

Визуализация интерференционных картин в сценах с оптически изотропными прозрачными объектами

В.А. Дебелов¹, Л.Ф. Васильева²

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

¹ ORCID: 0000-0002-7577-4700, debelov@oapmg.sccc.ru

² ORCID: 0000-0001-7278-8800, vaslud@gmail.com

Аннотация

Не так много работ было опубликовано про расчет интерференционных картин даже для сцен с объектами, специфицированными оптически изотропными материалами. При этом основное внимание посвящалось только части вопросов, возникающих при разработке рендеров. В данной работе мы предложили решение по следующим вопросам, возникающим при разработке рендеров: а) представление луча при рендеринге, т. е. информация, связанная с лучом, которая позволяет учесть интерференцию при расчетах; б) расширение понятия материала объекта сцены; в) оценка интенсивности луча на картинной поверхности. Основное внимание авторов заключалось в освещении особенностей спектрального рендеринга при расчете интерференционных эффектов в сцене с оптически изотропными объектами, которые необходимо учитывать при разработке соответствующих рендеров, а не разработка рендера как такового.

В качестве алгоритма расчета интерференции в изотропной среде рассматривается прямое моделирование: трассировка линейно поляризованными лучами света от источника до картинной плоскости.

Основное отличие рассматриваемого подхода заключается в том, что в сцене не выделяется каких-либо специальных интерферирующих объектов типа тонких пленок, мыльных пузырей и т. д. Расчет изображений производится на основе спектрального представления света и материалов объектов сцены, а не на основе RGB-модели. Интерференция рассчитывается в точке сцены, соответствующей пикселю картинной плоскости, куда могут приходиться когерентные лучи по совершенно непредсказуемым траекториям, в том числе и по путям, которые проходят через известные интерферирующие объекты.

Ключевые слова: интерференция, линейная поляризация света, оптически изотропные прозрачные объекты, фотореалистический спектральный рендеринг, трассировка линейно поляризованных лучей, оптический путь луча, оценка интенсивности луча в пикселе.

1. Введение

Научная визуализация все интенсивнее проникает в различные области исследований. Спектр задач очень широк: от показа физических процессов на основе применения физически обоснованных математических моделей этих процессов [1] до применения визуализации при отладке алгоритмов [2]. Можно заметить, что научная визуализация интенсивно применяет достижения систем виртуальной реальности и систем совмещенной реальности. Новая функциональность систем виртуальной реальности почти сразу начинает применяться в научной визуализации, а некоторые из новых функций инициированы требованиями научной визуализации. В связи с повсеместным применением систем виртуальной реальности и систем совмещенной реальности

возникает, если не требование, то желание пользователей наблюдать наиболее реалистичный вариант синтезированной на компьютере обстановки, желание иметь больше реалистичных деталей. Визуализация в этих системах осуществляется программами-рендерами, рассчитывающими изображения на основе компьютерного описания виртуальных обстановок или сцен. Отсюда следует, что системы виртуальной реальности вправе рассчитывать только на те возможности, которые предоставляют достижения в области фотореалистической компьютерной графики.

Различные направления компьютерной графики взаимно обогащают друг друга, например, научная визуализация карт цунами и землетрясений предложена на основе подхода к визуализации интерференции света [3].

Одна из основных задач фотореалистической компьютерной графики – получать (рассчитывать, выполнять рендеринг) изображения виртуальных компьютерных 3D сцен при помощи виртуальной камеры [4]. Здесь виртуальная сцена – это компьютерное представление или модель сцены реального мира с той степенью подробности и деталей геометрии и оптических материалов, на которые рассчитан рендер. Соответственно виртуальная камера – это компьютерная модель регистрирующего изображения устройства: фотокамеры, сканера, глаза. Камера является неотъемлемой частью конструкции рендера. Если в конструкции рендера не учитываются какие-либо особенности взаимодействия света с объектами, то эти особенности не будут отражены на рассчитанном изображении. Фотореалистическая компьютерная графика, исходя из названия, в первую очередь ориентирована на расчет изображений виртуальных сцен, которые сравнимы с фотографиями реальных аналогов этих сцен. Достигается это за счет все более полного учета физических законов взаимодействия света с материалом объектов сцены. К таким деталям можно отнести интерференцию, которая достаточно часто проявляется в нашем окружении, например, обычные радужные пятна на лужах от бензина [5].

Почему явлению интерференции не уделялось достаточного внимания в компьютерной графике: интерферируют только лучи когерентного света. По мнению авторов, в обычных 3D сценах свет, приходящий в исследуемую точку сцены разными путями, как правило, некогерентный. Цитата из [6]: «Если освещение объекта наблюдения происходит не за счет прямого солнечного света, а за счет света, рассеянного на окружающих предметах или на облаках, то отдельные точки этих предметов можно считать источниками некогерентных волн (так область когерентности для них имеет размеры 0,06 мм) ...». Таким образом, оказывалось достаточно только энергетических расчетов для отдельных лучей без учета фазы электромагнитных колебаний (учета волновой природы света). В исследуемой точке сцены энергии лучей только складывались, и не нужно было учитывать сдвиги фаз световых волн, «приносимых» в исследуемую точку сцены разными лучами.

Есть и более сложные варианты проявления интерференции – интерференционные картины *анизотропных кристаллов* [7, 8], которые можно получать при помощи фотографирования обычной фотокамерой даже в очень простой сцене: образец прозрачного анизотропного минерала (например, кальцита или кварца) между поляризаторами в полярископе [9]. В рамках данной работы сцены с оптически анизотропными объектами не рассматриваются.

В данной работе рассматривается прямое моделирование распространения линейно поляризованных лучей света в сцене с оптически изотропными объектами и средами, т. е. расчет распространения лучей света от источника до картинной плоскости. Важная характеристика алгоритма: трассировка осуществляется *линейно поляризованными лучами* «нулевой толщины» [10], т. е. лучами, которые используются в традиционных рендерах в отличие от, например, Гауссовых телесных лучей, см. [10]. Ряд вопросов сопровождается описанием проведенных компьютерных экспериментов, в которых рассматривается расчет изображений с учетом интерференции простейших сцен, содержащих оптически изотропные прозрачные объекты. Особое внимание обращается на

особенности расчета интерференционных эффектов, которые необходимо учитывать при разработке соответствующих рендеров.

В данной работе мы вообще не касаемся дифракции, которая играет значительную роль, но ее учет является очень трудоемким с вычислительной точки зрения, хотя она не всегда визуально заметна в обычных сценах.

Не так много работ было опубликовано про расчет интерференционных картин даже для сцен с объектами, специфицированными оптически изотропными материалами. При этом основное внимание посвящалось только части вопросов, возникающих при разработке рендеров. В данной работе мы предлагаем решение по следующим вопросам:

- Представление луча при рендеринге, т. е. информация, связанная с лучом, которая позволяет учесть интерференцию при расчетах.
- Расширение понятия материала объекта сцены.
- Оценка интенсивности луча на картинной поверхности.

Сделана попытка собрать основную техническую информацию в одном месте и изложить с достаточной степенью подробности. Задача авторов заключалась в освещении особенностей расчета интерференционных эффектов, которые необходимо учитывать при разработке соответствующих рендеров, а не разработка рендера как такового.

Во втором разделе рассматривается ряд существующих работ. В третьем разделе статьи кратко освещены необходимые сведения о поляризации света, о расчете интенсивности в случае двулучевой и многолучевой интерференции. Параллельно формулируются предложения к модификации понятия материала объекта, информационной нагрузки трассирующего луча, к самому рендеру, чтобы обеспечить достаточно гибкое программирование рендеринга сцен при наличии интерференции. Четвертый раздел посвящен численным экспериментам на основе классических сцен: опыт Юнга и деление амплитуды [5]. В пятом разделе предлагается подход к вычислению результирующей интенсивности в пикселе картинной плоскости, используя волновую природу света.

2. Существующие работы

Интерференционным картинам посвящено много внимания в научной, учебной и технической литературе в области оптических специальностей, например, [5–7, 11] и многие другие. Все они не имеют отношения к компьютерной графике и описывают физику возникновения тех или иных наблюдаемых картин в зависимости от материала наблюдаемого образца и его параметров. Наблюдаемые интерференционные картины служат инструментом для идентификации материала (что за минерал), оценки выпускаемой продукции (например, сахара) и много другого. Наиболее изученными оказались хорошо отшлифованные плоскопараллельные пластинки и клинья. Изучаются подробно оптические устройства типа интерферометров [5, 11, 12] и другие, поскольку они имеют большое практическое значение. Как следствие, были изучены и тонкие пленки, например, пятна бензина на воде, лакокрасочные покрытия. В основном расчеты обосновываются в малой окрестности взаимодействия луча с пластинкой или тонкой пленкой. То, каким образом получается интерференционная картина, обычно четко не формализуется. Максимум говорится, что она получается в фокальной плоскости какой-либо линзы либо в глазе, установленном на бесконечность, см., например, [5, 6] и др.

Существующие программы фотореалистического рендеринга позволяют получать изображения для сцен, в которых оптические свойства, называемые материалами (коэффициенты отражения, преломления и т. п.) объектов и источников задаются при помощи спектров в диапазоне волн видимого света 380–780 нм. При помощи так называемого спектрального рендеринга [4, 13] возможен учет явления *оптической дисперсии*, т. е. зависимости угла преломления луча света от длины волны (индекса

рефракции в среде), а, следовательно, уже можно запрограммировать иллюстрацию школьного опыта Ньютона с призмой по разложению белого света в спектр, и это демонстрируется многими современными рендерами, например, Maxwell render [14]. Спектральный рендеринг сделал возможным расчет физически корректных изображений бриллиантов, стразов, стеклянных предметов и т. п.

Фотореалистическая компьютерная графика естественно обратила внимание на явление интерференции, которое проявляется в повседневной жизни. Рассмотрим наиболее известные подходы.

В первую очередь появились работы, в которых интерференция в тонких пленках рассчитывалась на основе аналитического решения, на основе математической модели и формул, приведенных в литературе по физике. Одну из первых работ такого типа представила Диас [15]. Целая серия работ посвящена моделированию интерференции на тонких пленках, например, Гласснер [16]. При заданных параметрах осуществляется расчет требуемой картинке для сцены, состоящей из двух-трех мыльных пузырей, на основе применения соответствующих формул. К сожалению, оптическая дисперсия не учитывалась, т. к. для всех длин волн использовался один и тот же индекс рефракции. По сути, компьютерная графика в этом случае применяется на уровне вывода пикселя, линии, символа. Таким образом могут быть построены различные специализированные системы или тренажеры, но это не фотореалистическая компьютерная графика.

С позиции компьютерной графики в контексте расчета интерференции отметим работу [17], в которой было предложено осуществлять рендеринг на основе трассировки поляризованных лучей и учитывать разложение Френеля [5, 6] при расчете взаимодействия луча с поверхностью. В работе выделили особый объект в сцене – тонкая пленка, слой лака или краски. Авторы предложили параметризованную геометрическую и оптическую модель этого объекта, на основании которой выполняется расчет некоторого аналога функции отражения от объекта в зависимости от угла падающего луча с нормалью, в которой учтены интерференционные эффекты. И все взаимодействия с такими объектами осуществлялись через применение данной функции отражения. При проведении численных экспериментов авторы назначили одинаковый индекс рефракции материалу интерферирующего слоя, т. е. проигнорировали оптическую дисперсию.

Наиболее четко подход компьютерной графики был представлен и реализован в работах [18, 19], в которых также рассчитывались изображения, демонстрирующие интерференцию в тонких пленках. В более поздней работе [20] авторы при расчетах также использовали разложение поляризованного света на параллельную и перпендикулярную компоненты и применяли формулы Френеля.

Таким образом, по результатам этих работ модификацию традиционного рендера (как правило, RGB-рендера) упрощенно можно представить следующим образом: а) на интерферирующий слой или объект падает луч в обычной форме, например, в виде тройки RGB; б) переносимая лучом энергия преобразуется к спектральной форме; в) прямо внутри объекта выполняется расчет интерференции – рассчитывается выходной луч в спектральной форме; г) выполняется обратное преобразование представления выходного луча из спектрального в RGB; д) RGB-луч продолжает движение в сцене. На втором этапе (б) применяются аналитические решения для тонких пленок [18-20] или используются специальные функции отражения [17].

В работе [20] четко описан метод встраивания интерферирующих объектов (здесь пленки) в рендер Pixar's RenderMan [21], работающий на основе RGB-представления луча света.

Много работ посвящаются моделированию геометрии мыльных пузырей и ускорению расчета картин, а точный расчет интерференции носит, скорее, второстепенный характер. Вероятнее всего, цель таких работ заключается в получении радужных цветов близких к естественным, например, применение текстур в работе [22].

Мы отметили несколько представительных работ, в которых используется явление интерференции. Для большего охвата литературы читатель может посмотреть обзоры, данные в этих работах.

Отметим следующие часто встречающиеся особенности:

- Как правило, используется традиционное представление луча за исключением случаев, когда он находится «внутри» интерферирующего объекта сцены, т. е. в самой сцене луч несет только информацию об интенсивностях компонент цвета RGB.
- Четко не определяется каким образом задаются оптические характеристики интерферирующего объекта, т. е. не вводятся спецификации материала.
- В упомянутых работах ничего не говорится о камере или о картинной плоскости. С точки зрения рендера всей сцены луч в принятом формате передается в модуль, осуществляющий трассировку внутри объекта, возможно, для расчета интерференции, и на выходе получает лучи в таком же формате.
- При проведении численных экспериментов нередко игнорируется оптическая дисперсия.
- В большинстве случаев гарантируется получение радужных цветов, которые делают картину реалистичной, но не являются физически корректными.

Есть совершенно отличный подход, опирающийся на физическую оптику, т. е. учитывающий волновую природу света. В работе [10] предлагается осуществлять трассировку не традиционных лучей нулевой толщины, а комплексную трассировку на основе Гауссовых сферических волн или Гауссовых пучков (beams). В работе ограничиваются параксиальными лучами, что часто достаточно при разработке моделей микроскопов, объективов и т.п. Предлагалось много алгоритмов рендеринга (см. [4]), которые вместо математического луча нулевой толщины применяли более телесные объекты для трассировки: конус, пучок лучей (beam), карандаш (пучок с центральным лучом). Все они не прижились для реалистичного и достаточно быстрого рендеринга сложных сцен. Авторы считают, что весь рендер построить на основе Гауссовых пучков нереально даже в ближайшем будущем, несмотря на развитие вычислительной техники. Дорого и долго. А для оптических систем, когда небольшое количество элементов располагается центрировано вдоль одной оси, вполне реализуемо.

В данной работе мы предлагаем подход к модернизации фотореалистического спектрального рендера для того, чтобы более физически корректно моделировать явление интерференции света. Как правило, учет интерференции невозможен без рассмотрения поляризации света и, таким образом, нам придется модернизировать представление луча света, введя параметры состояния его поляризации. С другой стороны, необходимо более точно специфицировать материал объекта, как совокупность его оптических свойств.

Достаточно обширный обзор работ, посвященных рендерингу лучом поляризованного света и рендерингу на основе применения поляризованного луча оптически анизотропных прозрачных материалов дан в работе [23]. Алгоритмы взаимодействия линейно поляризованного света с прозрачными оптически изотропными и анизотропными объектами рассматривались в работах [2, 24 – 27].

Различные аспекты рендеринга полезные для расчета интерференционных картин освещались в ряде докладов на конференциях: разработка математической модели поляризованного луча [22, 28, 29]; о взаимодействии поляризованного света с изотропными линзами [30].

Без учета поляризации можно смоделировать физически корректно только опыт Юнга по делению фронта волны [5] или подобные ему, когда свет от источника до экрана (глаза) не испытывает отражений и преломлений на поверхностях сцены в связи с их отсутствием, а значит, свет не поляризуется даже частично.

О достоверности и физической корректности разработанных алгоритмов. В основном алгоритмы визуализации интерференционных эффектов полагаются на кор-

ректное применение физических законов и формул. Для алгоритмов фотореалистического рендеринга в компьютерной графике был предложен подход к подтверждению достоверности и физической корректности работы алгоритмов рендеринга в проекте CornellBox [31]. Были приготовлены две «идентичные» сцены: очень простая реальная, состоящая из нескольких кубиков, покрашенных в диффузные цвета; виртуальная в компьютере. Фотография сцены сравнивалась попиксельно с изображением, синтезированным виртуальной камерой на основе расчета по методу излучательности (radiosity). Аналогично в работах [26, 32] демонстрировалась достоверность работы на основе попиксельного сравнения фотографии и результата алгоритма взаимодействия лучей света с прозрачными анизотропными объектами на примере выпуклого шестигранника из кальцита. Отметим, что возможно экспертное подтверждение достоверности (визуальной достоверности), когда фотографию и синтезированное изображение оценивает наблюдатель, как например, в работе [25], демонстрирующей моделирование двойного лучепреломления.

В упомянутых выше разработках алгоритмов моделирования и расчета интерференции аналогичных тестов не приведено, а получены расчетные изображения за счет интерференции или в связи с оптической дисперсией – не очевидно. В работе [33] авторы отмечают, что источниками радужных цветов могут быть: дифракция (CD диски), интерференция (масляные пятна, пленки), дисперсия (разложение света призмой), рассеивание (радуга), т. е. четыре различных оптических механизма. Более того, наблюдатель может подумать, что предъявляемый ему рисунок рассчитан без учета возможных интерференционных эффектов, а, например, это расчет каустик как в работе [34]. Другими словами, прежде чем продемонстрировать синтезированное изображение, хорошо бы подготовить читателя, описав детали сцены и исключив влияние оптической дисперсии и других явлений. По нашему мнению, наиболее правдоподобные и обязательные демонстрации интерференции – это расчеты изображений для сцен с монохромными источниками.

3. Поляризация света и интерференция

Подчеркнем, что в волновой оптике, в отличие от геометрической оптики, термин «луч» употребляется для краткости обозначения направления распространения световой энергии. В дальнейшем этот термин будет употребляться без кавычек.

3.1 Поляризация

Поляризация луча света – это характеристика, описывающая поведение вектора электрического поля в плоскости, перпендикулярной направлению распространения луча. Поляризация может быть линейной, круговой или в общем случае эллиптической [5]. Каждая электромагнитная волна в отдельности полностью поляризована. Под лучом мы понимаем квазимонохромный луч света как совокупность волн, распространяющихся по одной прямой и имеющих одну длину волны [5]. Он может быть полностью поляризован, частично поляризован или не поляризован вообще в зависимости от степени корреляции колебаний отдельных волн в луче.

Отметим следующие важные для расчетов особенности согласно [5]:

- Волна естественного (неполяризованного) света интенсивности I эквивалентна двум *независимым* линейно поляризованным волнам с интенсивностью каждой, равной $I/2$, и электрическими векторами, колеблющимися в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, нормальных к направлению распространения.
- Частично поляризованный свет можно представлять в виде суммы полностью неполяризованной и полностью поляризованной частей, не зависящих друг от друга.

- Две волны, поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях, не интерферируют.
- Лучи с круговой и эллиптической поляризациями могут быть представлены в виде комбинации линейно поляризованных лучей. Тогда без ограничения общности можно проводить расчет на основе полностью поляризованных лучей, более того, только линейно поляризованных лучей.

Для описания и расчета состояния поляризации существует несколько математических конструкций (подходов): векторы Джонса и матрицы Джонса, векторы Стокса и матрицы Мюллера, матрицы когерентности и их модификаторы, см. подробнее [5, 26, 35, 36]. В работах [2, 26, 27] успешно применялось представление поляризации на основе *матриц когерентности*. Это представление позволяет описывать естественный (неполяризованный), частично поляризованный и полностью поляризованный свет, что вполне достаточно для решавшихся задач. Матрицы когерентности, как и остальные представления, *не хранят фазу электромагнитного колебания* или оптический путь луча, в связи с чем для интерференции ни одно из представлений нельзя назвать подходящим больше, чем другие.

Отметим, что в любом представлении поляризации при падении луча на поверхность существуют четкие процедуры расчета параметров отраженного и преломленного лучей.

3.2 Спектральный рендеринг

Полагаем, что модифицируемый рендер выполняет расчет изображений в режиме спектрального рендеринга [4, 13]. В рамках данной работы нам безразлично какая именно трассировка лучей применяется в рендере для расчетов: прямая, обратная рекурсивная типа Виттеда [37], трассировка с картами освещенности или с фотонными картами. В любом случае сбор энергии производится, начиная от источника. Правда, в случаях применения карт они сами должны рассматриваться в качестве вторичных источников наравне с исходными, т. к. никакая информация о когерентности в них не содержится, либо карты также надо модернизировать.

Свет представляет совокупность волн из некоторого (как правило непрерывного) интервала длин электромагнитных волн и представляется спектром $S_c(\lambda)$, что, по сути, кривая. Возможны случаи, когда график спектра имеет четкие пики, часто их рассматривают отдельно. При спектральном рендеринге на первом этапе производится дискретизация и формируется дискретный спектр, с нужной точностью приближающий кривую $S_c(\lambda)$ как набор k отсчетов $Sd = \{ \langle w_1, A_1 \rangle, \dots, \langle w_k, A_k \rangle \}$, здесь A_i – амплитуда колебаний электрической компоненты для волны длиной w_i . В этот же набор включаются и пики, если есть. В рамках данной работы рассматриваются объекты, которые при взаимодействии со световой волной не меняют ее длины, т. е. подавляющее большинство объектов реального мира. Конечно, остаются неохваченными, например, флуоресцирующие материалы, для учета которых надо будет проводить дальнейшее уточнение математической модели.

Далее по тексту статьи все формулы, если не нет специальной оговорки, рассматриваются для монохроматического света, длина волны которого в вакууме – λ .

Весь процесс расчета производится по каждой длине волны из набора Sd поотдельности, формируя, таким образом, k монохромных картин. В финале процесса осуществляется формирование результирующего изображения на основе частных монохромных – этап преобразования цвета из спектра в RGB (*tone reproduction*) [13, 38].

3.3 Когерентность

Интерферируют только когерентные лучи. На величину интенсивности в точке встречи этих лучей в сцене (на картинной плоскости) влияет *разность хода* (разность *оптических путей*), с которой эти лучи встречаются. В данной разработке мы считаем, следуя [5], *когерентными* лучи, которые изначально были испущены одной точкой (малой окрестностью) какого-либо из источников сцены, а затем разными путями достигли исследуемой точки.

В [39] приводятся способы получения когерентных волн *для проведения натуральных экспериментов*, а именно: «Получение волн для реализации интерференции в оптике осуществляется двумя способами 1) делением амплитуды волны 2) делением фронта волны». В численных экспериментах будут рассмотрены эти приемы на основании классических опытов.

В [5, 6] отмечается, что интерференционная картина исчезает, если разность хода превысит *длину когерентности*. В связи с тем, что мы наблюдаем интерференционные картины, значит, в такой реальной сцене эта длина не превышена. Тем не менее, не будем игнорировать это правило, а дадим пользователю возможность управлять значением параметра *длина когерентности* – свое для каждого источника.

Для большей гибкости при разработке виртуальных 3D сцен мы предлагаем следующим образом управлять когерентностью лучей:

- Каждый луч имеет атрибут *пройденного оптического пути* и атрибут *когерентности*. Последний определяет уникальную точку (окрестность) источника, породившей данный луч. Он может быть числовой или мнемонический. Если два луча имеют идентичные значения атрибута когерентности (т. е. источника), то они когерентны. Пусть значение ноль означает, что когерентность не определена, т. е. луч не когерентен никакому другому.
- Каждый источник имеет атрибут *длина когерентности*. Если луч, порожденный этим источником, прошел путь больше заданного значения, то в дальнейшем распространении по сцене он будет «некогерентным» для всех других лучей, т. е. атрибуту *когерентности* присваивается ноль.
- При преломлении или отражении луча при его взаимодействии с поверхностью сцены пользователь имеет возможность управлять когерентностью порожденных (отраженных, преломленных) лучей, обоими сразу или поотдельности: а) они наследуют значение атрибута; б) теряют когерентность. Для каждой поверхности сцены можно задавать свои правила. А это значит, что мы должны *расширить число атрибутов в понятии материал объекта*, добавив упомянутые средства управления данными, связанными с лучом.

Примечание: если источник изначально генерировал неполяризованный свет, то вместо одного луча генерируется два (см. выше), и каждый из них имеет свой уникальный атрибут когерентности, т. к. они независимы.

3.4 Интерференция двух когерентных лучей

Пусть в исследуемую точку сцены P приходят две волны, испущенные одним источником, и пусть они линейно поляризованы и когерентны. Их электрические векторы \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 соответственно. Эти волны можно записать в виде $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\phi}$, где ϕ – фаза, а \mathbf{E}_0 – векторная амплитуда. Для фотографии важна электрическая компонента электромагнитной волны, поскольку приходящая интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды этой волны, поэтому мы будем рассматривать только эту компоненту, т. е. $I = c \cdot \mathbf{E}_0^2$, где c – некоторый коэффициент. В дальнейшем не будем делать различия между интенсивностью и квадратом амплитуды, т. к. это не влияет принципиально на изложение и расчетные алгоритмы. Результирующее электрическое поле [5] в рассматриваемой точке сцены – вектор

$$\mathbf{E}_{\Sigma} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2, \quad (1)$$

тогда

$$\mathbf{E}_{\Sigma}^2 = \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1\mathbf{E}_2. \quad (2)$$

Суммарная интенсивность I выражается через интенсивности обеих волн как

$$I = I_1 + I_2 + J_{12}, \quad (3)$$

где последнее слагаемое – это *интерференционный* член.

В литературе [5, 11 и др.] сразу начинают рассматривать наиболее важный случай для практики, когда обе волны распространяются почти по одной прямой либо попадают в интересующую точку P с близких направлений. А в работе [17] предполагается, что у них совпадают плоскости поляризации. В этих условиях интенсивность в точке P считается по формуле

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (4)$$

где δ – это разность фаз двух электрических полей в P . Для простоты считаем, что оба луча покинули источник света с нулевой фазой. Пусть луч (точнее путь) прошел от источника до точки расстояние длиной L_1 в среде с показателем индекса рефракции n_1, \dots , расстояние длиной L_k в среде с показателем n_k , тогда пройденный им оптический путь вычисляется по формуле $s = \sum_{i=1}^k n_i L_i$, а фаза при этом изменилась на $\phi = 2\pi s / \lambda$. Два рассматриваемых луча прошли оптические пути s_1 и s_2 . Тогда разность фаз только за счет разности оптических путей равна $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (s_1 - s_2)$.

3.5 Интерференция нескольких когерентных лучей

Рассмотрим случай, когда в точке сходится больше двух лучей. Тогда надо обратиться к исходной формуле (1) для определения результирующего значения вектора электрического поля. Сходящиеся в точке лучи могут представлять некоторое количество q групп *взаимно когерентных лучей*. Тогда результирующее поле можно представить в виде суммы q *независимых (взаимно некогерентных) полей*:

$$\mathbf{E}_{\Sigma} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_q, \quad (5)$$

а искомая интенсивность

$$\mathbf{E}_{\Sigma}^2 = \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + \dots + \mathbf{E}_q^2$$

или

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + \dots + I_q. \quad (6)$$

Обратимся к вычислению отдельных слагаемых интенсивности – интенсивностей, приносимым отдельными группами когерентных лучей. Пусть в группе $g = 1..q$ t лучей. Именно здесь начинает играть роль фаза пришедшей волны. В случае произвольных сцен векторы $\mathbf{E}_{gj}, j = 1..t$ могут иметь произвольное направление, поэтому раскрывать скобки как в формуле (2) не имеет смысла. В работе [40] была создана целая структура данных для группирования приходящих в точку лучей по почти совпадающим направлениям. Затем вычислялась сумма попарных частных интерференционных членов внутри таких групп. При этом могла потеряться интерференция когерентных лучей, приходящих по сильно отличающимся направлениям. В работе [17] сразу ограничили случаем, когда интерферирующие лучи приходят по совпадающим направлениям и имеют одинаковые плоскости поляризации, т. е. применялась формула (4). В работах [18, 19] расчеты строились на алгоритме деления амплитуды [5] и применении формулы (4).

В нашем подходе в расчетах предлагается применять прямое вычисление сначала поля \mathbf{E}_g этой группы, после чего вычислять интенсивность простым возведением амплитуды в квадрат, т. е. согласно определению. Вспоминаем, что j -й луч приходит в точку P с величиной вектора $\mathbf{E}_j = \mathbf{E}_{j0} e^{i\phi_j}$, где ϕ_j – это фаза, которая считается через пройденный лучом оптический путь согласно алгоритму, данному выше. Тогда

$$\mathbf{E}_g = \mathbf{E}_{10} e^{i\phi_1} + \mathbf{E}_{20} e^{i\phi_2} + \dots + \mathbf{E}_{t0} e^{i\phi_t}.$$

Отметим, что каждое слагаемое здесь – это вектор в пространстве. На рис. 1 показан вектор результирующего электрического поля в разных точках сцены, где встречаются три одни и те же когерентные луча: слева для точки P_1 – $\mathbf{E}_g(P_1) = \mathbf{E}_{10} e^{i\phi_1(P_1)} + \mathbf{E}_{20} e^{i\phi_2(P_1)} + \mathbf{E}_{30} e^{i\phi_3(P_1)}$, а справа для точки P_2 – $\mathbf{E}_g(P_2) = \mathbf{E}_{10} e^{i\phi_1(P_2)} + \mathbf{E}_{20} e^{i\phi_2(P_2)} + \mathbf{E}_{30} e^{i\phi_3(P_2)}$. Для простоты изображен плоский случай. Векторы полей разных лучей обозначены сплошными стрелками разных цветов, результирующий вектор черным цветом. Вспомогательное построение для сложения векторов сделано пунктиром. Из чертежа видно, что длина результирующего вектора может существенно меняться от точки к точке, и соответственно интенсивность – квадрат длины. Аналогичные построения можно найти в книгах [11, 41] в другом контексте – при построении дифракционных картин.

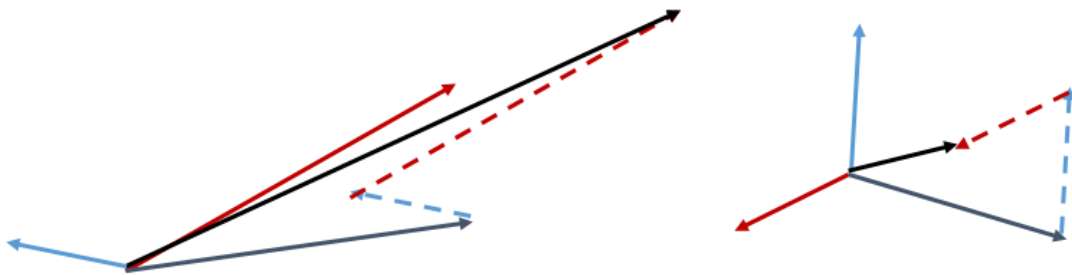


Рис. 1. Расчет вектора результирующего электрического поля (черный) в двух точках сцены.

3.6 Скачки фазы при отражении

Для того чтобы правильно рассчитать текущую фазу, информации об оптическом пути недостаточно. Необходимо рассмотреть также скачкообразные изменения фазы при отражении света на границе Γ двух прозрачных изотропных сред с индексами рефракции n_1 и n_2 . В [5, 18] говорится, что при отражении от среды с большим индексом рефракции фаза сдвигается на π :

$$\phi_{new} = \phi_{old} - \pi, \text{ if } n_1 < n_2 \quad (7)$$

Как правило, такая трактовка делается при рассмотрении лучей неполяризованного света. Но в дальнейшем рассматривается более тонкий подход. Для описания взаимодействия луча с Γ , как правило, применяются формулы Френеля, см. [5, 6, 20, 30], для чего у падающего луча даже поляризованного света вектор электрического поля \mathbf{E} в общем случае надо разложить на две компоненты, поляризованные перпендикулярно \mathbf{E}_\perp и параллельно \mathbf{E}_\parallel плоскости падения. Плоскость падения определяется падающим лучом и нормалью к поверхности. В случае нормального падения, когда эти векторы коллинеарны, такого разделения на компоненты не производится.

Итак, пусть на границу двух прозрачных сред падает полностью линейно поляризованный луч с электрическим вектором \mathbf{E} . Обозначим α – угол падения, γ – угол преломления, β – угол Брюстера, т. е. $\operatorname{tg}\beta = n_2 / n_1$. Раскладываем \mathbf{E} на две компоненты: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\parallel} + \mathbf{E}_{\perp}$ – одна лежит в плоскости падения, другая перпендикулярна ей. Аналогичное разложение делаем для векторов $\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_{r\parallel} + \mathbf{E}_{r\perp}$ отраженной и $\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_{t\parallel} + \mathbf{E}_{t\perp}$ преломленной волн. Формулы Френеля позволяют найти соотношения между амплитудами падающей, отраженной и преломленной волн:

$$\frac{E_{r\perp}}{E_{\perp}} = -\frac{\sin(\alpha - \gamma)}{\sin(\alpha + \gamma)}, \quad \frac{E_{t\perp}}{E_{\perp}} = \frac{2 \cos \alpha \sin \gamma}{\sin(\alpha + \gamma)},$$

$$\frac{E_{r\parallel}}{E_{\parallel}} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \gamma)}{\operatorname{tg}(\alpha + \gamma)}, \quad \frac{E_{t\parallel}}{E_{\parallel}} = \frac{2 \cos \alpha \sin \gamma}{\sin(\alpha + \gamma) \cos(\alpha - \gamma)}.$$

В случае нормального падения луча исчезает деление на компоненты и формулы преобразуются к следующим:

$$\frac{E_r}{E} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad \frac{E_t}{E} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}.$$

Выделяется случай полного внутреннего отражения, который также необходимо специально отслеживать, здесь

$$E_{r\parallel} = E_{\parallel}, \quad E_{r\perp} = E_{\perp}.$$

С учетом углов падения α и Брюстера β на границе Γ корректируется фаза для отраженного и преломленного лучей по следующим правилам:

- При преломлении падающий и преломленный лучи софазны.
- \mathbf{E}_{\perp} : при отражении фаза меняется на $-\pi$, если $n_1 < n_2$. (8)
- \mathbf{E}_{\parallel} : при отражении фаза меняется на $-\pi$, если

$$n_1 < n_2 \wedge \alpha < \beta \vee n_1 > n_2 \wedge \alpha > \beta. \quad (9)$$

Для случая полного внутреннего отражения применяются более сложные выражения для скачка фазы [42]:

$$\delta_{\parallel} = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\sin^2 \alpha - n_{21}^2}}{n_{21}^2 \cos \alpha} \right) - \pi, \quad \delta_{\perp} = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\sin^2 \alpha - n_{21}^2}}{\cos \alpha} \right)$$

После применения формул Френеля формируем результирующие порожденные лучи, складывая их координатные компоненты.

3.7 Полная информационная нагрузка трассирующего луча линейно поляризованного света

При расчете изображений фактически осуществляется трассировка лучей от источника. Введем *луч линейно поляризованного света с атрибутами*

$$R = \{P_0, \mathbf{dir}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, Atr\},$$

здесь: математический луч $\{P_0, \mathbf{dir}\}$ и связанная с ним правосторонняя система координат $\{\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{dir}\}$, P_0 – начало луча, \mathbf{dir} – направление. Atr – набор значений атрибутов. К этой системе координат привязана матрица когерентности данного луча, т. е. определены его поляризация и интенсивность. Луч, встречая поверхность сцены, порождает новые лучи (отраженный и преломленный). В данной реализации мы выбрали систему координат так, чтобы колебания электрического вектора происходили

по оси X . Рассмотрим, какой набор атрибутов мы считаем достаточным для расчета изображений с учетом интерференции:

- λ – длина волны света. В п. 3.2 говорилось, что для спектрального рендеринга используются только монохромные лучи.
- $Light_{id}$ – идентификатор породившего луч точечного источника света или дифференциальной площадки площадного источника. Считается, что программа умеет назначать уникальные идентификаторы числовые или текстовые. Пусть значение ноль означает, что на дальнейшем своем пути данный луч не будет когерентным ни с каким другим лучом. Два луча когерентны, если их идентификаторы источника ненулевые и совпадают.
- SC_{max} – предельная длина когерентности.
- M_{hg} – матрица когерентности 2×2 . Интенсивность $I(\lambda)$ считается через след матрицы.
- Op – оптический путь, пройденный от источника, по которому рассчитывается текущая фаза электромагнитной волны.
- \sum_{δ} – скачок фазы, накопленный при отражениях.

Порожденные лучи (отраженный и преломленный) наследуют часть атрибутов либо они пересчитываются во время контакта порождающего луча с поверхностью сцены.

Для учета интерференции рендер можно модифицировать следующим образом:

- Разделить все лучи, пришедшие в точку экрана, по группам взаимной когерентности.
- В рамках отдельной группы для каждого луча определить окончательную фазу и вектор электрического поля.
- Получить результирующий вектор для каждой группы.
- Сложить квадраты длин результирующих векторов групп лучей.
- Интенсивность посчитана.

Таким образом, все вычислительные особенности алгоритма учета интерференции в 3D сцене с оптически изотропными объектами определены, переходим к численным экспериментам, иллюстрирующим отдельные положения.

4. Интерференция в сцене с изотропными объектами, эксперименты

4.1 Опыт Юнга

Опыт Юнга – это эксперимент с *делением волнового фронта* [5]. Параллельный пучок монохроматического света падает на экран A с небольшим отверстием. Пройдя через отверстие, свет доходит до второго экрана B , в котором проделаны две щели S_1 и S_2 на расстоянии d друг от друга. Когерентные пучки, излучаемые каждой из щелей, интерферируют на третьем экране C (картинная плоскость), отстоящем от экрана B на l . На рис. 2 показана схема опыта.

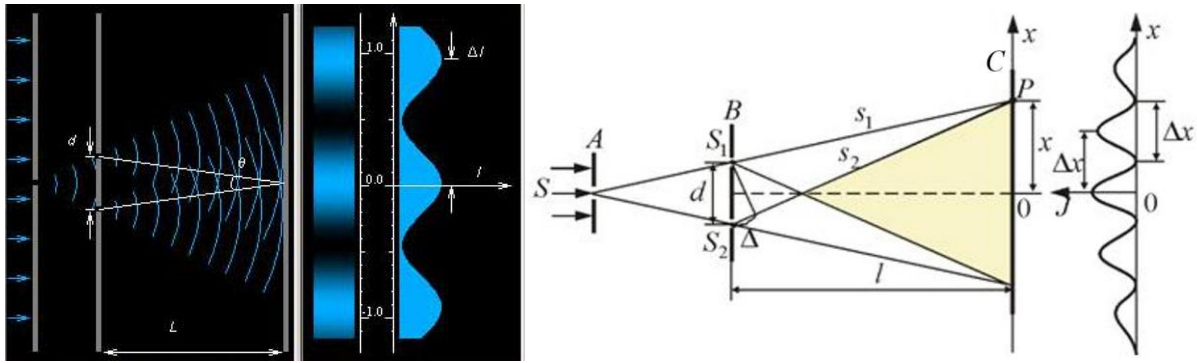


Рис. 2. Опыт Юнга, иллюстрация из [43].

Построим 3D сцену для трассировки лучей и расчета изображения на экране C : а) монохромные когерентные источники света S_1 и S_2 в виде тонких вертикальных параллельных линий; б) экран C , на котором получается изображение; s_1 и s_2 – пути лучей до точки P . Полагаем индекс рефракции среды, равным 1 и $l \gg d$, как и требуется в [5].

Правое изображение на рис. 3 рассчитано на основе формулы (4) при следующих параметрах: $\lambda = 550e^{-9}$; $d = 500 \cdot \lambda$; $l = 1000 \cdot d$.

Действительно, в сцене лучи света не пересекают ни одной границы, а, значит, правила коррекции фазы при отражениях применять не надо.

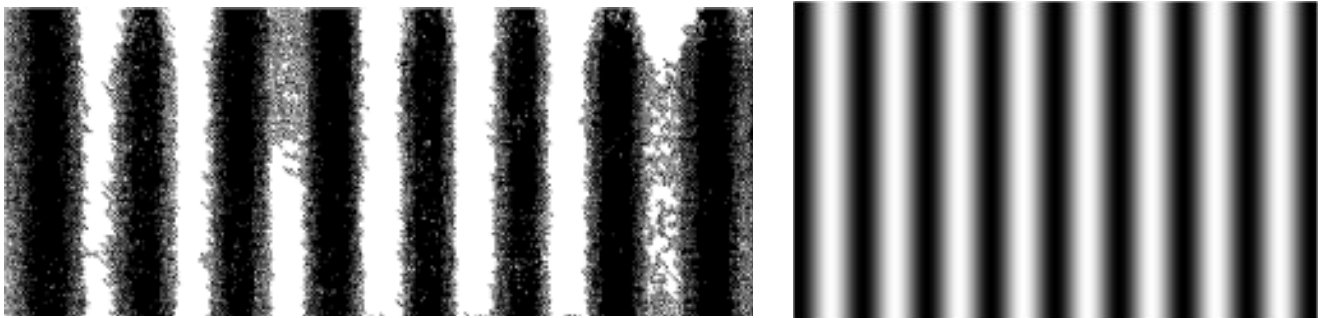


Рис. 3. Слева: фотография результата опыта Юнга из [5], справа: результат численного эксперимента из [28].

4.2 Деление амплитуды

Второй самый популярный опыт для демонстрации интерференции – это эксперимент с *делением амплитуды* (метод Френеля) [5]. В работе [28] моделировался вариант этого опыта согласно сцене, показанной на рис. 4 слева. Точечный источник генерирует когерентные монохромные лучи неполяризованного света. Ширма *Shield* предохраняет прямое попадание лучей на экран (изображение) *Screen*, отраженный луч r_0 экранируется ширмой. На экран попадают только лучи, взаимодействующие с плоскопараллельной пластинкой *Transparent plate*. При этом в целевую точку экрана P приходят два луча: r_1 – луч, отраженный от верхней границы пластинки, и r_2 – луч, отраженный от нижней ее границы. Другими словами, вычислялась интерференция лучей r_1 и r_2 , амплитуды которых были получены делением амплитуды *разных исходных лучей* из источника. Но они когерентны, т. к. один источник, и полученные картины физически корректны. Такая постановка опыта объясняется тем, что не требовалось дополнительных устройств, чтобы свести интерферирующие лучи в одну точку экрана.

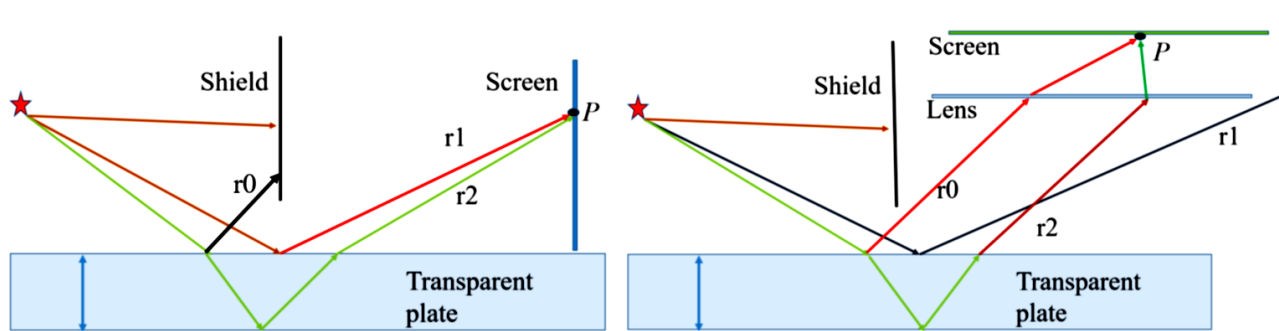


Рис. 4. Слева сцена из работы [28], справа: сцена, соответствующая более распространенному описанию опыта деления амплитуды [5].

В литературе этот опыт (см. [5] и др.) чаще всего объясняется для сцены, изображенной на рис. 4 справа. Здесь для сведения в одну точку экрана интерферирующих лучей требуется добавить линзу *Lens*, фокальной плоскостью которой является регистрирующий экран *Screen*. Луч r_1 , который был использован в работе [28], в данной сцене пролетает мимо линзы и не попадает в экран.

Проводим серию экспериментов. На рис. 5 представлено изображение, которое рассчитывается при спектральном рендеринге большинством существующих рендеров, так как в расчет берется только сумма интенсивностей $I_1 + I_2$, приходящих по двум лучам, без учета когерентности.

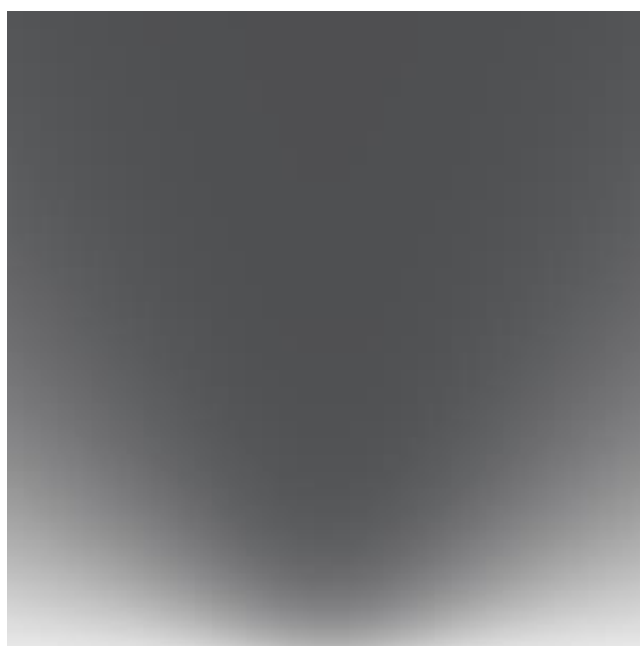


Рис. 5. Расчет изображения без учета когерентности.

На рис. 6 слева учтена когерентность, применена формула (4), разность фаз вычисляется только на основе разности оптических путей. Учтем скачок фазы при отражении луча r_1 от более плотной среды (рис. 6 справа). Видно, что картинка изменилась: цветные полосы как-бы сдвинулись.

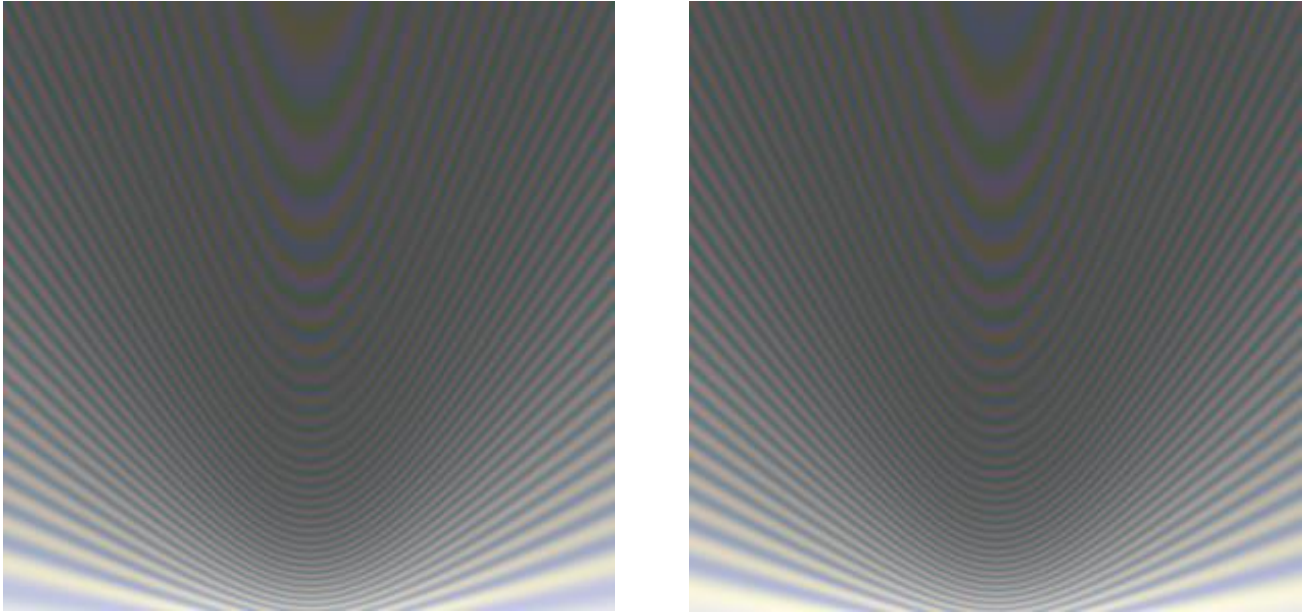


Рис. 6. Слева: учтена когерентность и разность фаз только на основе разности оптических путей, расчет по формуле (4); справа: расчет с учетом скачка фазы на π при отражении.

Теперь рассчитаем изображение, используя формулы Френеля, предварительно представив луч неполяризованного света в виде суммы лучей, поляризованных параллельно плоскости падения и перпендикулярно ей $R = R_{\parallel} + R_{\perp}$, и учтем формулы (8) и (9). Согласно теории интенсивность в точке P вычисляется простым суммированием двух интенсивностей $I = I_{\parallel} + I_{\perp}$, см. рис. 7 справа.

Разность между двумя изображениями рис. 7 имеет следующие показатели в формате RGB: всего пикселей 810000; число различающихся пикселей: 79041; максимальная разность (r+g+b) = 60 в (12, 42); максимальная покомпонентная разность (r | g | b) 31 в (10, 49). То есть разность – это почти черное изображение. Получается, что более грубая модель рис. 7 слева в ряде случаев дает вполне приемлемое изображение. На рис. 8 приведена усиленная разность (histogram stretch), чтобы видеть места, соответствующие максимальным расхождениям. Такое несовпадение, скорее всего, связано с тем, что для рис. 7 слева все лучи обрабатывались по правилам для лучей с перпендикулярной поляризацией R_{\perp} , и влияние угла Брюстера на R_{\parallel} не учитывалось, см. формулу (9). Примечательно, что темная «параболическая» полоса на рис. 8 располагается в окрестности угла Брюстера.

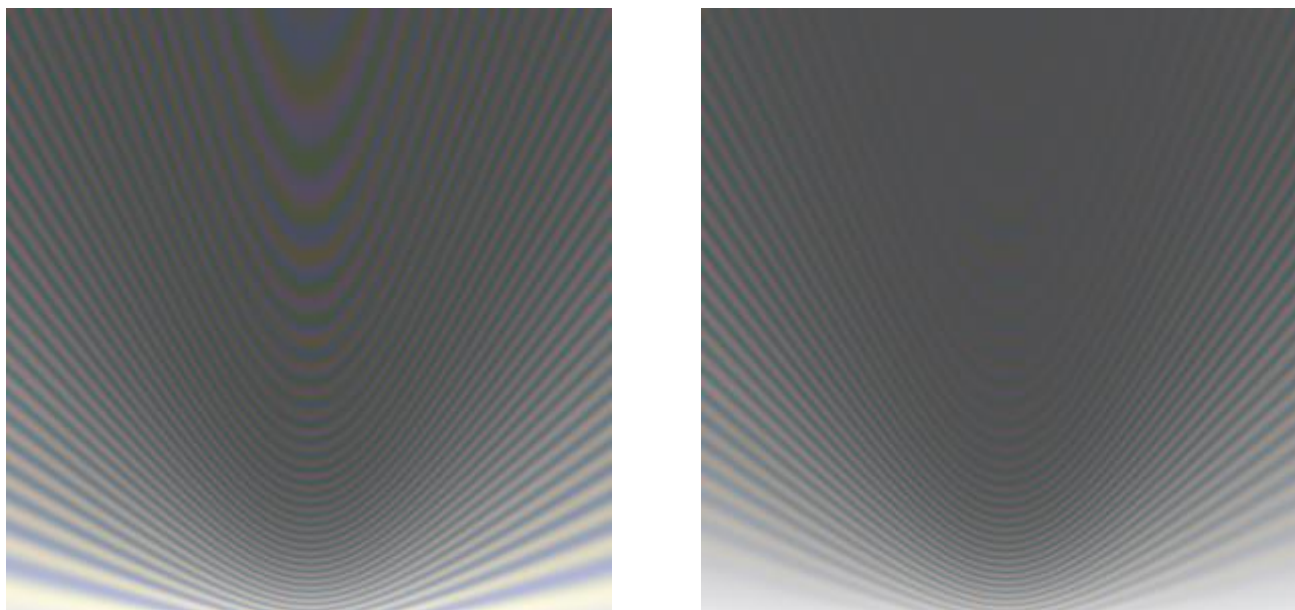


Рис. 7. Слева: правое изображение с рис. 6; справа: изображение, рассчитанное на основе разложения $R = R_{\parallel} + R_{\perp}$.

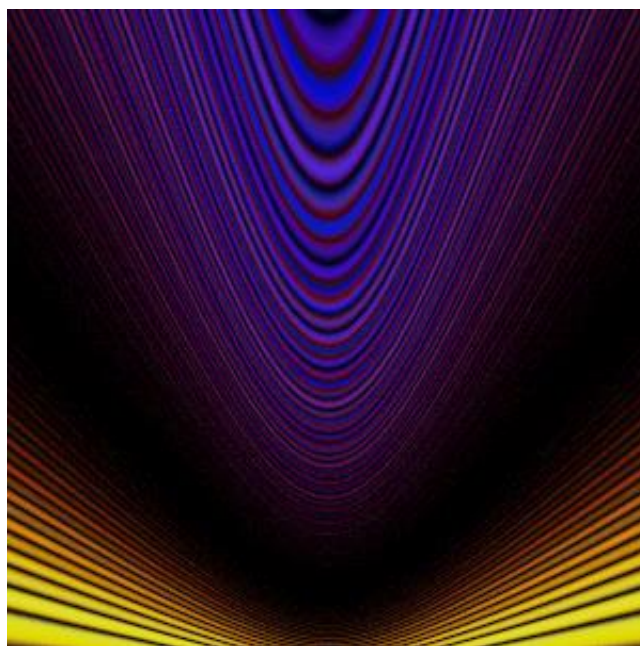


Рис. 8. Усиленная разность изображений, приведенных на рис. 7.

5. Заключение

Во многих опытах (как показано на компьютерном моделировании опыта Юнга) и при моделировании оптических устройств подход без учета угла Брюстера вполне достаточен, что видно и по изображениям. Особенно, если учесть, что углы падения в основном около нуля, или отражение вообще игнорируется. В наших экспериментах оказалось также, что при использовании разложения Френеля перпендикулярная компонента дает более весомый вклад в изображение по сравнению с параллельной. Необходимо также учитывать, что интенсивность луча от точечного источника убывает как квадрат расстояния. В экспериментах это опущено, поскольку основное внимание уделяется тому, как учет поляризации или правильный подсчет сдвига фазы сказываются на изображении интерференции, и, в конечном счете, пользователь может выбрать подходящий ему вариант.

Сравнивая рассчитанные с различной степенью физической корректности изображения, можно сказать, что любое из них вполне удовлетворяет требованиям фотореализма, предъявляемым в тех работах, которые ориентированы на получение более богатой палитры (радужных цветов).

Обратимся к рис. 4. Все численные эксперименты проведены для левой сцены. Эксперименты модельные, здесь точно рассчитаны приходящие от источника в точку P лучи, а значит, точно рассчитаны их фазы. Более сложная задача возникает при разработке рендера, который должен учитывать возможную интерференцию. Рендер строит изображение на некоторой картинной плоскости, состоящей из пикселей. В процессе блуждания по сцене когерентные лучи – два или больше – попадают в некоторый пиксель или субпиксель. Но пиксель – это не точка! Тем не менее, одно из возможных решений – это рассчитывать интерференцию для всех когерентных лучей, попавших в пиксель. Авторы этой статьи предполагают, что именно эта проблема являлась причиной игнорирования оптической дисперсии в упомянутых в разделе 2 экспериментах других авторов. Во введении упоминался подход [10]: осуществлять трассировку не математическими, а «телесными», лучами. Такое решение драматически повысит трудоемкость расчетов для произвольных сцен, и сделает учет интерференции неприемлемым в практическом плане из-за высокой вычислительной сложности даже в ближайшем будущем, несмотря на развитие вычислительной техники. По аналогичной причине не вошли в практику алгоритмы, основанные на трассировке конусом, карандашом и т. п. вместо математического луча.

Правая сцена на рис. 4 включает линзу Lens, которая привносит определенные трудности в расчет: оптическая дисперсия, сферическая абберация и др. По сути, для этой сцены необходимо решать проблему в целом. Наблюдение глазом часто моделируется с использованием системы линз.

В заключение мы отметим, что данная проблема требует отдельного исследования, которое входит в наши ближайшие планы.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (0315-2019-0001).

Список литературы

1. Бондарев А. Е. О задачах визуализации в обобщенном вычислительном эксперименте / Научная визуализация, 2019, том 11, № 2, с. 156–162, 2019, DOI: 10.26583/sv.11.2.12
2. Debelov V. A., Kozlov D. S. Visualization of light polarization to debug ray tracing algorithms // Scientific Visualization, vol. 5, № 5, 2013, p. 71–87.
3. Xiaoru Y., Minh N., Yingchun L., et al. Tsunami and Earthquake Visualization Inspired by Light Interference, 2006. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/228777380 Tsunami and Earthquake Visualization Inspired by Light Interference](https://www.researchgate.net/publication/228777380_Tsunami_and_Earthquake_Visualization_Inspired_by_Light_Interference). Accessed 20 Mar 2020.
4. Foley J. D. et al., Computer Graphics Principles and Practice, Second Edition, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1996.
5. Born M., Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge Univ. Press, 1980.
6. Ландсберг Г. С. Оптика. Учебное пособие: Для вузов, 6-е изд., М: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
7. Шаскольская М. П. Кристаллография. Учеб. пособие для ВТУЗов, М.: Высшая школа, 1976.
8. Bloss D. An introduction to the methods of optical crystallography, NY: Holt, Rinehart, and Winston, 1961.

9. Васильева Л. Ф., Дебелов В. А., Шелепаев Р. А. О разработке виртуального полярископа // Труды Международной научной конференции SCVRT2018, ЦарьГрад, Московская область, 20–23 ноября 2018, с. 325–332.
10. Harvey J. E., Irvin R. G., Pfisterer R. N. Modeling physical optics phenomena by complex ray tracing // Optical Engineering, Vol. 54, No. 3, 12 p., 2015, DOI:10.1117/1.OE.54.3.035105
11. Нагибина И. М. Интерференция и дифракция света: Учеб. пособие для приборостроительных вузов оптических специальностей. 2-е изд., Л: Машиностроение, 1985.
12. Новицкий Л. А. Оптико-электронные приборы для научных исследований. М: Машиностроение, 1986.
13. Devlin K., Chalmers A., Wilkie A., Purgathofer W. STAR: Tone reproduction and physically based spectral rendering // Eurographics 2002, p. 101–123.
14. Maxwell render, 2013, <http://www.nextlimit.com/maxwell/>. Accessed 20 Mar 2020.
15. Dias M. L. Ray tracing interference color // IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 11, No. 2, p. 54-60, 1991.
16. Glassner A. S. Andrew Glassner's Notebook Soap Bubbles: Part 2 // IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 20, No. 6, p. 99–109, 2000.
17. Gondek J. S., Meyer G. W., Newman J. G. Wavelength Dependent Reflection Functions // Computer Graphics (Proc.Siggraph 94), ACM Press, New York, p. 213-219, 1994.
18. Sun Y., Fracchia F. D., Calvert T. W., Drew M. S. A spectrally based framework for realistic image synthesis // Visual Computer, Vol. 17, No. 7, p. 429–444, 2001.
19. Sun Y., Fracchia F. D., Calvert T. W., Drew M. S. Deriving Spectra from Colors and Rendering Light Interference / IEEE Computer Graphics and Applications, No. 4, p. 1-8, 1999.
20. Sun Y., Wang Q. Interference shaders of thin films / Comput.Graph. Forum, Vol. 27, Iss. 6, p. 1607–1631, 2008.
21. Pixar's RenderMan, <https://renderman.pixar.com/>. Accessed 20 Mar 2020.
22. Iwasaki K. et al. Real-time rendering of soap bubbles taking into account light interference // Proceedings of Computer Graphics International Conference, CGI, p. 344 – 348, 2004.
23. Debelov V. A., Kozlov D. S. STAR: Rendering of transparent optically anisotropic objects // Conference Proceedings of Graphicon-2013, Vladivostok, Russia, pp. 50–55, 2013.
24. Guy S., Soler C. Graphics Gems Revisited // ACM Trans. Graphics, Vol. 23, No. 3, p. 231-238, 2004.
25. Weidlich A., Wilkie A. Realistic Rendering of Birefringency in Uniaxial Crystals // ACM Trans. Graphics, Vol. 27, No. 1, p. 6:1-6:12, 2008.
26. Debelov V. A., Kozlov D. S. A Local Model of Light Interaction with Transparent Crystalline Media. // IEEE Transactions on visualization and computer graphics, Vol. 19, No. 8, p. 1274–1287, 2013.
27. Kozlov D. S., Debelov V. A. Algorithm for Photorealistic Rendering of Transparent Optically Active Isotropic Crystals // Programming and Computer Software, Vol. 41, No. 5, p. 267–272, 2015.
28. Дебелов В. А. Интерференция света, изотропные прозрачные объекты, трассировка лучей // Труды Юбилейной 25-й Международной научной конференции ГРАФИКОН'2015, с. 168-173, 2015.
29. Васильева Л. Ф., Дебелов В. А. Эволюция модели луча света для рендеринга // Труды 5 й Международной конференции «Ситуационные центры и информационно-аналитические системы для задач мониторинга и безопасности – SC-IoT-VRTerro2016», Пущино, ЦарьГрад, 178–184, 2016.
30. Debelov V. A., Kushner K. G., Vasilyeva L. F. Lens for a Computer Model of a Polarizing Microscope // Mathematica Montisnigri, Vol. 41, p. 151-165, 2018.
31. Cornell Box, <http://www.graphics.cornell.edu/online/box>. Accessed 20 Mar 2020.

32. Debelov V. A., Kozlov D. S. Rendering of translucent objects, verification and validation of algorithms // Conference Proceedings of the WSCG'2012, Plzen, p. 189–196, 2012.
33. Lindsay C., Agu E. (2006) Physically-Based Real-Time Diffraction Using Spherical Harmonics // Lecture Notes in Computer Science, Vol 4291, p. 505-517, 2006.
34. Tandianus B., Johan H., Seah H. S. et al. Spectral caustic rendering of a homogeneous caustic object based on wavelength clustering and eye sensitivity // Visual Computer, Vol. 31, No. 12, p. 1601–1614, 2015. DOI: 10.1007/s00371-014-1037-z
35. O’Neil E. L. Introduction to statistical optics, Addison-Wesley, 1963.
36. Tannenbaum D.C., Tannenbaum P., Wozny M.J. Polarization and birefringency considerations in rendering. // Comp. Graphics (SIGGRAPH '94 Proceedings), ACM Press, p. 221–222.
37. Whitted T. An Improved Illumination Model for Shaded Display // Comm. ACM, Vol. 23, No. 6, p. 343-349, 1980.
38. Glassner A.S. How to Derive a Spectrum from an RGB Triplet // IEEE Computer Graphics Applications, Vol. 9, No. 4, p. 95-99, 1989.
39. Способы получения когерентных волн в оптике, <http://mash-xxl.info/page/237202153160037004017084166207088218106096019211/>. Accessed 20 Mar 2020.
40. Козлов Д. С. Алгоритм рендеринга по методу Монте-Карло петрографических шлифов одноосных кристаллов // Тр. Школы молодых ученых, Графикон-2009, Москва, 2009.
41. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика: Учебник, 2-е изд., М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004.
42. Кизель В. А. Отражение света, Наука, 1973.
43. Кузнецов С. И. Классический интерференционный опыт Юнга, <http://90oigr.net/prezentatsii/fizika/Interferentsija-voln/o19-Klassicheskij-interferentsionnyj-opyt-JUnga.html>. Accessed 20 Mar 2020.

Visualization of interference pictures of 3D scenes including optically isotropic transparent objects

V.A. Debelov¹, L.F. Vasilieva²

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS

¹ ORCID: 0000-0002-7577-4700, debelov@oapmg.scc.ru

² ORCID: 0000-0001-7278-8800, vaslud@gmail.com

Abstract

To date, only few papers are available on the calculation of interference pictures, even for scenes with objects specified by optically isotropic materials. Major attention has been given only to some questions arising in the development of renderers. In this paper, we propose some solutions to the following problems of rendering: a) representation of a ray in rendering, that is, information about the ray which allows taking into account interference in the calculations; b) expansion of the concept of scene object material; and c) estimation of ray intensity on an image surface. The main purpose is to describe the peculiarities of spectral rendering when calculating interference effects in scenes with optically isotropic objects to be taken into account in the development of corresponding renderers, rather than the development of any specific renderer.

As an algorithm for interference calculation in an isotropic medium, we consider a direct simulation: tracing by rays of linear polarized light from a source to an image plane.

The main point of the approach is that no special interfering objects such as thin films, soap bubbles, etc. are used in a scene. Images are calculated with a spectral representation of light and materials of the scene objects, but not on the basis of an RGB model. Interference is calculated at a scene point corresponding to a pixel of the image plane where coherent rays may come along unpredictable trajectories, in particular, along trajectories passing through some known interfering objects.

Keywords: interference, linear polarization, optically isotropic transparent objects, photorealistic spectral rendering, tracing of linear polarized rays, optical path, ray intensity estimate in a pixel.

References

1. Bondarev A. E. On visualization problems in a generalized computational experiment // Scientific Visualization, 2019, Vol. 11, № 2, pp. 156-162 (doi:10.26583/sv.11.2.12)
2. Debelov V. A., Kozlov D. S. Visualization of light polarization to debug ray tracing algorithms // Scientific Visualization, 2013, Vol. 5, № 5, p. 71-87.
3. Xiaoru Y., Minh N., Yingchun L., et al. Tsunami and Earthquake Visualization Inspired by Light Interference, 2006. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228777380_Tsunami_and_Earthquake_Visualization_Inspired_by_Light_Interference. Accessed 20 Mar 2020.
4. Foley J. D. et al., Computer graphics, principles and practice, 2nd ed. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1996.
5. Born M., Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Cambridge Univ. Press, 1980.
6. Landsber G. S. Optika [Optics], 6th ed. Moscow: FIZMATLIT, 2003 [in Russian].
7. Shaskolskaya M. P. Kristallografiya [Crystallography]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1976 [in Russian].

8. Bloss D. An introduction to the methods of optical crystallography. NY: Holt, Rinehartand, and Winston, 1961.
9. Vasilyeva L. F., Debelov V. A., Shelepaev R. A. O razrabotke virtualnogo mikroskopa [On development of virtual microscope] // Proceedings of Intl. Conf. SCVRT2018, Puschino, TsarGrad, Russia, November 20–23, 2018, pp. 325–332. [in Russian].
10. Harvey J. E., Irvin R. G., Pfisterer R. N. Modeling physical optics phenomena by complex ray tracing // Optical Engineering, Vol. 54, №. 3, 12 p., 2015, (DOI:10.1117/1.OE.54.3.035105)
11. Nagibina I. M. Inerferentsiya i difraktsiya sveta [Inteference and diffraction of light], 2nd ed. Leningrad: Mashinostroenie, 1985. [in Russian].
12. Novitskii L. A. Optiko-elektronnye pribory dlya nauchnyh issledovaniy [Opto-electronic devices for scientific research]. Moscow: Mashinostroenie, 1986. [in Russian].
13. Devlin K., Chalmers A., Wilkie A., Purgathofer W. STAR: Tone reproduction and physically based spectral rendering // Eurographics 2002, pp. 101–123.
14. Maxwell render, 2013, <http://www.nextlimit.com/maxwell/>. Accessed 20 Mar 2020.
15. Dias M. L. Ray tracing interference color // IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 11, № 2, pp. 54-60, 1991.
16. Glassner A. S. Andrew Glassner's Notebook Soap Bubbles: Part 2 // IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 20, № 6, pp. 99–109, 2000.
17. Gondek J. S., Meyer G. W., Newman J. G. Wavelength Dependent Reflection Functions // Computer Graphics (Proc. Siggraph'94), ACM Press, New York, pp. 213-219, 1994.
18. Sun Y., Fracchia F. D., Calvert T. W., Drew M. S. A spectrally based framework for realistic image synthesis // Visual Computer, Vol. 17, № 7, pp. 429–444, 2001.
19. Sun Y., Fracchia F. D., Calvert T. W., Drew M. S. Deriving Spectra from Colors and Rendering Light Interference // IEEE Computer Graphics and Applications, № 4, pp. 1-8, 1999.
20. Sun Y., Wang Q. Interference shaders of thin films // Comput. Graph. Forum, Vol. 27, Iss. 6, pp. 1607–1631, 2008.
21. Pixar's RenderMan, <https://renderman.pixar.com/>. Accessed 20 Mar 2020.
22. Iwasaki K. et al. Real-time rendering of soap bubbles taking into account light interference // Proceedings of Computer Graphics International Conference CGI, pp. 344 – 348, 2004.
23. Debelov V. A., Kozlov D. S. STAR: Rendering of transparent optically anisotropic objects // Conference Proceedings of Graphicon'2013, Vladivostok, Russia, pp. 50–55, 2013.
24. Guy S., Soler C. Graphics Gems Revisited // ACM Trans. Graphics, Vol. 23, № 3, pp. 231-238, 2004.
25. Weidlich A., Wilkie A. Realistic Rendering of Birefringency in Uniaxial Crystals // ACM Trans. Graphics, Vol. 27, № 1, pp. 6:1-6:12, 2008.
26. Debelov V. A., Kozlov D. S. A Local Model of Light Interaction with Transparent Crystalline Media. // IEEE Transactions on visualization and computer graphics, Vol. 19, № 8, pp. 1274–1287, 2013.
27. Kozlov D. S., Debelov V. A. Algorithm for photorealistic rendering of transparent optically active isotropic crystals // Programming and Computer Software, Vol. 41, № 5, pp. 267–272, 2015.
28. Debelov V. A. Interferenciya sveta, izotropnye prozrachnye ob'ekty, trassirovka luchey [Light interference, isotropic transparent objects, ray tracing] // Conference Proceedings of Graphicon'2015, pp. 168-173, 2015. [in Russian].
29. Vasilyeva L. F., Debelov V. A. Evolutsiya modeli luchy sveta dlya renderinga [Evolution of rendering light ray representation] // Proceed. of The International Scientific Conference of The Moscow Institute of Physics and Technology (State University) on Situational Centers and Information-Analytical System 4i Class for Monitoring and Security Tasks - SCVRT1516, November 21-24, 2015-2016, Puschino, TsarGrad, Russia, pp. 178-184. [in Russian].

30. Debelov V. A., Kushner K. G., Vasilyeva L. F. Lens for a Computer Model of a Polarizing Microscope // *Mathematica Montisnigri*, Vol. 41, pp. 151-165, 2018.
31. Cornell Box, <http://www.graphics.cornell.edu/online/box>, 1998. Accessed 20 Mar 2020.
32. Debelov V. A., Kozlov D. S. Rendering of translucent objects, verification and validation of algorithms // *Conference Proceedings of the WSCG'2012, Plzen*, pp. 189–196, 2012.
33. Lindsay C., Agu E. Physically-based real-time diffraction using spherical harmonics // *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4291, pp. 505-517, 2006.
34. Tandianus B., Johan H., Seah H. S. et al. Spectral caustic rendering of a homogeneous caustic object based on wavelength clustering and eye sensitivity // *Visual Computer*, Vol. 31, № 12, p. 1601–1614, 2015 (DOI: 10.1007/s00371-014-1037-z)
35. O'Neil E. L. *Introduction to statistical optics*. Addison-Wesley, 1963.
36. Tannenbaum D. C., Tannenbaum P., Wozny M. J. Polarization and birefringency considerations in rendering // *Comp. Graphics (SIGGRAPH '94 Proceedings)*, ACM Press. pp. 221–222, 1994.
37. Whitted T. An Improved Illumination Model for Shaded Display // *Comm. ACM*, Vol. 23, № 6, pp. 343-349, 1980.
38. Glassner A.S. How to Derive a Spectrum from an RGB Triplet // *IEEE Computer Graphics Applications*, Vol. 9, № 4, pp. 95-99, 1989.
39. Methods to obtain coherent waves in optics, <http://mash-xxl.info/page/237202153160037004017084166207088218106096019211/>. Accessed 20 Mar 2020.
40. Kozlov D. S. Algoritm renderinga po metodu Monte-Karlo petrograficheskikh shlifov odnoosnyh kristallov [Algorithm for Monte Carlo rendering of cross sections of uniaxial crystals] // *Proseed. of Young Scientists School, Intl. Conf. Graphicon'2009, Moscow State University, 2009*. [in Russian].
41. Ahmanov S. A., Nikitin S. Yu. *Fizicheskaya optika [Physical optics]*, 2nd ed. Moscow State University, Nauka, 2004. [in Russian].
42. Kizel V. A. *Otrazhenie sveta [Reflection of light]*. Nauka, 1973. [in Russian].
43. Kuznetsov S. I. Klassicheskij interferentsionnyy opyt Yunga [Young's classic interference experiment], <http://900igr.net/prezentatsii/fizika/Interferentsija-voln/019-Klassicheskij-interferentsionnyj-opyt-JUnga.html>. Accessed 20 Mar 2020.