

УДК 681.78

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОГРАФА С КОМПОЗИТНОЙ ГОЛОГРАММНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Харитонов Д.Ю. (Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А.Н. Туполева – КАИ)

Научный руководитель – д.т.н., доцент Муслимов Э.Р.

(Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А.Н. Туполева – КАИ)

### Аннотация

Голограммные дифракционные решетки (ГДР) нашли широкое применение в спектральных приборах благодаря возможности коррекции aberrаций и подстройки дифракционной эффективности. В настоящей работе рассматривается расширение функциональных возможностей за счет создания композитного голограммного элемента. Рассматриваемый оптический элемент представляет собой голограмму, записанную путем соединения нескольких элементарных полей. Для моделирования таких элементов необходимы дополнительные программные инструменты, разработка которых является целью данной работы.

**Ключевые слова:** композитный голограммный элемент, компьютерное моделирование, спектрограф, вспомогательное зеркало, коррекция aberrаций.

### 1. Введение

В любой изображающей оптической системе пространственное изменение основных оптических характеристик происходит по полю зрения и по апертуре. Это свойство справедливо для характеристик различной физической природы: увеличения, геометрических aberrаций, потерь на отражение на поверхностях, дифракционной эффективности. Изменение этих характеристик ограничивает создание оптических систем с большим относительным отверстием, широким полем зрения, сужает рабочий спектральный диапазон системы. С другой стороны, одновременное увеличение перечисленных характеристик по всей апертуре и полю зрения неизбежно требует увеличения числа свободных коррекционных параметров и возможности их локального изменения в разных точках апертуры/поля зрения. Для расширения возможностей коррекции aberrаций в оптической системе предлагается использовать композитные голограммные дифракционные решетки (КГДР).

ГДР представляет собой интерференционную картину, образованную двумя когерентными пучками света и зарегистрированную на светочувствительном материале. ГДР подразделяются на объемно-фазовые и рельефно-фазовые. Объемно-фазовые голограммы – это голограммы, в которых фазовая структура определяется изменением показателя записывающего материала, а его толщина намного больше длины волны света, используемой для записи. Рельефно-фазовые голограммы представляют собой голограммы, в которых дифракционная фазовая структура определяется изменением толщины голограммы.

Такие решетки выгодно отличаются равномерностью дифракционной эффективности по спектральному диапазону, широкими коррекционными возможностями, высоким разрешением и низким, в сравнении с нарезными решетками, уровнем рассеянного света.

Композитные голограммные решетки представляют собой элементы, полученные путем стыковки нескольких элементарных полей, в каждом из которых такие параметры как углы падения в схеме записи, расстояния до источников записи, aberrации записывающих волновых фронтов, толщина светочувствительного материала и глубина модуляции его показателя преломления изменяются независимо. Это позволяет более эффективно корректировать aberrации и добиваться равномерно высокой дифракционной эффективности по апертуре и полю зрения.

### 2. Алгоритм расчета и его программная реализация

Алгоритм расчета строится в предположении, что КГДР записывается с помощью вспомогательного зеркала, aberrации которого могут изменяться для каждого элементарного поля. Алгоритм включает в себя следующие этапы: (1) ввод исходных данных; (2) вычисление стрелок прогиба вспомогательного зеркала; (3) формулирование уравнения отражения от вспомогательного зеркала в

векторной форме в локальной системе координат (СК); (4) преобразование в глобальную СК; (5) составление функции ошибок, характеризующей длину вектора отклонения, (6) нахождение точки пересечения луча поверхностью вспомогательного зеркала с помощью симплекс-метода Нелдера-Мида; (7) вычисление направляющих векторов в схеме записи с учетом aberrаций вспомогательного зеркала; (8) подстановка векторов в уравнение Велфорда и трассировка луча через голограмму. Используемый здесь метод Нелдера — Мида (метод деформируемого многогранника) не использует градиентов функции, а поэтому легко применим к нелинейным функциям. Суть метода заключается в последовательном перемещении и деформировании симплекса вокруг точки экстремума.

Для реализации описанного алгоритма разрабатывается библиотека C++ (dll) в среде MS Visual Studio, позволяющая создать пользовательский тип поверхности для Zemax OS и встроить указанные вычисления в существующие методы моделирования оптических систем.

### 3. Моделирование дополнительного канала спектрографа

В качестве контрольного примера расчета рассматривается оптическая схема двухканального спектрографа, в которой первый канал работает в ультрафиолетовом диапазоне, а второй – в видимом. Схема первого канала включает входную щель прибора, вогнутую отражательную голограммную решетку, корректирующую цилиндрическую линзу и фотоприемник. Схема второго канала включает мнимую входную щель, пропускающую вогнутую голограммную дифракционную решётку (ПВГДР), установленную в нулевом порядке дифракции решетки первого канала, и фотоприемник. В двухканальном спектрографе мы рассматриваем только второй канал, поскольку надо компенсировать aberrации первой отражательной решетки. Для этого удобно использовать вспомогательное зеркало.

В рассматриваемом примере второй канал работает в диапазоне 400-560 нм и строится на основе пропускающей объемно-фазовой решетки. Спектрограф работает с относительным отверстием 1:7 и обратной линейной дисперсией 13,3 нм/мм. Частота штрихов решетки в вершине равна  $700 \text{ мм}^{-1}$ .

Решетка записывается с помощью вспомогательного зеркала, установленного под углом  $59,6^\circ$  на расстоянии 49,9 мм от точечного источника записи и 81,79 мм от подложки решетки. Предполагается, что вспомогательное зеркало является деформируемым, его световой диаметр равен 3,26 мм, а максимальная стрелка прогиба 30,3 мкм. Форма зеркала описывается вершинным радиусом и полиномами Цернике  $Z_4$ - $Z_{11}$ . Во втором плече схемы записи используется точечный источник. Решетка разделяется на 4 прямоугольных зоны, для каждой из которых параметры схемы записи оптимизируются независимо. В результате для разных зон расстояние до источников изменяется на 1,31 мм, угол наклона зеркала – на  $0,23^\circ$ , стрелка прогиба зеркала – на 1,8 мкм.

С использованием дополнительного спектрального канала на базе КГДР достигается выигрыш до 32,1% в коррекции aberrаций в меридиональном сечении и до 10,3% для сагиттального сечения в сравнении с обычной голограммной решеткой. Соответственно, можно ожидать повышения спектрального предела разрешения до 0,23 нм.

### Выводы

Таким образом, разработан алгоритм трассировки луча через голограммную решетку, записываемую с помощью вспомогательного зеркала. Алгоритм использует аналитические уравнения трассировки в схеме записи и работы решетки и численную минимизацию простой функции ошибок, что не требует больших вычислительных ресурсов. Создана библиотека на языке программирования C++ (dll) в среде MS Visual Studio, позволяющая создать пользовательский тип поверхности для расчета и оптимизации системы в Zemax OS. Использование такой поверхности позволяет проводить оптимизацию для нескольких элементарных полей одновременно.

В дальнейшем планируется включить расчёт и оптимизацию дифракционной эффективности, учесть технологические ограничения и подготовить экспериментальное подтверждение наших расчётов.

Харитонов Д.Ю. (автор)

Подпись

Муслимов Э.Р. (научный руководитель)

Подпись