон-2006, Новосибирск, 2006, с. 275-278.

[29] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов, Л.З. Шапиро. Расчет солнечного освещения, заданного изображением с большим динамическим диапазоном // 16-ая Международная конференция по компьютерной графике и ее приложениям – Графикон-2006, Новосибирск, 2006, с. 467-472.

[30] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Л.З. Шапиро. Интеграция программных комплексов моделирования освещенности в системы автоматизированного проектирования и производства // Труды 6-й международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2006)". Москва, ИПУ РАН, 24-26 октября 2006 г., с. 16-20.

[31] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов, Л.З. Шапиро. Моделирование естественного дневного освещения, задаваемого изображением с большим динамическим диапазоном // "Программирование", № 5, 2006, с. 62-80.

[32] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, С.В. Ершов, А.А. Летунов, И.С. Потемин. Аппаратно-программный комплекс для измерения светорассеивающих свойств поверхностей // «Информационные технологии и вычислительные системы», № 4, 2006, с. 24-39.

[33] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Н.А. Гнездилова, К.А. Дмитриев, С.В. Ершов. Об одном подходе к визуализации тканей // «Информационные технологии и вычислительные системы», № 3, 2007, с. 71-78.

[34] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, К.А. Востряков, В.А. Галактионов, Л.З. Шапиро. Применение когерентной трассировки лучей в задачах

физически аккуратной визуализации // "Программирование", № 5, 2008, с. 67-80.

[35] А.Г. Волобой, Н.А. Лобалзо. Метод сравнения результатов оптического моделирования ткани с физически измеренными данными // Материалы 11-ого научно-практического семинара «Новые информационные технологии в автоматизированных системах», Москва, 2008, с. 3-9.

[36] I. Valiev, A. Voloboy, V. Galaktionov. Improved model of IBL sunlight simulation // 24-th international Spring Conference on Computer Graphics – SCCG'2008, Budmerice castle, Slovakia, 2008, Proceedings, pp.37-42.

[37] N. Lobalzo, A. Voloboy. Physically Based Lighting Model for Cloth and its Validation // Proceeding of GraphiCon'2008 - The 18-th International conference of Computer Graphics and Vision, Moscow, 2008, pp. 61-68.

[38] А.Г. Волобой. Физически корректное моделирование освещенности в задачах компьютерной графики // Сборник докладов Международной научной конференции, посвященной 80-летию со дня рождения академика В. А. Мельникова, Москва, 2009, с. 72-75.

[39] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, Л.З. Шапиро. Оптимизация представления карт освещенности и яркости для их интерактивной визуализации // 19-ая Международная конференция по компьютерной графике и зрению – Графикон-2009, Москва, 2009, с. 267-270.

[40] А.Г. Волобой, С.В. Ершов, Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, Л.З. Шапиро. Анализ точности моделирования глобального освещения // 19-ая Международная конференция по компьютерной графике и зрению – Графикон-2009, Москва, 2009, с. 317-318.

[41] И.В. Валиев, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов. Физически корректная модель солнечного освещения, задаваемая изображением с большим динамическим диапазоном // "Вестник компьютерных и информационных технологий", № 9, 2009, с. 10-17.

[42] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Н.А. Лобалзо. Физически обоснованная модель распространения света в ткани // "Программные продукты и системы", № 3(87), 2009, с. 71-75.

[43] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, С.В. Ершов, Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, Л.З. Шапиро. Анализ точности компьютерного моделирования сложных сцен // «Информационные технологии в проектировании и производстве», № 2, 2010, с. 83-94.

[44] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Н.А. Лобалзо. Алгоритмы моделирования и визуализации оптически сложных материалов на примере ткани // "Программирование", № 4, 2010, с. 68-80.

[45] А.Г. Волобой, С.В. Ершов, Э.С. Клышинский, С.Г. Поздняков. Моделирование распространения света в тонком красящем слое с высокой концентрацией частиц // 20-ая Международная конференция по компьютерной графике и зрению – Графикон-2010, Санкт Петербург, 2010, с. 155-162.

[46] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Л.З. Шапиро. Быстрая визуализация освещенности салона самолета // Труды 10-й международной конференции CAD/CAM/PDM-2010 "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта". Москва, ИПУ РАН, 19-21 октября 2010 г., с. 78-80.

[47] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов. Задание исходных данных для физически аккуратного моделирования освещенности // Труды 11-ой международной конференции CAD/CAM/PDM-2011 "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта", Москва, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 18-20 октября, 2011, с. 167-170.

[48] Boris Barladyan, Lev Shapiro, Alexey Voloboy. Ray maps technique for effective interrogation of results of MCRT simulation // Conference

proceedings of 21-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2011, Moscow, Russia, pp. 46-49.

[49] A.A. Letunov, B. Barladian, V.A. Galaktionov, S.V. Ershov, A. Voloboy & E. Zueva. Device for Measuring Spectral - Spatial Distribution of Light Dispersed by Surfaces // Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, ISBN 978-3-901509-83-4, ISSN 1726-9679, pp. 1459-1460.

[50] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Л.З. Шапиро. Двухуровневая трассировка лучей и ее применение для интерактивной визуализации и оптического моделирования // «Информационные технологии в проектировании и производстве», № 4, 2008, с. 81-88.

[51] А.И. Мещеряков, М.С. Бережецкий, В.П. Логвиненко, А.А. Летунов, О.И. Бужинский, А.Г. Волобой. Осаждение борокарбидных пленок в омическом разряде стелларатора Л-2М с использованием карборана // Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез, 2011, вып. 2, с. 65-69.

[52] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Л.З. Шапиро. Интерактивная визуализация результатов моделирования освещенности // "Информационные технологии в проектировании и производстве", № 4, 2011, с. 58-62.

[53] Autodesk 3DS Max, company website,
<http://usa.autodesk.com/3ds-max/>

[54] Dassault Systems, company website,
<http://www.3ds.com/home/>

[55] Форматы файлов, ресурсы в Интернете:
<http://ru.wikipedia.org/wiki/DXF>
<http://ru.wikipedia.org/wiki/IGES>
<http://ru.wikipedia.org/wiki/VRML>
http://en.wikipedia.org/wiki/ISO_10303

[56] Lightscape software, lighting simulation software,

<http://www.digitalbroadcasting.com/product.mvc/Lightscape-software-0001>

[57] Mental Images, company website, <http://www.mentalimages.com/>

[58] Chaos Group, company website, <http://www.chaosgroup.com>

[59] П. Гольдовский, А. Кокова. Моделирование оптических явлений и свойств задаваемых изделий // «САПР и графика», №8, 2004, с. 46-47.

[60] IES формат по стандарту IESNA:LM-63. Ресурсы в Интернете:
<http://lumen.iee.put.poznan.pl/kw/iesna.txt>

www.oms-rus.ru/upload/iblock/284/ies_format.doc

[61] Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky. CIE DS 011.2/E:2002 Draft Standard. Official version // CIE TC 3-15. CIE Central Bureau, Vienna, Austria.

[62] A.Ryer. Light measurement handbook // International Light. Inc., 1998. ISBN 0-9658356-9-3.

[63] Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), <http://www.vniiofi.ru/>

[64] Philips Color Kinetics, company website, IES files
<http://www.colorkinetics.com/support/ies/>

[65] The Illuminating Engineering Society (of North America),
<http://www.iesna.org>

[66] В.А. Галактионов «Программные технологии синтеза реалистичных изображений» / Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук по спец. 05.13.11 – "математ. и програм. обеспечение вычислит. машин, комплексов и компьютерных сетей". ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, М: 2006 (науч. конс. М.М. Горбунов-Посадов).

[67] Radiant Imaging (Radiant ZEMAX, LLC), company website,
<http://www.radiantimaging.com/>

[68] G. Ward. Real Pixels. Graphics Gems II // J. Arvo, ed., 1991, Academic Press, Boston, 643 p., pp.80-83.

[69] High Dynamic Range Image Processing and Manipulation. University of Southern California, company website, 1997, <http://www.hdrshop.com>.

- [70] P. Debevec. Image-Based Lighting // Siggraph 2002 Tutorial. IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 22, No. 2, 2002, pp. 26-34.
- [71] P. Debevec, J. Malik. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs // Computer Graphics (Proc. Siggraph 97), 1997, pp. 369-378.
- [72] Hyperfocal Design community, community website, 2005, <http://www.hyperfocaldesign.com>
- [73] N. Greene. Environment Mapping and Other Applications of World Projections // IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 6, No. 11, 1986, pp. 21-29.
- [74] SpheronVR Visual technologies, SPHERON-VR AG, company website, 2003, <http://www.spheron.com>.
- [75] Dosch Design – 3D models, seamless texture, HDRI, photoshop layer images, music & animations. Dosch Design GmbH, company website, 2005, <http://www.doschdesign.com>.
- [76] IESNA Lighting Handbook (by Mark S. Rea). Reference & Application. 8th ed., New York, Illuminating Engineering Society of North America, 1993, 989 p.
- [77] L. Meylan, S. Daly, S. Susstrunk. The reproduction of specular highlights on high dynamic range displays // In Proc. of the 14th Color Imaging Conference, Scottsdale, November 6-10, 2006, pp. 333-338.
- [78] F. Banterle, P. Ledda, K. Debattista, A. Chalmers. Inverse tone mapping // Proc. of the 4th International Conference GRAPHITE 2006, Kuala Lumpur, Malaysia, November 29 - December 2, 2006, pp. 349-356.
- [79] A. Rempel, M. Trentacoste, H. Seetzen, H. Young, W. Heidrich, L. Whitehead, G. Ward. Ldr2Hdr: On-the-fly reverse tone mapping of legacy video and photographs // ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), Vol. 26, No. 3, 2007, Article No. 39

[80] В.А. Галактионов, Б.Х. Барладян, Е.Ю. Зуева, Е.И. Кугушев. Параметрические модели трехмерных объектов и их использование для реконструкции сцен // Открытые системы, №5, 1995, с.13-16.

[81] B.Kh.Barladyan, E.Yu.Zueva, V.A.Galaktionov, A.Yu.Kargashin, E.I.Kugushev, E.L.Starostin. Computer Modeling of Real Scenes and Objects Based on Their Photographs // Pattern Recognition and Image Analysis, Vol.8, No.2, 1998, pp.162-163.

[82] I.V. Valiev. 3D Reconstruction of Architectural Objects from Photos // Proc. 9th International Conference on Computer Graphics and Vision, Moscow, August 26 - September 1, 1999, pp. 171-173.

[83] B.T. Phong. Illumination for Computer Generated Pictures // Communications of the ACM, 18(6), 1975, pp. 311–317.

[84] J.F. Blinn. Models of Light Reflection for computer synthesized pictures // SIGGRAPH'77 Conference Proceedings, July 20-22, pp. 192-198.

[85] R.L. Cook, K.E. Torrance. A Reflectance Model for Computer Graphics // ACM Transaction on Graphics, Vol. 1, No. 1, 1982, pp 7-24.

[86] X.D. He, K.E. Torrance, F.X. Sillion, and D.P. Greenberg. A Comprehensive Physical Model for Light Reflection // Computer Graphics, 25(4), 1991, pp. 175–186.

[87] E.P.F. Lafortune, S.-C. Foo, K.E. Torrance, D.P. Greenberg. Non-Linear Approximation of Reflectance Functions // In SIGGRAPH'97 Conference Proceedings, August 1997, pp. 117-126.

[88] Н.А. Лобалзо. «Исследование и разработка методов моделирования и визуализации оптически сложных материалов на примере ткани» / Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по спец. 05.13.11 – "математ. и програм. обеспечение вычислит. машин, комплексов и компьютерных сетей". ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, М: 2008 (науч. рук. В.А. Галактионов).

[89] C. Wynn. An Introduction to BRDF-Based Lighting // NVIDIA Corporation, 2000, Ресурс в Интернете:

http://developer.nvidia.com/object/BRDFbased_Lighting.html .

[90] А. Игнатенко. Использование двухлучевой функции отражательной способности (ДФОС) для моделирования освещения // Сетевой журнал Графика и Мультимедия, 2003, Ресурс в Интернете:

<http://www.cgm.computergraphics.ru/content/view/45>

[91] Ian Ashdown. Photometry and Radiometry. A Tour Guide for Computer Graphics Enthusiasts. Ресурс в Интернете:

<http://www.helios32.com/Measuring%20Light.pdf>

[92] J.F. Murray-Coleman, A.M. Smith. The Automated Measurement of BRDFs and their Application to Luminaire Modeling // Journal of the Illuminating Engineering Society, Winter 1990.

[93] S.N. Pattanaik, J.A. Ferwerda, K.E. Torrance, D. Greenberg. Validation of Global Illumination Simulations through CCD Camera Measurements // Cornell University, Ithaca, NY-14853, USA

<http://www.graphics.cornell.edu/research/measure/>

[94] K.F. Karner, H. Mayer, M. Gervautz. An Image based Measurement System for Anisotropic Reflection // Eurographics'96, Computer Graphics Forum, 15(3), pp. 119-128.

[95] S.C. Foo. A Gonioreflectometer for Measuring Bidirectional Reflectance of Material for Use in Illumination Computation // Cornell University, Thesis, 1997.

[96] G.J. Ward. Measuring and Modeling Anisotropic Reflection // Proceedings of SIGGRAPH'92, July 1992, pp. 265-272.

[97] Scattering Measurements. O++. Company website.

http://www.oplusplus.com/mesure_photometrique_fr.php

[98] Measurements Services. Surface Optics Corporation. Company website.

<http://www.surfaceoptics.com>

[99] James E. Proctor, P. Yvonne Barnes, NIST High Accuracy Reference Reflectometer-Spectrometer // J.Res.Natl.Inst.Stand.Technol., 101, Number 5, September-October 1996, pp. 619-627.

[100] Murakami GCMS-4, AvianGroupUSA company website, 2012, <http://www.aviangroupusa.com/murakami/gonio/gcms-4.php>

[101] Murakami Color Research Laboratory, Tokyo, Japan, corporate website, 2012, <http://www.mcrl.co.jp/english>

[102] Princeton Instruments, monochromator SP-150, SP-2150. http://www.princetoninstruments.com/Uploads/Princeton/Documents/Datasheets/Princeton_Instruments_Acton_Standard_Series_N1_8%202010.pdf

[103] Г.Д. Богомолов, А.А. Летунов. Амплитудная калибровка систем лазерной диагностики плазмы по вращательному комбинационному рассеянию в водороде и дейтерии // Физика плазмы, № 5, 1979, с. 1380.

[104] X-Rite , corporation website, 2012, <http://www.xrite.com/home.aspx>

[105] Mario Cappitelli. Illumination simulation with Specter in aviation industry – Uncertainty of simulation results from Specter in comparison with real measurement // EADS Innovation Work. Technical Capabilities Center 5 (TCC5). System Engineering, Simulation & Information Technologies. Hamburg, 2008.

[106] А.А. Летунов, Б.Х. Барладян, Е.Ю. Зуева, В.П. Вежневцев, С.А. Солдатов. Прибор для измерения BDF на основе ПЗС-камеры для использования в компьютерной графике // The 9th International Conference on Computer Graphics & Vision. Russia, Moscow, 1999, pp.129-135.

[107] А.А. Летунов, В.А. Галактионов, Б.Х. Барладян, Е.Ю. Зуева, В.П. Вежневцев, С.А. Солдатов. Измерительный комплекс на основе видеокамеры для определения светорассеивающих свойств поверхностей, используемый в компьютерной графике / Препринт ИПМ им. М.В. Кедыша РАН, № 71, 2000 г.

[108] H. Zhong, Y. Xu, B. Guo and H. Shum. Realistic and Efficient Rendering of Free-Form Knitwear // Journal of Visualization and Computer Animation, Special Issue on Cloth Simulation, 2000, Ресурс в Интернете: http://research.microsoft.com/asia/dload_files/g-vcomputing/VisualCom2/jvca01-4th.pdf

[109] D. Baraff, A. Witkin. Large Steps in Cloth Simulation // SIGGRAPH'98, July 19-24, 1998, pp. 43-54.

[110] M. Sattler, R. Sarlette, R. Klein. Efficient and Realistic Visualization of Cloth // Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering, 2003, pp. 167-178.

[111] G. Müller, J. Meseth, M. Sattler, R. Sarlette and R. Klein. Acquisition, Synthesis and Rendering of Bidirectional Texture Functions // Proceedings of EUROGRAPHICS'2004, 2004, pp. 69-94.

[112] Ying-Qing Xu, Yanyun Chen, Stephen Lin, Hua Zhong, Enhua Wu, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Photorealistic Rendering of Knitwear Using the Lumislice // SIGGRAPH 2001, pp. 391-398.

[113] N. Adabala, N. Magnenat-Thalmann, G. Fei. Realtime Rendering of Woven Clothes // VRST'03 (Virtual Reality Software and Technology), October 1-3, 2003, pp. 41-47.

[114] G. S. Buck, JR, F. A. McCord. Luster and Cotton // Textile Research Journal, 1949; 19; pp. 715-754.

[115] R.S. Chauhan, N.M. Shah, A. Rajagopalan, N.E. Dweltz. Morphological and Mechanical Properties of Raw and Swollen Cotton Fibers // Textile Research Journal, 1979; 49; pp. 632-638.

[116] D.W. Foreman, K.A. Jakes. X-Ray Diffractometric Measurement of Microcrystallite Size, Unit Cell Dimensions, and Crystallinity: Application to Cellulosic Marine Textiles, "Textile Research Journal", 1993; 63; pp. 455-464.

[117] J.W. Illingworth. The optical properties of textile fibers // Textile Recorder, August, 1942, pp. 29-32.

[118] P. Hanrahan, W. Krueger. Reflection from Layered Surfaces Due to Subsurface Scattering // In SIGGRAPH' 93 Conference Proceedings, California, August 1993, pp. 165-174.

[119] C.J. Curtis, S.E. Anderson, J.E. Seims, K.W. Fleischer and D.H. Salesin. Computer-generated watercolor // In Proceedings of the 24th Annual International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM

Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997, pp. 421-430. DOI=<http://doi.acm.org/10.1145/258734.258896>.

[120] И. Исимару, Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981.

[121] B.E. Smits and G. Meyer. Newton's Colors: Simulating Interference Phenomena in Realistic Image Synthesis // 1st Eurographics Workshop on Photosimulation, Realism and Physics in Computer Graphics, 1990, pp. 185-194.

[122] I. Icart and D. Arques. An Approach to Geometrical and Optical Simulation of Soap Froth // Computers & Graphics, Vol. 23, No 3, 1999, pp. 405-418.

[123] N. Nagata, T. Dobashi, Y. Manabe, T. Usami and S. Inokuchi. Modelling and Visualization for a Pearl-Quality Evaluation Simulator // IEEE Transactions on Visualization and Computer, Vol. 3, No. 4, 1997, pp. 307-315.

[124] I. Icart and D. Arques. An Illumination Model for a System of Isotropic Substrate – Isotropic Thin Film with Identical Rough Boundaries // 10th Eurographics Rendering Workshop, 1999, pp. 260-272.

[125] P. Kubelka and F. Munk. Zeits. Tech. Physik (1931), 12, 593.

[126] P. Callet. Pertinent Data for Modelling Pigmented Materials in Realistic Rendering // Computer Graphics Forum, Vol. 15, No. 2, 1996, pp. 119–128.

[127] P. Callet. Physically Based Rendering of Metallic Paints and Coated Pigments // Visualization and Modelling (ed. R. Earnshaw et al.), Academic Press, 1997, pp. 287–301.

[128] T. Nishita, E. Nakamae and Y. Dobashi. Display of Clouds and Snow Taking Into Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light // Proceedings of SIGGRAPH'96, 1996, pp. 379–386.

[129] J.S. Gondek, G.W. Meyer and J.G. Newman. Wavelength Dependent Reflectance Functions // Proceedings of SIGGRAPH'94, 1994, pp. 213–220.

[130] M. Schramm, J. Gondek and G. Meyer. Light Scattering Simulations using Complex Subsurface Models // Graphics Interface '97, 1997, pp. 56–67.

- [131] B. Cabral, N. Max and R. Springmeyer. Bidirectional Reflection Functions From Surface Bump Maps // Proceedings of SIGGRAPH'87, 1987, pp. 273–281.
- [132] S.H. Westin, J.R. Arvo and K.E. Torrance. Predicting Reflectance Functions From Complex Surfaces // Proceedings of SIGGRAPH'92, 1992, pp. 255–264.
- [133] J. Dorsey and P. Hanrahan. Modelling and Rendering of Metallic Patinas // Proceedings of SIGGRAPH'96, 1996, pp. 387–396.
- [134] ... J. Dorsey, A. Edelman, J. Legakis, H. Wann Jensen and H.K. Pedersen. Modelling and Rendering of Weathered Stone // Proceedings of SIGGRAPH'99, 1999, pp. 225–234.
- [135] J.E. Hansen. Radiative Transfer by Doubling Very Thin Layers // *Astrophys. J.*, 155, 1969, pp. 565-574.
- [136] J.E.Hansen and L.Travis. Light Scattering in Planetary Atmospheres // *Space Science Reviews*, 16, 1974, pp. 527–610.
- [137] M. Pharr and P. Hanrahan. Monte Carlo Evaluation of Non-Linear Scattering Equations for Subsurface Reflection // In *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, 2000, pp. 75–84.
- [138] S. Ershov, K. Kolchin, K. Myszkowski. Rendering pearlescent appearance based on paint-composition modelling // *Computer Graphics Forum*, Vol. 20, No 3, 2001, pp. 227-238.
- [139] C.S. McCamy. Observation and measurement of the appearance of metallic materials // Part I. Macro appearance. *COLOR research and application* (1996), 21, pp. 292–304; Part II. Micro appearance. *COLOR research and application* (1998), 23, pp. 362–373.
- [140] Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов, Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970.
- [141] А.Г. Волобой, С.В. Ершов, С.Г. Поздняков, Решение дифракционной задачи для моделирования освещения тонкого красящего слоя / Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 75, 2009, 22 с.

[142] I. Wald, C. Benthin, M. Wagner, P. Slusallek. Interactive Rendering with Coherent Ray-Tracing // Computer Graphics Forum. Proceedings of the EUROGRAPHICS'2001, Vol. 20, № 3, 2001, pp. 153-164.

[143] C. Domez, K. Dmitriev, K. Myszkowski. Global Illumination for Interactive Applications and High-Quality Animations // STAR - State of The Art Report, Eurographics, 2002.

[144] The OpenRT: Real-Time Ray-Tracing Project, project website, 2007,
<http://www.openrt.de>
<http://en.wikipedia.org/wiki/OpenRT>

[145] S. Woop, J. Schmittler, P. Slusallek. RPU: A Programmable Ray Processing Unit for Realtime Ray Tracing // ACM Transactions on Graphics, vol. 24, No 3, 2005, pp.434-444.

[146] J. Schmittler, S. Woop, D. Wagner, W. J. Paul, P. Slusallek. Realtime Ray Tracing of Dynamic Scenes on an FPGA Chip // Proceedings of Graphics Hardware, 2004, pp. 95–106.

[147] Ю.М. Баяковский, А.В. Игнатенко, А.И. Фролов. Графическая библиотека OpenGL // Учебно-методическое пособие, факультет ВМК, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 2003.

[148] OpenGL - The Industry's Foundation for High Performance Graphics.
<http://www.opengl.org>

[149] А.В. Боресков. Графика трехмерной компьютерной игры на основе OpenGL. Изд. «Диалог-МИФИ», Москва, 2004.

[150] А.Г. Волобой. «Исследование и разработка алгоритмов, методов и программных средств для задач синтеза реалистичных изображений» / Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по спец. 05.13.11 – "математ. и програм. обеспечение вычислит. машин, комплексов и компьютерных сетей". ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, М: 2005 (науч. рук. В.А. Галактионов).

[151] Cortona3D. Automating Technical Communications. 2012.
<http://www.cortona3d.com/Products/Viewer/Cortona-3D-Viewer.aspx>

[152] Web3D consortium. Open Standards for Real-Time 3D Communication. X3D documentation. 2012. <http://www.web3d.org/x3d/vrml/>

[153] Using UVAtlas. 2012.
<http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb206321.aspx>

[154] D. R. Horn, J. Sugerman, M. Houston, P. Hanrahan. Interactive k-d tree GPU raytracing // I3D '07: Proceedings of the 2007symposium on Interactive 3D graphics and game, 2007, pp. 167–174.

[155] J. Guenther, S. Popov, H.-P. Seidel, P. Slusallek. Realtime Ray Tracing on GPU with BVH-based Packet Traversal // Proceedings of the IEEE/Eurographics Symposium on Interactive Ray Tracing, 2007, pp. 113–118.

[156] T. Aila, S. Laine. Understanding the Efficiency of Ray Traversal on GPUs // Proceedings of High-Performance Graphics'2009, 2009, <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=1572769.1572792>.

[157] К.А. Востряков. «Когерентные алгоритмы синтеза реалистичных изображений» / Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по спец. 05.13.11 – "математ. и програм. обеспечение вычислит. машин, комплексов и компьютерных сетей". ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, М: 2009 (науч. рук. В.А. Галактионов).

[158] K. Garanzha, C. T. Loop. Fast Ray Sorting and Breadth-First Packet Traversal for GPU Ray Tracing // Computer Graphics Forum, vol. 29, No. 2, 2010, pp. 289-298.

[159] K. Garanzha, A. Bely, V. Galaktionov. Simple geometry compression for ray tracing on GPU // Proceedings of 21-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2011, Moscow, Russia, pp. 107-110.

[160] В. Фролов, А. Игнатенко. Интерактивная трассировка лучей и фотонные карты на GPU // Proceedings of 19-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2009, Moscow, Russia, pp. 255-262.

[161] Д. Боголепов, В. Трушанин, В. Турлапов. Интерактивная трассировка лучей на графическом процессоре // Proceedings of 19-th

International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2009, Moscow, Russia, pp. 263-266.

[162] V. Frolov, A. Kharlamov, A. Ignatenko. Biased global illumination via Irradiance Caching and Adaptive Path Tracing on GPUs // Proceedings of 20-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2010, St. Petersburg, Russia, pp. 49-56.

[163] Д. Боголепов, Д. Сопин, В. Турлапов Моделирование каустик в реальном времени // Proceedings of 20-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2010, St. Petersburg, Russia, pp. 253-256.

[164] A. Stephens, S. Boulos, J. Bigler, I. Wald, S. Parker. An Application of Scalable Massive Model Interaction using Shared-Memory Systems // Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization, 2006, pp.19-26.

[165] А.Г. Волобой. Метод компактного хранения октарного дерева в задаче трассировки лучей // «Программирование», № 1, 1992, с. 21-27.

[166] V. Havran. Heuristic Ray Shooting Algorithms // Dissertation Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University, Prague, 2000.

[167] C. Benthin, I. Wald, P. Slusallek. A Scalable Approach to Interactive Global Illumination // Proceedings of Eurographics 2003, Computer Graphics Forum, v. 22, № 3, pp. 621 – 630.

[168] А.В. Адинец, Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов, Л.З. Шапиро. Когерентная трассировка лучей для сцен, содержащих объекты со сложными светорассеивающими свойствами / Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 107, 2005.

[169] Intel Software Network. Интерактивная трассировка лучей с использованием SIMD инструкций. // 2009, <http://software.intel.com/ru-ru/articles/interactive-ray-tracing/>

[170] Компания Тринова, электротехническое проектирование, company website, 2012, <http://www.trinova.ru/ru/planning>

[171] S.A. Green, D.J. Paddon. Exploiting coherence for multiprocessor ray tracing // IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 9, № 6, 1989, pp. 12--26.

[172] S.A. Green, D.J. Paddon. A highly flexible multiprocessor solution for ray tracing // The Visual Computer, Vol. 6, № 2, 1990, pp. 62-73.

[173] I. Notkin, C. Gotsman. Parallel progressive raytracing // Computer Graphics Forum, Vol. 16, № 1, 1997, pp. 43-56.

[174] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, А.А. Гарбуль и др. Применение распределенных вычислений для расчета сложных оптических систем. Многопоточковые и распределенные вычисления в задачах вычисления глобальной освещенности // Отчеты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по проекту РФТР № 85/2001, 2001.

[175] E. Veach, L.J. Guibas. Optimally combining sampling techniques for Monte Carlo rendering // SIGGRAPH 95 Proceedings. Addison-Wesley, 1995, pp. 419-428.

[176] И.М. Соболев. Метод Монте-Карло. Изд. «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1968.

[177] SPECTER – Computer-Based Optical Modeling and Design System.
<http://www.integra.jp/en/specter/index.html>

Список используемых аббревиатур

- ДФО – двунаправленная функция отражения
- ДФП – двунаправленная функция пропускания
- МКО – Международная комиссия по освещению
- ОКМД – одна команда - много данных
- ПЗС – прибор с зарядовой связью
- САПР – система автоматизированного проектирования, система автоматизации проектных работ
- ФОР – функция объемного рассеяния
- ЭЛТ – электронно-лучевая трубка
- BRDF – bi-directional reflection distribution function
- BSP – binary space partition
- BSSRDF – bi-directional sub-surface scattering reflectance distribution function
- BTDF – bi-directional transmittance distribution function
- CAD – computer-aided design
- CIE – Commission Internationale de l’Eclairage
- GPU – graphics processing units
- GPGPU – general-purpose graphics processing units
- GUI – graphical user interface
- HDR – high dynamic range
- HDRI – high dynamic range image
- HSV – Hue, Saturation, Value (color model)
- IBL – image based lighting
- IES – Illumination Engineering Society
- IESNA – Illumination Engineering Society of North America
- LGP – light guiding plate
- NURBS – non-uniform rational B-spline

PVC – pigment volume concentration

RGB – Red, Green, Blue (color model)

RI – Radiant Imaging

SDK – software development kit

SIMD – single instruction multiple data

SSE – Streaming SIMD Extension

VRML – Virtual Reality Modeling Language