

Средства визуализации распространения световых лучей в задачах проектирования оптических систем¹

А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, А.Д. Жданов, Д.Д. Жданов

Аннотация. Рассматриваются вопросы использования программных средств визуализации распространения света для эффективного анализа и проектирования сложных оптических систем, содержащих элементы поверхностного и объемного рассеивания. Вводится понятие критерия распространения света, в соответствии с которым визуализируются траектории лучей. Приводятся примеры реальных приложений, где использование критерия распространения света совместно с визуальным представлением траекторий лучей позволяет эффективно решать сложные задачи оптического проектирования.

Ключевые слова: трассировка лучей, визуализация лучей, моделирование освещенности, моделирование оптических систем, поверхностное рассеяние, объемное рассеяние.

Введение

Компьютерное проектирование современных оптических систем, таких как зеркально-линзовые осветительные системы, осветительные системы жидкокристаллических дисплеев, многолинзовые объективы, светодиоды и т.п., требует применения физически аккуратных и эффективных моделей распространения света в данных устройствах. Использование такого рода моделей распространения света является необходимым, но недостаточным условием эффективного проектирования. Достаточным условием является наглядное представление данных, получаемых в процессе оптического моделирования.

Существующие способы представления результатов компьютерного оптического моделирования это, главным образом, графики, таблицы или изображения распределений таких выходных

световых характеристик, как яркость, освещенность или интенсивность на приемниках излучения [1]. Выходные оптические характеристики – это непосредственный результат оптического моделирования, наблюдаемый на приемнике излучения. Такая форма представления результата удобна, когда нас в первую очередь интересует сам результат моделирования, а не то, каким образом он был получен, например, моделирование распределения яркости на поверхности жидкокристаллического дисплея или изображение, формируемое фотографическим объективом. Однако при проектировании оптических систем часто необходимо понимать, каким образом был получен выходной результат, то есть, каким образом свет от источников света попал на приемник излучения. Например, при анализе рассеянного света в линзовом объективе необходимо знать, какая поверхность и какой линзы создает блик на изображении. Для получения исчерпывающей

¹ Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, гранты 07-01-00450, 06-07-89162, а также фирмой INTEGRA (Япония).

информации о распространении света в оптической системе наиболее удобно использовать визуализацию траекторий лучей в оптической системе. Кроме того, визуальное представление траекторий световых лучей в оптической системе полезно и для разработчика программного обеспечения как средство отладки и оптимизации алгоритмов [2].

Для физически аккуратного и эффективного моделирования распространения света в оптических системах используются различные лучевые методы. Наиболее эффективным методом лучевого моделирования, позволяющим решать сложные задачи распространения света в светопроводящих оптических системах с элементами поверхностного и объемного рассеивания, является прямая трассировка лучей методом Монте-Карло. Впервые этот алгоритм был предложен в [3] и затем получил широкое развитие в системах оптического моделирования [4-6]. Для оптического моделирования предпочтительной разновидностью метода Монте-Карло является "русская рулетка" [1, 7]. Этот метод, с одной стороны, имеет простой программный интерфейс, а с другой стороны высокую производительность в задачах моделирования высокоэффективных оптических систем. Прямая трассировка лучей методом Монте-Карло моделирует распространение световых лучей от источника света до приемника излучения и тем самым статистически воспроизводит распределение освещенности, интенсивности или яркости на приемнике излучения. Метод Монте-Карло позволяет моделировать все физические эффекты распространения лучей (диффузное рассеивание на поверхностях, зеркальное отражение, преломление, изменение состояния поляризации, двойное лучепреломление и т.п.).

Для проектирования оптических систем, содержащих элементы со сложными оптическими свойствами, была разработана концепция оптических элементов [8, 9]. Эта концепция полностью согласуется с алгоритмом трассировки лучей методом Монте-Карло. Единственная проблема заключается в том, что оптический элемент представляет собой "черный ящик", имеющий один луч на входе и один луч на выходе, а траектория луча внутри оптического эле-

мента скрыта. В ряде случаев, при проектировании сложных осветительных систем, содержащих элементы поверхностного или объемного рассеивания, такое ограничение оптических элементов является неудобным. Поэтому в рамках данной работы был расширен программный интерфейс оптического элемента, что позволило получать траекторию луча также и внутри данного элемента. Затем система оптического моделирования может совместить траекторию луча в оптической системе с траекторией луча в оптическом элементе и визуализировать результирующую траекторию луча.

При проектировании оптических систем часто возникает задача определения влияния заданных компонентов оптической системы на качество изображения или на то, каким образом эти компоненты влияют на распространение света. Например, при анализе осветительной системы может возникнуть потребность узнать, какой вклад в выходное распределение освещенности вносит свет, отраженный от определенной поверхности системы, или, например, определить, каким образом формируется блик между двумя поверхностями линзового объектива.

Использование лучевого метода Монте-Карло для моделирования распространения света в оптических системах хорошо согласуется с возможностью анализа влияния отдельных компонентов системы на распространение света. При трассировке лучей необходимо селективировать только лучи, которые удовлетворяют некоторому критерию. Этот критерий может быть либо простым, например, выделять все лучи, претерпевшие двойное Френелевское отражение, либо более сложным, учитывающим порядок событий, происходящих с лучом во времени, например, сначала луч должен пройти через определенную поверхность, а затем претерпеть двойное Френелевское отражение. Критерий распространения лучей в оптической системе может быть применен как для визуализации траекторий лучей, так и для расчета распределения световых характеристик на приемниках излучения. Использование критериев траекторий лучей позволяет наглядно продемонстрировать влияние отдельных эффектов и компонентов оптической системы на распространение света в оптической системе.

Данная работа вводит понятие критерия пространства лучей в оптической системе как элемента программной системы оптического моделирования. Рассматриваются основные приложения критерия трассировки лучей к задачам анализа и проектирования оптических систем.

1. Визуализация лучей в системе оптического моделирования

Визуализация траекторий лучей в системе оптического моделирования, как правило, состоит из трех основных компонентов. Это формирование траекторий лучей, селекция лучей, необходимых для визуализации, и собственно визуализация траекторий лучей. Для интеграции оптических элементов в систему визуализации траекторий лучей необходимо, чтобы оптический элемент предоставлял информацию о траектории луча в виде, совместимом с представлением системы оптического моделирования. Рассмотрим более подробно организацию компонентов траектории лучей в системе оптического моделирования.

Во-первых, это сама траектория луча. Траектория луча – это набор прямолинейных отрезков (сегментов), соединяющих точки, в которых происходит либо изменение прямолинейности распространения луча, либо какое-то событие, меняющее параметры луча (например, цвет или состояние поляризации). Изменение прямолинейности распространения луча может происходить как на поверхностях оптической системы (например, преломление или отражение), так и в среде его распространения (например, рассеивание в среде или криволинейное распространение луча в среде с градиентом показателя преломления). Таким образом, каждый сегмент траектории луча есть результат каких-либо событий, произошедших с лучом. Причем один сегмент луча может быть определен рядом событий, например, пересечением луча с поверхностью и отражением его от поверхности. Кроме того, с точки зрения визуализации обязательным атрибутом траектории луча является цвет. Каждый сегмент луча может иметь свой цвет и состояние поляризации. Принимая во внимание ограничения, связанные с визуализацией траектории луча на экране обычного дисплея, в ряде случаев достаточно ограничить цвет луча RGB пространст-

вом. Таким образом, следующие параметры луча являются обязательными для визуализации его траектории:

- точки начала и конца сегментов лучей (в общем случае траектория луча не обязана формировать единую ломаную линию, где конец одного сегмента луча является началом следующего сегмента).
- цвет сегмента луча (в случае визуализации траектории луча на экране дисплея RGB представление достаточно для описания цвета луча).

Кроме того, сегмент луча может содержать специальную информацию об оптической системе на данном отрезке пути и причинах формирования сегмента луча. Причинами формирования сегмента луча являются события, которые происходят с лучом в процессе его распространения в оптической системе, например – поглощение, отражение, преломление, рассеивание луча, пересечения луча с поверхностью и т.п. Дополнительная информация зависит от причины, и, например, в случае пересечения луча с поверхностью оптической системы эта информация будет включать в себя показатель преломления среды, в которой распространяется луч, нормаль поверхности и ориентацию оптических свойств в точке падения луча, оптические свойства поверхности в точке падения. Каждая причина формирует собственный список данных, вызывающих ее. Кроме того, причин формирования сегмента луча может быть несколько, например отражение луча от поверхности объединяет как минимум два независимых события – пересечение луча с поверхностью и собственно отражение. События, происходящие с лучом в процессе его распространения в оптической системе, являются обязательным атрибутом траектории луча и позволяют осуществлять селекцию лучей на основе использования критериев трассировки лучей.

Вторым важным компонентом визуализации траекторий лучей является критерий распространения луча. *Критерий распространения луча* – это специальный программный объект, который анализирует историю распространения луча в оптической системе и принимает решение, удовлетворяет ли луч заданным условиям или нет. Если луч удовлетворяет условиям, то он принимается системой оптического моделирования и его траектория может быть визуализирована.

Критерий распространения луча представляется логическим выражением на множестве возможных основных событий, которые происходят с лучом во время его распространения в оптической системе. Например, можно селективировать лучи, которые претерпели диффузное отражение, или выпущенные заданным источником света.

Входным параметром критерия распространения луча является временная последовательность основных событий, произошедших с лучом в процессе распространения его в оптической системе. События имеют порядковые номера в соответствии с последовательностью из поступления. Результатом работы критерия является единственное значение – истина, если события, произошедшие с лучом, удовлетворяют критерию распространения луча, в противном случае – ложь.

Основными составляющими критерия распространения луча являются события, происходившие с лучом во время его распространения в оптической системе, и логические операции, объединяющие эти события в критерий.

События. Критерий распространения луча анализирует следующие события:

- луч был выпущен заданным источником света;
- луч пересекся с заданной частью геометрического объекта оптической системы и претерпел заданное оптическое преобразование;
- луч пересекся с заданным приемником излучения;
- луч пересекся с поверхностью, обладающей заданными оптическими свойствами, и претерпел заданное оптическое преобразование;
- луч претерпел заданное оптическое преобразование (зеркальное или диффузное отражение, поглощение и т.д.) на одном из объектов оптической системы.

Операции. Все операции применяются к операндам, и их результатом являются значения истина или ложь. Операндом может быть как результат вычисления события (если событие присутствует в последовательности событий, то результат истина, иначе – ложь), так и результат другой операции. Допустимые операции над событиями:

- операции логического пересечения (\cap) и объединения (\cup) с неограниченным количеством операндов;
- операция логического отрицания (\neg); операция может иметь только один операнд;
- операция временной последовательности ($;$). Операция может иметь неограниченное количество операндов. Данная операция учитывает временную последовательность событий, произошедших с лучом по мере его распространения. Результат операции является истиной тогда и только тогда, когда полученная на входе последовательность событий может быть разделена на набор последовательно произошедших подпоследовательностей событий таких, что каждая подпоследовательность придает значение истина своему операнду. В противном случае результатом операции является ложь.

Для интуитивно-понятного задания критерия распространения луча используется его представление в виде дерева, в котором листьями являются события, происходившие с лучом во время его распространения в оптической системе, а узлы являются операциями над своими прямыми потомками.

Специфика построения этого дерева требует, чтобы, во-первых, корнем дерева была логическая операция, а, во-вторых, операции временной последовательности не содержали других операций временной последовательности.

Рассмотрим пример построения критерия распространения луча и применения этого критерия к последовательностям событий, происходящих в оптической системе. В качестве примера оптической системы можно взять систему подсветки сотового телефона, показанную на Рис. 4. Зададим критерий распространения луча и применим данный критерий к двум возможным последовательностям распространения луча в данной оптической системе. Рассматриваемые последовательности изображены на Рис. 1.

В качестве примера критерия распространения луча рассмотрим временную последовательность выполнения событий, показанную на Рис. 2. В данном примере будут выбраны только те лучи, которые сначала преломились на какой-либо поверхности и перешли в среду *Glass*, а затем попали на поверхность *Lens*.

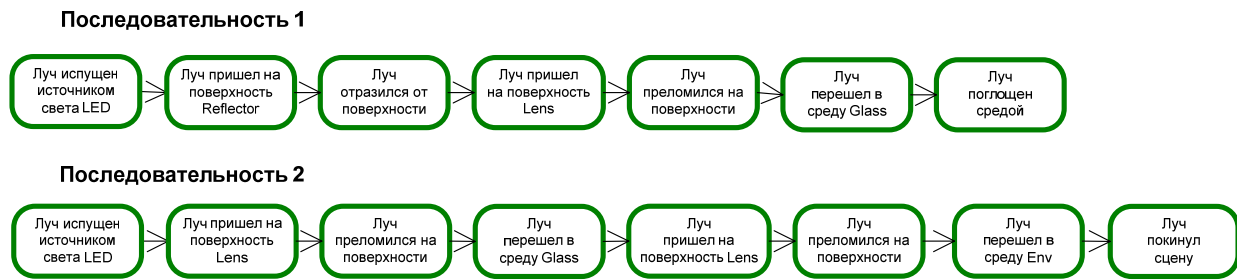


Рис. 1. Возможные последовательности событий

$$[\text{Луч преломился на поверхности}] \cap [\text{Луч перешел в среду Glass}] ;$$

$$[\text{Луч пришел на поверхность Lens}]$$

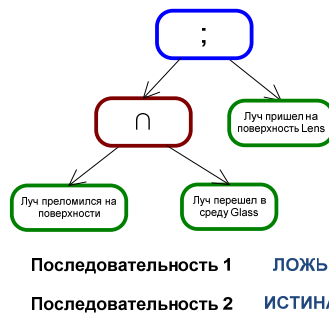


Рис. 2. Пример критерия распространения луча, учитывающий временную последовательность выполнения событий

Применение данного критерия к первой последовательности, представленной на Рис. 1, очевидно, дает ложный результат, а ко второй последовательности – истинный результат.

Рассмотрим более детально, как работает алгоритм критерия распространения луча. Критерий распространения луча задает язык на множестве последовательностей событий. Этот критерий преобразуется в регулярное выражение. Таким образом, для проверки конкретной последовательности событий (удовлетворяет ли оно критерию или нет) необходимо проверить, удовлетворяет ли оно регулярному выражению, задающему язык данного критерия распространения луча.

Для быстрого выполнения проверки регулярное выражение, как правило, преобразуется в конечный автомат [12]. Однако при этом количество состояний конечного автомата растет экспоненциально в зависимости от количества операций в дереве задания критерия. При использовании описанного выше подхода на реальных критериях распространения луча, количество состояний конечного автомата становится крайне велико. В связи с этим требуется разработка оригинального метода для проверки соответствия истории рас-

пространения луча критерию. Метод должен обладать высокой эффективностью работы и низкими требованиями к оперативной памяти.

Предлагается следующий метод проверки соответствия истории критерию распространения луча.

- Проверка последовательности событий производится с использованием дерева критерия, описанного выше. Каждый узел дерева может пребывать в одном из трех состояний: «истина», «ложь» или «неопределенность». Как только состояние корневого узла дерева изменяется из «неопределенного» на «истинное» или «ложное», вычисление прекращается и состояние корневого узла принимается за результат работы критерия.

- Элементы последовательности событий поочередно применяются к дереву критерия распространения луча. Каждый элемент данной последовательности устанавливает истинные значения в соответствующих неопределенных листьях дерева при выполнении следующих условий:

- 1) событие, заданное в листе дерева, совпадает с очередным элементом последовательности событий;

2) все родители данного листа дерева находятся в состоянии неопределенности;

3) если среди родителей данного листа есть условие задания временной последовательности, то все прямые дети условия временной последовательности, расположенные "левее", должны находиться в состоянии «истина».

- При изменении значения любого узла дерева пересчитывается значение его родительского узла. В результате родительский узел может либо изменить своё значение с неопределенного на истинное или ложное, либо сохранить его.

- В случае, когда по окончании последовательности событий критерий остается в состоянии неопределенности, всем листьям дерева, находящимся в состоянии неопределенности, присваивается значение «ложь» и результат работы критерия пересчитывается.

Пример работы алгоритма критерия распространения луча, примененного ко второй последовательности, представленной на Рис. 1, продемонстрирован на Рис. 3. В данном примере критерий будет выбирать все те лучи, которые сначала преломились на какой-либо поверхности и перешли в среду *Glass*, а затем пришли на поверхность *Lens* и при этом они не пришли сначала на поверхность *Lens*, а затем на поверхность *Reflector*.

В данном примере стрелками показаны связи между событиями последовательности распространения луча и листьями критерия распространения луча (номер в последовательности указан перед значением листа дерева, определенного данным элементом последовательности). Таким образом, можно определить значения всех листьев дерева и вычислить значение критерия для заданной последовательности.

Последним компонентом визуализации траектории луча является собственно ее визуализация. Визуализация осуществляется, как правило, аппаратными средствами компьютерной графики (Direct-X или OpenGL). Траектория лучей может рисоваться как поверхность изображения оптической системы, так и с учетом прозрачности объектов оптической системы. Кроме того, в процессе визуализации, траектория луча может иметь как искусственный цвет, так и натуральный, то есть цвет каждого из сегментов траектории луча может соответствовать его спектральному составу. Пример визуализации траекторий луча в оптической системе подсветки клавиатуры сотового телефона показан на Рис. 4. В примере используется критерий, который позволяет визуализировать только те лучи, которые прежде чем попасть на центральную кнопку и выйти через подложку, попали на диск вокруг центральной кнопки.

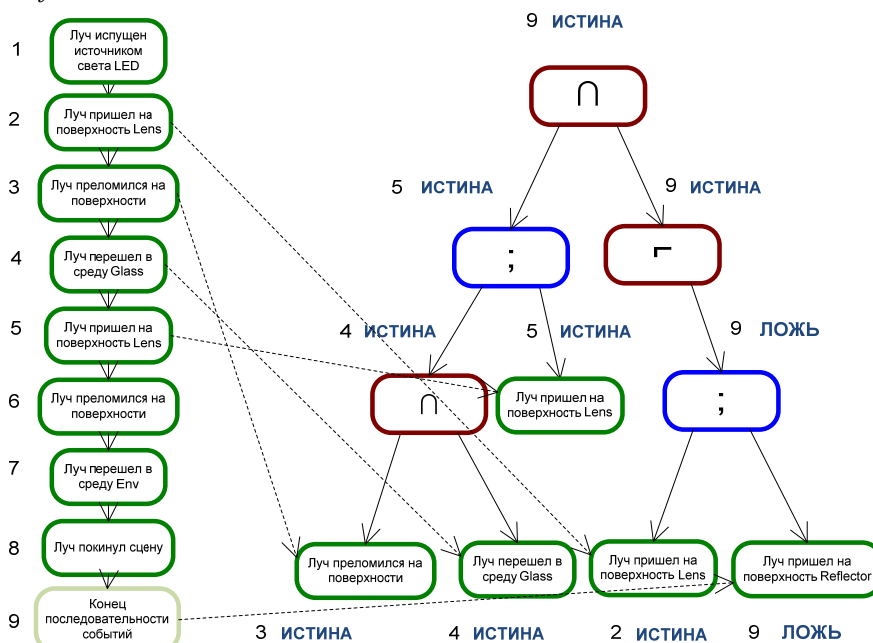


Рис. 3. Пример работы алгоритма критерия распространения луча

Пример задания данного критерия в графическом интерфейсе пользователя представлен на Рис. 5.

Кроме визуализации траектории луча полезным является вывод информации о событиях, произошедших с лучом, и о параметрах оптической системы в точках траектории луча (история распространения луча в оптической системе). История луча – это текстовая информация, которая может быть представлена интерактивно в диалоге программы или сохранена в файле.

2. Визуализация лучей при проектировании зеркально-линзовых оптических систем

Высокие требования, предъявляемые к качеству изображения, формируемого оптическими системами, делают недостаточным использование таких традиционных критериев оценки качества изображения, как абберации, частотно-контрастные характеристики и разрешение. Данные характеристики оценивают качество изображения "идеальной" оптической системы, исключая такие факторы как частичное отражение и рассеивание линзовых поверхностей и

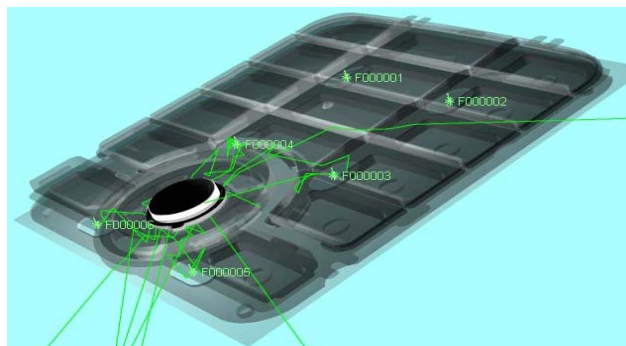


Рис. 4. Визуализация траекторий лучей в оптической системе подсветки клавиатуры сотового телефона

сред и механическую часть оптической системы. Кроме того, эксплуатационные условия, такие как внешние источники излучения, находящиеся вне поля зрения оптической системы, или загрязнение оптических элементов системы, вносят свой вклад в ухудшение результирующего качества изображения, формируемого оптической системой. Поэтому модель оптической системы должна включать все внутренние и внешние характеристики реальной системы.

Моделирование изображения, формируемого оптической системой, это трудоемкий процесс. Кроме того, причина полученного низкого качества изображения не всегда очевидна и требует

проверки нескольких гипотез об источнике ошибки. В большинстве случаев подходящим инструментом для анализа причин возможного снижения качества изображения в оптической системе может служить визуализация траекторий лучей, удовлетворяющих заданному критерию. Таким критерием, как правило, является один из возможных источников ошибки. Рассмотрим некоторые примеры, где визуализация траекторий луча позволяет обнаружить причины снижения качества изображения.

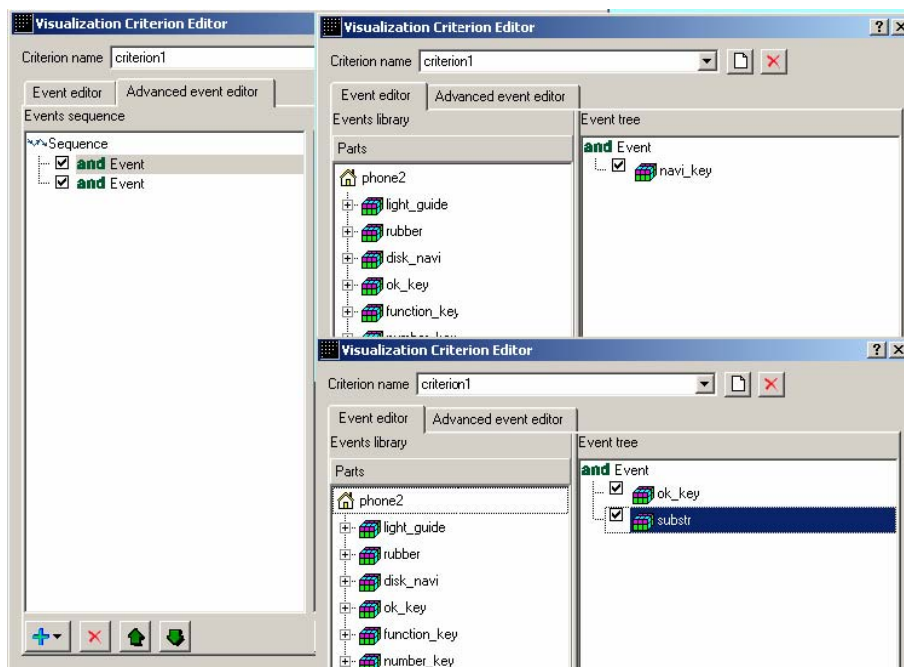


Рис. 5. Пример задания критерия для Рис. 4

Слева показано дерево с операцией предшествования в корне, справа – его поддеревья

Анализ бликов в оптических системах.

Блики присущи любому линзовому объективу. Никакое просветляющее покрытие не может устранить частичное отражение от поверхности линзы. Поэтому задачей проектирования линзовых оптических систем является устранение концентрации (фокусировки) бликующих лучей на поверхности изображения объектива. При этом блик может формироваться как объектом внутри поля зрения объектива, так и ярким объектом вне поля зрения (например, солнцем). Визуализация траекторий лучей с использованием различных критериев является удобным инструментом для анализа бликов. Использование сложных критериев позволяет детектировать блики заданного порядка от заданного набора поверхностей. Кроме того, сложные критерии позволяют селективно выделять несколько бликов одновременно. Рис. 6 (а) и Рис.6 (б) демонстрируют возможности использования визуального представления траекторий лучей для анализа бликов в линзовой оптической системе. На Рис. 6 (а) для визуализации траекторий лучей использовался критерий, селективирующий все блики второго порядка, а на Рис. 6 (б) визуализировались лучи, формирующие блики второго порядка и возникающие между поверхностями четвертой линзы.

Анализ рассеянного света, отраженного от механических деталей корпуса оптической системы. Важным фактором проектирования высококачественной оптической системы является уменьшение доли рассеянного света в изображении. Любая оптическая система объединяет оптические элементы, строящие изображение, и механические детали, фиксирующие положение оптических элементов. Свет, входящий в оптическую систему вне поля ее зрения, попадает на механические детали опти-

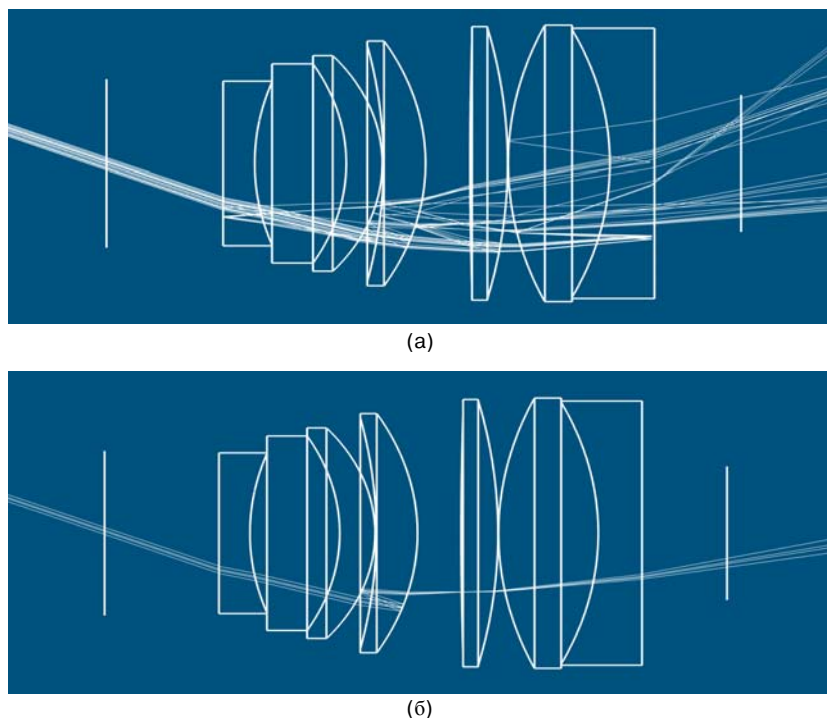


Рис. 6 Визуализация бликов второго порядка
(а) - в объективе

(б) - возникающих между поверхностями четвертой линзы объектива

ческой системы и на нерабочие поверхности оптических элементов (например, торцы и фаски линз). Далее свет рассеивается на этих элементах и попадает на приемник оптической системы. Визуализация траекторий лучей наглядно демонстрирует причины возникновения рассеянного света и возможные пути его устранения. Как правило, источником рассеянного света служит яркий источник вне поля зрения оптической системы (например, солнце). Поэтому критерием распространения лучей может служить попадание света на приемник излучения. Кроме того, построение более сложного критерия позволяет селективно выделять частные эффекты рассеивания. Например, можно отдельно визуализировать траектории лучей, отраженных от нерабочих поверхностей оптических деталей и отраженных от корпуса объектива. Рис. 7 (а) демонстрирует траектории лучей, в которых первичным источником рассеянного света явилось отражение лучей от нерабочей поверхности второй линзы объектива, а Рис. 7 (б) визуализирует лучи, отраженные исключительно от корпуса объектива.

3. Визуализация лучей на элементах поверхностного и объемного рассеивания

Растущие требования, предъявляемые к эргономичности современной техники, заставляют производителей искать новые решения при проектировании жидкокристаллических (LCD) мониторов, приборных панелей автомобилей и других аналогичных устройств. Для того чтобы добиться наиболее равномерного и комфортного освещения экрана монитора или приборной панели, создаются системы подсветки, в производстве которых используются светопроводящие элементы со сложными оптическими свойствами. Как отмечалось выше, для моделирования распространения света в элементах со сложными рассеивающими свойствами была разработана концепция оптических элементов [8]. Поэтому траектория луча в оптической системе может быть результатом совмещения траектории луча в оптическом элементе с траекторией луча в оптической

системе. Естественно, что проблема визуализации траектории луча лежит вне рамок интерфейса оптического элемента. Задача оптического элемента – предоставить системе оптического моделирования всю информацию о траектории луча и событиях, происходивших с лучом внутри оптического элемента. Эта информация о событиях необходима для селекции выбранных траекторий лучей с помощью критерия визуализации траекторий лучей, используемого в системе оптического моделирования.

3.1. Визуализация луча на элементах поверхностного рассеивания

Оптический элемент поверхностного рассеивания – это поверхность оптической системы, на которую нанесены рассеивающие элементы микрогеометрии. Как правило, оптические элементы поверхностного рассеивания используются в светопроводящих пластинах (для вывода света из пластины) и как рассеивающие элементы специальных пленок (для создания необходимой гониометрической диаграммы рассеянного излучения) [8, 9].

Модель оптического элемента поверхностного рассеивания основывается на предположении "крупном", с точки зрения волновой теории, размере рассеивающих микроэлементов и их фиксированной форме, положении и ориентации. Такое построение микрогеометрии позволяет применить лучевой подход для реализации модели поверхностного рассеивания. Поэтому оптический элемент поверхностного рассеивания – это некоторый программный модуль, позволяющий эффективно трассировать лучи в системе, содержащей десятки миллионов объектов. Основные задачи, возникающие при проектировании данных систем, это создание формы и распределения рассеивающих микроэлементов для обеспе-

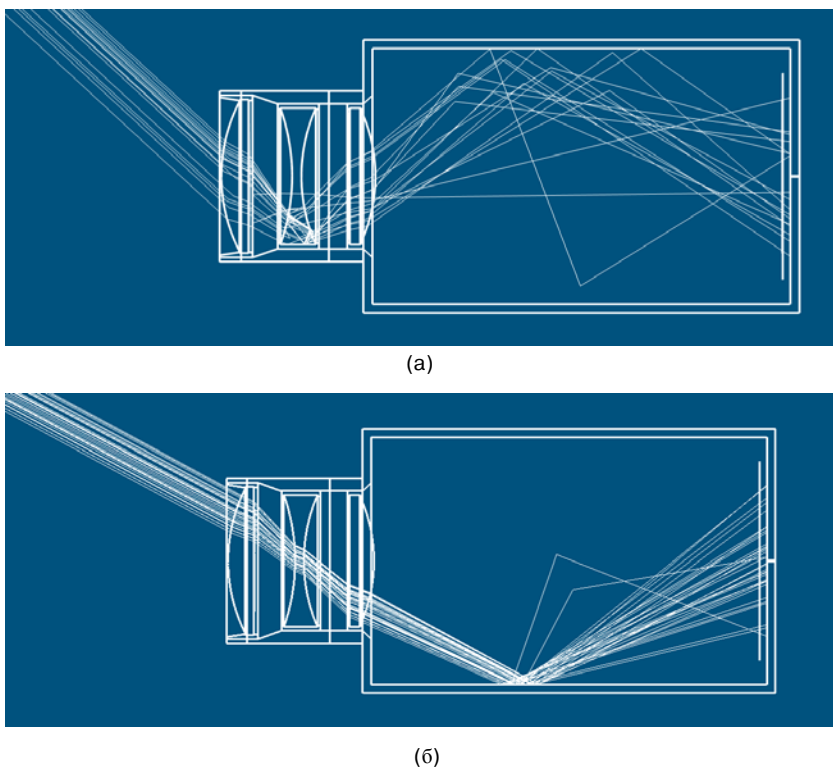


Рис. 7. Визуализация траекторий лучей

- (а) - отраженных от нерабочей поверхности второй линзы объектива
(б) - отраженных исключительно от корпуса объектива

чения заданного пространственного и углового распределения яркости выходного излучения.

Рассмотрим пример использования оптических элементов для проектирования приборной панели автомобиля.

Микрогеометрия, обеспечивающая рассеивание света, наносится на поверхность светопроводящей пластины для создания заданного пространственного и углового распределений выходной яркости. Пример устройства системы подсветки приборной панели автомобиля показан на Рис. 8.

Используя визуализацию траекторий лучей внутри оптического элемента поверхностного рассеивания, легко оценить влияние формы рассеивающих элементов на угловое распределение излучения, рассеянного на микроэлементе. Рис. 9 (а) визуализирует траектории лучей, рассеянных на микроэлементах сферической формы, а Рис. 9 (б) визуализирует траектории лучей, рассеянных на микроэлементах пирамидальной формы.

3.2. Визуализация луча в оптических элементах объемного рассеивания

Оптические элементы с объемным рассеиванием – это оптическая среда, ограниченная поверхностями оптической системы и заполненная рассеивающими микроэлементами. Как правило, оптические элементы объемного рассеивания используются как диффузные рассеиватели в жидкокристаллических дисплеях. Кроме того, объемное рассеивание применяется совместно с поверхностным рассеиванием в светопроводящих пластинах для создания более равномерного распределения выходного излучения.

Алгоритм трассировки лучей в оптическом элементе объемного рассеивания комбинирует две модели – "лучевую" и "волновую" [10, 11]. Этот алгоритм применим при невысокой концентрации рассеивающих частиц (как правило, до 10-15%). При этом "лучевая" модель отвечает за распространение лучей в изотропной среде между частицами, а "волновая" модель – за рассеивание лучей на частицах.

Рассмотрим пример использования пластины объемного рассеивания для формирования

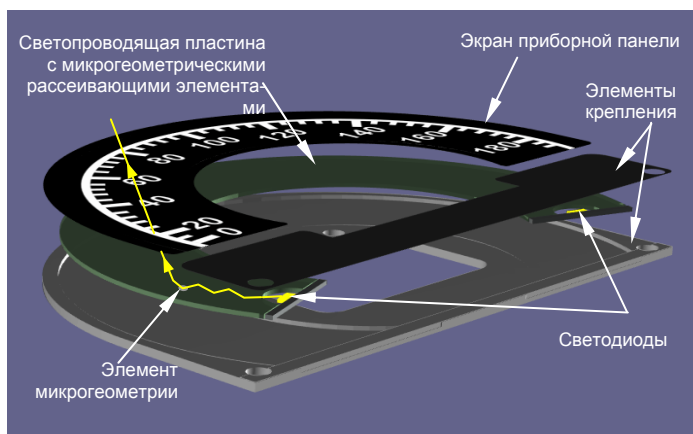
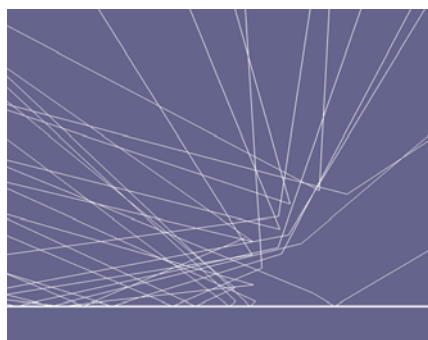
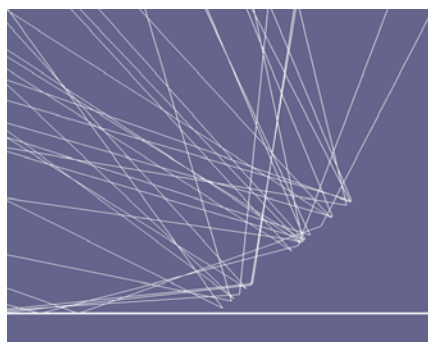


Рис. 8. Устройство системы подсветки приборной панели автомобиля



(а)



(б)

Рис. 9. Визуализация траекторий лучей, рассеянных на микрогеометрических элементах различной формы

равномерного распределения яркости на экране жидкокристаллического дисплея. Пример системы подсветки жидкокристаллического дисплея показан на Рис. 10.

Используя визуализацию траекторий лучей внутри оптического элемента объемного рассеивания, легко оценить влияние, например, концентрации рассеивающих элементов на простран-

венное и угловое распределение выходного излучения. Рис. 11 (а) визуализирует траектории лучей, рассеянных в пластине при низкой (1%) концентрации рассеивающих микроэлементов, а Рис. 11 (б) визуализирует траектории лучей, рассеянных в пластине при их более высокой (5%) концентрации.

Заключение

Значимость такого инструмента компьютерного моделирования распространения света, как визуализация траекторий лучей в оптической системе, не вызывает сомнений, поэтому большинство программных систем оптического моделирования обладают подобными возможностями в том или ином объеме. Однако ни одна из существующих систем не имеет развитых средств построения критериев распространения лучей в оптической системе и не позволяет применять различные критерии одновременно как для разных приемников излучения, так и для визуализации хода лучей. Интеграция разработанного критерия распространения лучей в созданную систему оптического моделирования показала его эффективность при проектировании сложных оптических систем, таких как линзовые (зеркально-линзовые) объективы и осветительные системы, системы подсветки жидкокристаллических дисплеев и другие.

Авторы выражают свою признательность А.С. Потемкину за помощь в написании программы, а также В.Г. Соколову и А.А. Гарбулю за предоставленные примеры.

Литература

1. Edward A. Kopylov, Kirill A. Dmitriev. Light propagation visualization as a tool for 3D scene analysis in lighting design // *Computers & Graphics*, vol.24, no.1, pp.31-39, 2000.
2. E. Wernert. A unified environment for presenting, developing and analyzing graphics algorithms. / In: *Computer Graphics*, vol. 31, no. 3, pp. 26-28, August 1997.
3. R. Cook, T. Porter, L. Carpenter. Distributed ray tracing. / In: *Computer Graphics, SIGGRAPH '84 Proceedings*, pp.137-145, 1984.

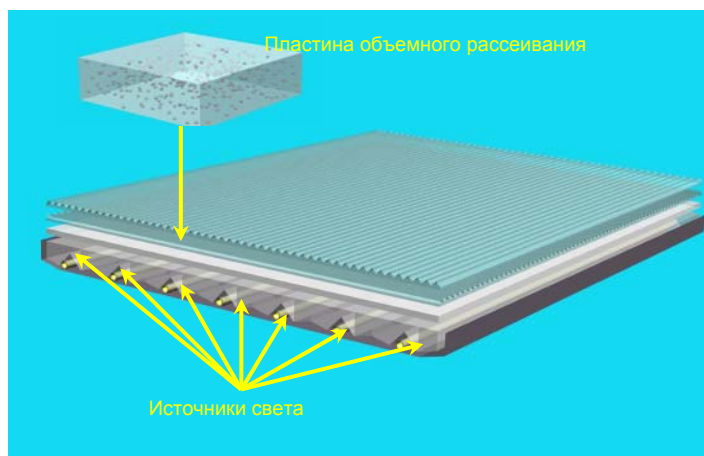


Рис. 10. Система подсветки жидкокристаллического дисплея

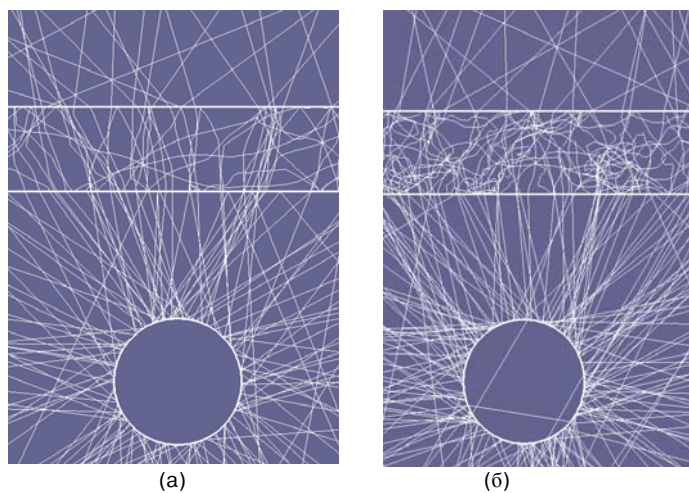


Рис. 11. Визуализация траекторий лучей в пластине объемного рассеивания

4. 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.
5. M.Pharr, G.Humphreys *Physically Based Rendering. From theory to implementation* // Morgan Kaufmann, 2004.
6. Баяковский Ю.М., Галактионов В.А. О некоторых фундаментальных проблемах компьютерной (машинной) графики // "Информационные технологии и вычислительные системы", № 4, 2004, стр. 3-24.
7. SPECTER – Computer-Based Optical Modeling and Design System. <http://www.integra.jp/eng/products/specter/index.htm>
8. А.Г.Волобой, В.А.Галактионов, Д.Д.Жданов. Технология оптических элементов в компьютерном моделировании оптико-электронных приборов // "Информационные технологии в проектировании и производстве", № 3, 2006, с.46-56.

9. Д.Д.Жданов. Разработка алгоритмов и программных средств моделирования оптических систем на основе технологии рассеивающих микроэлементов. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва – 2006г.
10. К. Борен, Д. Хафман. Поглощение и рассеяние света малыми частицами // М.: Мир, 1986.
11. Г. Хьюлст. Рассеяние света малыми частицами // ИЛ, 1963.
12. А. Ахо, Р. Сети, Д. Ульман. Компиляторы. Принципы, технологии, инструменты. // М.: Издательский дом "Вильямс", 2003.

Волобой Алексей Геннадьевич. Старший научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова в 1988 году. Кандидат физико-математических наук. Автор 50 научных работ. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика.

Галактионов Владимир Александрович. Заведующий отделом компьютерной графики и вычислительной оптики Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Окончил Московский физико-технический институт в 1976 году. Доктор физико-математических наук. Автор более 70 научных работ, в том числе двух монографий. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика, компьютерная лингвистика.

Жданов Дмитрий Дмитриевич. Научный сотрудник Государственного оптического института им. С.И. Вавилова. Окончил Ленинградский институт точной механики и оптики в 1984 г. Кандидат физико-математических наук. Автор более 15 научных работ. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика.

Жданов Андрей Дмитриевич. Аспирант Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Окончил Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики в 2008 году. Область научных интересов: компьютерная графика, математическое моделирование.