

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ VIRTUALLAB

## Аннотация

В статье описаны возможности моделирования оптических явлений при помощи программного обеспечения VirtualLab v. 4, объединяющего методы расчета оптических систем, основанных на представлениях геометрической оптики и теории электромагнитного поля. Приведено описание и основные принципы работы с программным обеспечением. В статье представлены результаты моделирования дифракции монохроматического и полихроматического источников света от фрактальных зонных пластинок, в том числе путем модернизации программируемых модулей пакета VirtualLab.

**Ключевые слова:** оптическое моделирование, VirtualLab, трассировка волновых фронтов, дифракция Френеля, фрактальные зонные пластинки, самоподобие.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время автоматизированное проектирование оптических систем рассматривается как один из этапов полного жизненного цикла оптических изделий. В связи с развитием оптического приборостроения в современные оптические системы включается множество разнообразных оптических компонентов. К таким компонентам могут относиться дифракционные, отражательные элементы, линзы Френеля, рассеиватели, компьютерно-синтезированные голограммы и т.д. Эффективное компьютерное моделирование предполагает использование всех этих компонентов на единой платформе, которые рассчитываются с высокой физической точностью. Компания Lighttrans (Йена, Германия) разработала концепцию трассировки волновых фронтов для реализации такого моделирования. Трассировка волновых фронтов позволяет объединить представления геометрической оптики с теорией электромагнитного поля, учитывая волновые свойства света [1]. Первая часть статьи посвящена описанию

основных возможностей и принципов работы с программой VirtualLab, во второй части представлены результаты моделирования дифракции Френеля от фрактальных зонных пластинок, полученные с использованием данного программного продукта.

## 2. ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ VIRTUALLAB

Разработки современной оптической науки все больше зависят от комплексного подхода к изучению распространяющегося излучения в оптической системе. Для выполнения выдвигаемых требований к качеству оптической системы необходимо учитывать все пространственные и временные характеристики излучения, принимая во внимание когерентность, поляризацию и спектральный состав. Полная картина характеристик излучения может быть получена только при использовании теории электромагнитного поля, и только интеграция геометрической и физической оптики может привести к созданию новейших оптических элементов в будущем. Программный продукт VirtualLab пред-

ставляет возможности оптического моделирования, основанные на электромагнитной природе излучения без исключения приближенных методов, таких как трассировка лучей (область геометрической оптики).

В зависимости от моделируемого явления, VirtualLab позволяет реализовывать следующие математические модели распространения излучения:

1. Спектр плоской волны. Интеграл позволяет производить вычисления без ограничений к полю. В случае распространения волны на большие расстояния возрастает сложность численных расчетов, что приводит к большим временным затратам.

2. Интеграл Рэля-Зоммерфельда является альтернативной формой спектра плоской волны, обладает другими численными свойствами, которые могут быть использованы на практике.

3. Интеграл Френеля применяется только для параксиального приближения.

4. Приближение спектра плоской волны в области дальней зоны. Применяется для достаточно больших расстояний распространения волны.

5. Метод трассировки лучей для моделирования явлений геометрической оптики.

VirtualLab является одной из немногих программ, комбинирующей методы моделирования геометрической и физической оптики. Данное преимущество этого пакета позволяет выбрать способ расчета прохождения излучения через оптический элемент (приближение геометрической оптики, приближение Френеля, дифракция в дальней зоне и т.д.) или провести несколько расчетов и выбрать оптимальный вариант.

### **3. ОПИСАНИЕ БАЗОВЫХ И МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММИРУЕМЫХ МОДУЛЕЙ ПАКЕТА VIRTUALLAB**

#### **3.1 СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСТАНОВКЕ**

В настоящее время существует две версии программы: стандартная (Standard

VirtualLab) и улучшенная (Advanced VirtualLab). Улучшенная версия поддерживает 64-х разрядную технологию и требует установки на 64-х разрядную операционную систему Windows. Advanced VirtualLab поддерживает многоядерную технологию и позволяет выполнять параллельные вычисления, при этом разрешение и размеры числовых массивов определяются только объемом физической памяти компьютера. Для этих версий программы определены основные требования:

- операционная система: Windows XP, Vista, 7 (32-х или 64-х разрядная в зависимости от устанавливаемой версии);
- процессор: рекомендуемая частота от 2.4 ГГц;
- оперативная память: минимум 1 Гб, для стандартной версии рекомендуется 3 Гб, для улучшенной – 16 Гб;
- видеокарта: разрешение 1024x768 и выше, оперативная память 512 Мб.

#### **3.2 ПАКЕТЫ ИНСТРУМЕНТОВ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ VIRTUALLAB**

В программное обеспечение VirtualLab постоянно добавляются новые возможности, и на данный момент существует 4 пакета инструментов (toolboxes), которые добавляются в различные версии программы по желанию пользователя, в зависимости от моделируемых задач. Базовый инструментарий (starter toolbox), приложение для моделирования дифракционных решеток (grating toolbox), приложение для моделирования дифракционной оптики (diffractive optics toolbox), пакет инструментов для моделирования лазерных резонаторов (laser resonator toolbox). Комбинируя инструментарии, программа может быть использована для различных целей оптимальным для пользователя способом. Остановимся подробнее на базовом пакете инструментов, использование которого является достаточным для моделирования большинства явлений физической и геометрической оптики.

Базовый набор инструментов позволяет моделировать оптику лазеров, опти-

ческие системы, состоящие из микрооптических и дифракционных оптических элементов, фазовых пластинок, компьютерно-синтезированных голограмм, линз, оптических фильтров и т.д. Распространение света через все эти компоненты может задаваться различными операторами, выбираемыми в зависимости от моделируемого явления. Источники излучения могут быть как монохроматическими, так и полихроматическими, с различной степенью пространственной и временной когерентности. Программа позволяет импортировать в оптическую схему элементы, задаваемые пользователем (в виде изображений, формул, таблиц, программных кодов).

### 3.3 ОПИСАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА

Основное окно программы состоит из главного меню (main menu), панели инструментов (tool bars), браузера просмотра свойств объекта (property browser). Основная область окна отводится для документов, снизу находится окно результатов и системных сообщений. Результаты

могут быть представлены в двух видах: Light view и Data view. Data view позволяет видеть отдельно амплитуду, фазу, мнимую и реальную часть световой волны, причем текущую информацию о выбранном поле можно увидеть в браузере свойств объекта. На рисунке 1 показана рабочая область программы с тремя открытыми окнами: в первом окне загружен исходный объект в виде фрактального изображения (фрактал Вишека); во втором представлено Фурье-преобразование от исходного объекта в виде Light view; в третьем окне представлен тот же Фурье-образ от исходного объекта в виде Data view, показана фазовая составляющая волны с выделенными эксцентриситетами поляризации. В браузере свойств в правой части окна представлена информация о выделенном объекте.

### 3.4 СОЗДАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для создания оптической системы в VirtualLab предусмотрены два метода: при помощи опций Light Path Diagram (диаграмма траектории излучения) и Spread Sheet (таблица). Light Path Diagram со-

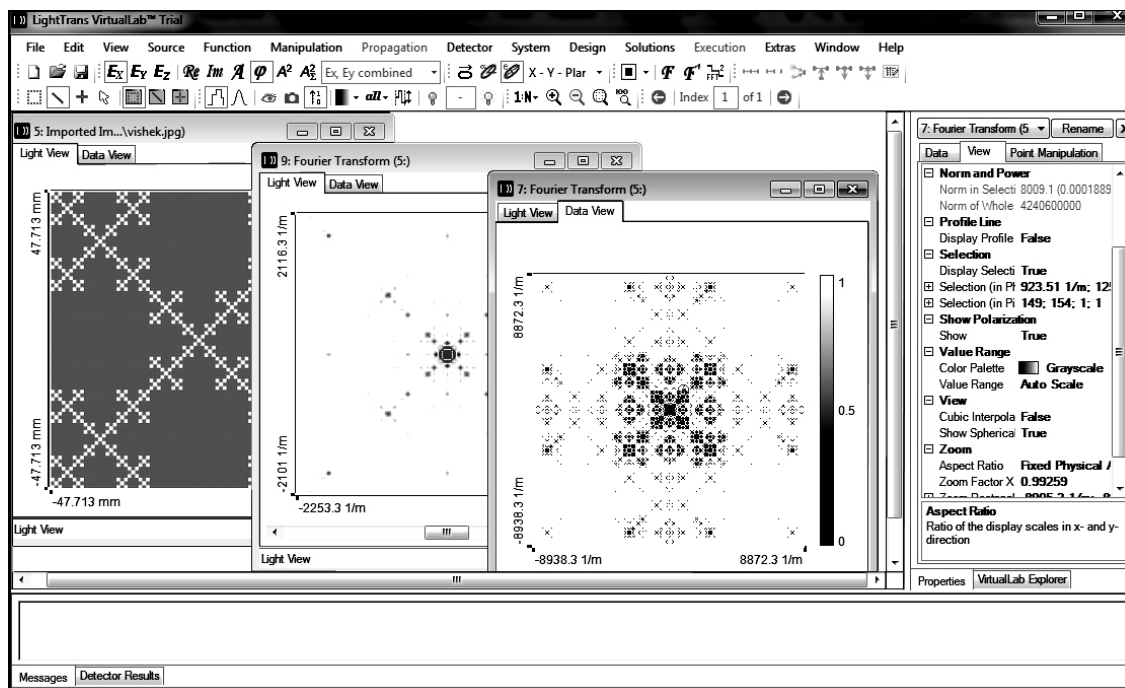


Рис. 1. Основное окно программного обеспечения VirtualLab при работе с объектом фрактал Вишека

стоит из двух окон, в одно из которых пользователь может добавлять различные источники излучения, оптические компоненты и приемники излучения, а в другом устанавливать между ними связи и модели распространения света (рис. 2).

Окно, в которое добавляются оптические компоненты (Light Path View), разделено на две части. В левой части представлен древовидный список со всеми возможными оптическими элементами, которые пользователь может добавлять в схему. Правая часть используется для демонстрации реализуемой оптической схемы. Для добавления нового элемента в схему пользователю достаточно выбрать нужный элемент в списке и перетащить его при помощи мыши в правую часть. Оптические элементы в списке сортированы по различным категориям: источники света, компоненты, идеальные компоненты, виртуальный экран, приемники излучения, анализаторы. После добавления элемента в оптическую схему пользователь может изменить свойства каждого элемента согласно решаемой задаче.

Второе окно (Light Path Editor) используется для установления связи между оптическими элементами в схеме. В таблице задается последовательность распростра-

нения излучения, модель распространения и канал, определяющий отражается ли свет от объекта, или проходит через него. Свойства среды, в которой распространяется излучение, задаются здесь же. На рис. 2 показана простейшая оптическая схема, состоящая из источника света в виде плоской монохроматической волны длиной 532 нм, штриховой дифракционной решетки с периодом 100 мкм и шириной щели 20 мкм и виртуального экрана, расположенного на расстоянии 1 м от решетки. В качестве модели распространения излучения выбран оператор дифракции в дальней зоне.

В случае необходимости получения последовательности результатов моделирования с различными параметрами оптической схемы (например, меняющимся расстоянием до виртуального экрана или длиной волны излучения) может быть использован параметр выполнить (run). Результаты моделирования появляются в отдельной таблице, что упрощает их дальнейшую обработку.

### 3.5. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

В программе VirtualLab реализовано множество моделей источников излучения

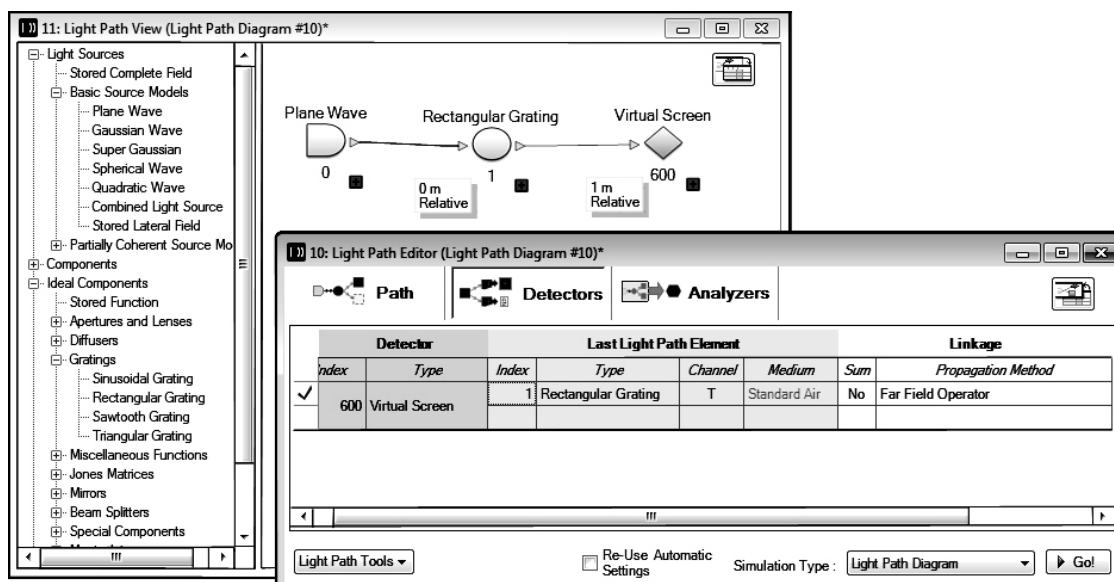


Рис. 2. Создание оптической системы при помощи Light Path Diagram для моделирования явлений дифракции и рассеяния света

(Light Sources), число которых постоянно растет с появлением новых версий программы. Каждая модель источника описывает электромагнитное поле на плоскости. Пользователь может задавать следующие параметры источника:

- основные параметры (форма и размеры светового пучка, сдвиг относительно оптической оси, среда распространения);
- спектральные параметры (спектральный состав, длина волны, удельный вес);
- поляризационные параметры (тип и угол поляризации излучения);
- пространственные параметры;
- селекция мод излучения.

К основным моделям источников излучения относятся плоская волна, гауссовская волна, супергауссовская волна, сферическая волна. Кроме этого, источник света может быть запрограммирован пользователем. VirtualLab позволяет моделировать полихроматические источники с различной степенью пространственной и временной когерентности.

После выбора источника излучения оптическая система наполняется реальными и идеальными оптическими компонентами, которые могут быть выбраны из библиотеки VirtualLab или заданы самим пользователем.

Описать все возможности и компоненты программы VirtualLab в рамках одной статьи не представляется возможным, поэтому авторы статьи ограничились лишь основными сведениями относительно данного программного продукта. Полное описание программы, а также её демо-версию можно найти на сайте компании LightTrans GmbH [www.lighttrans.com](http://www.lighttrans.com). Там же можно обнаружить множество демонстраций и материалов по возможностям оптического проектирования и моделирования явлений физической оптики.

Вторая часть статьи посвящена демонстрации возможностей программы VirtualLab в области научных исследований, а именно дифракции излучения света от фрактальных структур.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО И ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ОТ ФРАКТАЛЬНЫХ ЗОННЫХ ПЛАСТИНОК

Фракталы являются объектом пристального внимания ученых в различных областях научного знания, в том числе и в оптике. Большинство работ по оптике фракталов посвящено дифракции света в области Фраунгофера, в частности, показано, что фрактальные дифракционные решетки обладают рядом преимуществ по сравнению с двумерными периодическими структурами, поскольку существенный вклад в суммарную интенсивность дифракционной картины вносят высокие пространственные частоты, соответствующие мельчайшим деталям фрактала. Данная особенность повышает возможности методов неразрушающего контроля фазовых неоднородностей прозрачных объектов, основанных на регистрации эталонных тестовых изображений через объекты, искажающие волновой фронт [3].

Известно, что распределение интенсивности света от фрактального объекта так же, как и сам объект, обладает свойствами самоподобия, а по картине дифракции в дальней зоне можно определять некоторые свойства самого объекта, например его фрактальную размерность [4]. В области дифракции Френеля теория фракталов нашла применение в создании фрактальных зонных пластинок. Недавно были представлены зонные пластинки, обладающие фрактальной структурой [5], основное отличие которых состоит в том, что, помимо главного и кратных фокусов, в распределении интенсивности появляются дополнительные максимумы интенсивности, число которых зависит от порядка генерации фрактала. При этом внутренняя структура возникающих фокусов обладает свойствами самоподобия. При помощи программы VirtualLab было выполнено моделирование дифракции Френеля монохроматических волн и бе-



Рис. 3. Процесс построения полос Кантора

лого света от фрактальных зонных пластинок и исследованы их фокусные свойства.

Основой для построения фрактальных зонных пластинок являются обычные зонные (амплитудные или фазовые) пластинки Френеля, которые представляют собой чередующиеся прозрачные и непрозрачные кольцевые зоны, радиус которых при освещении плоской волной определяется известной формулой  $r_m = \sqrt{m\lambda b}$ , где  $m$  – номер зоны,  $\lambda$  – длина волны падающего света,  $b$  – расстояние до экрана. Фрактальную зонную пластинку можно представить как обычную, у которой отсутствуют некоторые зоны. Процесс удаления зон соответствует итеративному процессу построения полос Кантора (рис. 3).

Моделирование было проведено для фазовых зонных пластинок, так как для практического применения они представляют намного больший интерес благодаря возможности четырехкратного увеличения интенсивности излучения. На рисунке 4 представлен процесс построения фрактальных зонных пластинок. Из обычной пластинки Френеля, состоящей из 27 прозрачных зон (рис. 4а) удаляются 9 средних прозрачных зон (рис. 4б), что со-

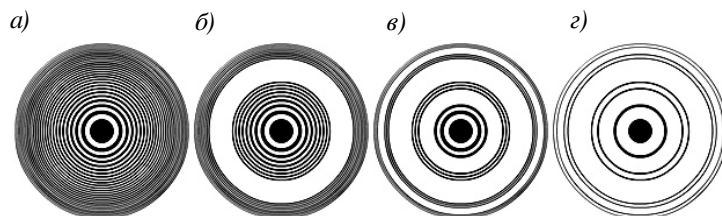


Рис. 4 Построение фрактальных зонных пластинок:  
а) обычная пластинка Френеля, б) порядок генерации  $S = 1$ ,  
в) порядок генерации  $S = 2$ , г) порядок генерации  $S = 3$

ответствует первому порядку генерации  $S = 1$  фрактальной структуры, на втором порядке генерации  $S = 2$  удаляются по три прозрачных зоны и т.д. (рис. 4).

Оптическая схема, реализованная при помощи программного обеспечения VirtualLab, состоит из трех элементов: источника излучения в виде плоской монохроматической волны длиной 532 нм, собственно фрактальной зонной пластинки, представленной в виде фазового объекта и детектора излучения, позволяющих регистрировать количественные характеристики (значения амплитуды, фазы, интенсивности) вдоль оптической оси системы. Фрактальные зонные пластинки загружались в программу в виде изображений, прозрачным зонам соответствует фаза  $\varphi = 0$ , непрозрачным –  $\varphi = \pi$  (рис. 5). После загрузки изображений в программу существует возможность перемасштабирования объекта.

Зависимость интенсивности излучения от осевой координаты в околофокусном пространстве (для исследуемой зонной пластинки  $f = 0.752$  м) получалась при помощи параметра run. Результаты моделирования представлены на рис. 6 для различных порядков генерации фрактальной зонной пластинки. Из графиков видно, что с ростом порядка генерации фрактала в спектре излучения возникают максимумы интенсивности, при этом внутренняя структура фокусов обладает свойствами самоподобия.

Возникновение дополнительных фокусов в распределении интенсивности от фрактальных зонных пластинок позволяет выдвинуть гипотезу об уменьшении хроматических aberrаций при освещении пластинок белым светом. Для проверки данной гипотезы было проведено моделирование дифракции от фрактальной зонной пластинки для триплета длин волн 635 нм, 532 нм и 473 нм с удельным весом 1.05, 0.62 и 0.8 соответственно. Результаты моделирования для

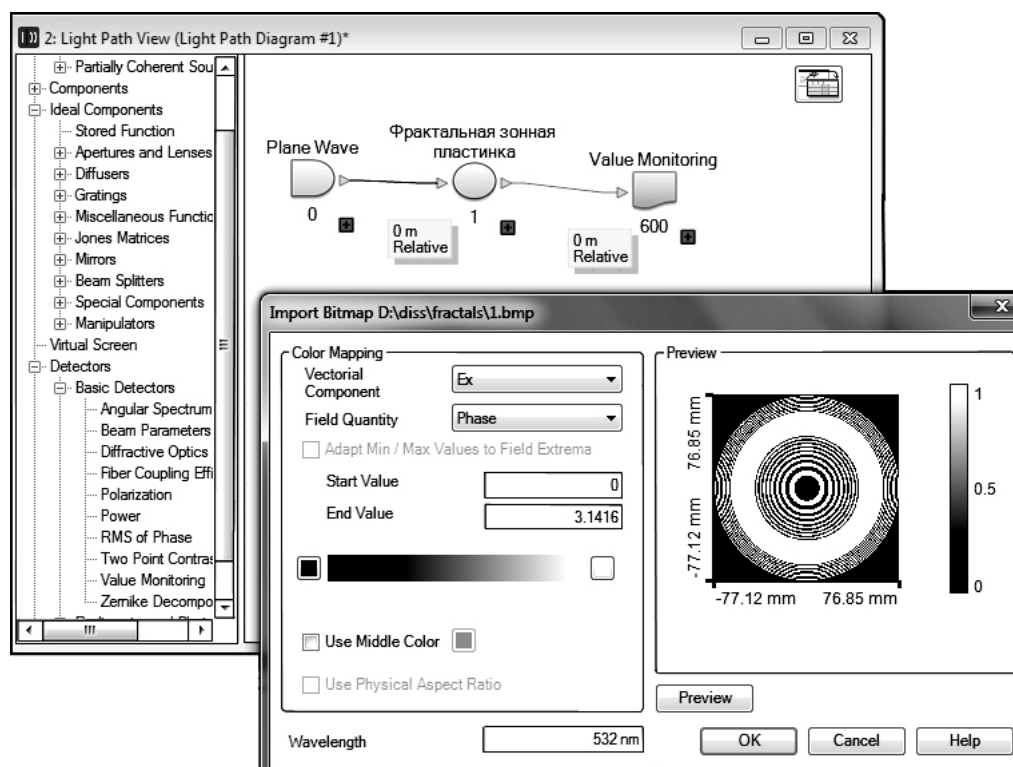


Рис. 5 Импорт фрактальных зонных пластинок в программу

обычной зонной пластинки (рис. 7а) и второго порядка генерации фрактальной пластинки (рис. 7б) представлены ниже.

Результаты моделирования, проведенного при помощи программного продукта VirtualLab, подтверждают экспериментальные и теоретические исследования в этой области [6, 7]. Показано, что использование фрактальных зонных пластинок позволяет уменьшить хроматические абер-

рации при их освещении полихроматическим источником излучения.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время существует множество специализированных программных продуктов по проектированию оптических систем, основанных на представлениях геометрической оптики. Данные продук-

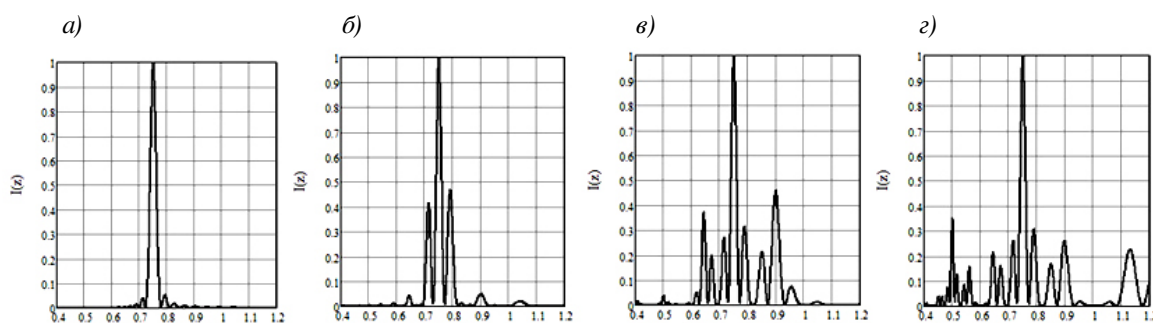
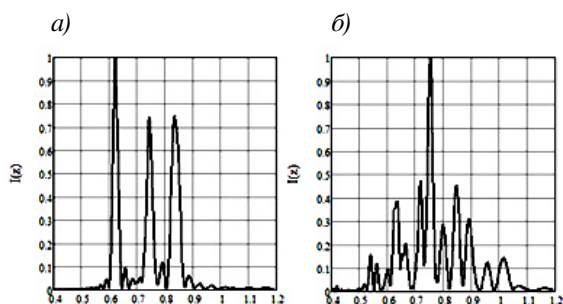


Рис. 6. Осевое распределение интенсивности в окрестности главного фокуса фрактальной зонной пластинки:  
 а) обычная пластинка Френеля, б) порядок генерации  $S = 1$ ,  
 в) порядок генерации  $S = 2$ , г) порядок генерации  $S = 3$



**Рис. 7.** Осевое распределение интенсивности для обычной (а) и фрактальной (б) зонной пластинки при их освещении белым светом

ты адресованы, в первую очередь, оптикам-расчетчикам и используются для научных или коммерческих целей. Среди

этого многообразия пакет VirtualLab выделяется простым, интуитивно понятным интерфейсом и позволяет создавать как простые учебные схемы для геометрической и волновой оптики, так и гораздо более сложные схемы, предназначенные для научных исследований. Использование электромагнитных представлений при моделировании оптических явлений не означает отказ от проектирования оптических систем, основанных на представлениях геометрической оптики. По сути, электромагнитное моделирование является обобщением существующих методов проектирования, открывающим новые возможности при практическом использовании.

### Литература

1. F. Wyrowski, H. Schimmel Electromagnetic optical engineering – an introduction, Photonik, 2006. № 6. P. 50–55.
2. [www.lighttrans.com](http://www.lighttrans.com).
3. Зинчик А.А., Музыченко Я.Б., Стафеев С.К., О принципах амплитудной и амплитудно-фазовой пространственной фильтрации. Известия вузов. Приборостроение, 2007. Т. 50. № 7. С. 46–52.
4. Зинчик А.А., Музыченко Я.Б., Смирнов А.В., Стафеев С.К. Расчет фрактальной размерности регулярных фракталов по картине дифракции в дальней зоне. Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, 2009. № 2. С. 17–24.
5. G. Saavedra, W.D. Furlan, and J.A. Monsoriu. Fractal zone plates, Opt. Lett. 28, p. 971-973, 2003.
6. Mendoza-Yero et al., Fractal generalized zone plates, J. Opt. Soc. Am. A. 2009. Vol. 26. № 5. P. 1161–1166.
7. J. A. Rodrigo, T. Alieva, M. L. Calvo, J. A. Davis. Diffraction by Cantor fractal zone plates, Journal of Modern Optics, 2005. Vol. 52. № 18. P. 2771–2783.

### Abstract

The paper describes the opportunities of optical modeling with the package VirtualLab v.4, which unified modeling techniques ranging from geometrical optics to electromagnetic approaches. The description of the package and the main principles are given. The results of the modeling of diffraction of monochromatic and polychromatic light sources from fractal zone plates are presented.

**Keywords:** optical modeling, VirtualLab, wave-front tracing, Fresnel diffraction, fractal zone plates, self-similarity.



Наши авторы, 2010.  
Our authors, 2010.

Музыченко Яна Борисовна,  
ассистент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики,  
[myb@rambler.ru](mailto:myb@rambler.ru)