

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

---

---

*И.В. Минин, О.В. Минин*

### ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДИФРАКЦИОННОЙ КВАЗИОПТИКИ ДИК-М

Интегрированная система автоматизации проектирования (САПР) предназначена для обеспечения сквозного цикла разработки новых систем, начиная от исследования физики явления и заканчивая автоматизацией технологической подготовки и выпуском конструкторской документации. Ниже рассмотрены особенности построения интегрированной САПР на примере системы ДИК-М, предназначенной для синтеза новых элементов дифракционной квазиоптики (ЭДК).

Составной частью любой САПР являются терминальные комплексы (ТК), которые по функциональному назначению могут быть разделены на два класса:

- ТК собственно исследователя;
- ТК пользователя-конструктора.

Каждый из этих терминальных комплексов в зависимости от их программного наполнения разворачивается в рабочую станцию (РС) в соответствии с выполняемым этапом работы:

- РС для проведения собственно вычислительного эксперимента, в ходе которого изучаются физические процессы, связанные с функционированием разрабатываемого элемента;
- РС интерактивного документирования результатов вычислительного эксперимента с использованием средств машинной графики;
- РС интерактивного проектирования облика ЭДК на основе знаний, полученных при проведении вычислительного эксперимента, и автоматизации процесса оптимизации свойств разрабатываемого элемента, включая выпуск конструкторской документации и разработку программ для его изготовления (например, управляющих программ для станков с ЧПУ).

Общими требованиями к указанным выше рабочим станциям являются:

- обеспечение интерактивного режима работы на языке высокого уровня, причем диалог "пользователь - РС" должен быть осуществлен на языке его предметной области в терминах и понятиях, доступных исследователю и зависящих от области применения САПР. Фактически это означает, что должна быть создана система гиб-

ридного интеллекта, объединяющая интеллектуальные возможности и опыт человека с вычислительными возможностями современных ЭВМ;

- наличие высокоэффективных средств оперативного отображения графической информации с использованием различных растровых дисплеев.

В описываемой ниже САПР ДИК-М входной язык выбран директивного типа, каждая директива состоит из своего идентификатора и списка параметров, который может быть пустым. Идентификатор директивы задается либо вводом ее номера с алфавитно-цифровой клавиатуры, либо указанием ее имени на меню директив. Параметрами директив являются числа, имена, произвольные строки. По функциональному признаку директивы разбиты на четыре основные группы:

- управления;
- задания параметров ЭДК;
- редактирования;
- документирования и ведения протокола работы.

Директивы имеют иерархическую структуру в соответствии с приведенными выше группами. Диалог построен по принципу самообучающихся систем, что позволяет использовать САПР неподготовленному пользователю, не являющемуся специалистом в области численных методов и программирования на ЭВМ.

Рассмотрим более подробно каждый из указанных типов РС.

## 1. РС математического моделирования

Этап математического моделирования физических свойств элементов дифракционной квазиоптики включает в себя следующие основные подэтапы:

- постановка задачи;
- анализ корректности задачи и области существования решения;
- выбор параметров расчета;
- выбор метода решения задачи;
- собственно решение и отображение результатов;
- анализ полученных данных и их документирование.

На этапе постановки задачи осуществляется формулировка задачи, определение требуемых свойств элемента дифракционной квазиоптики, (требуемого) профиля его поверхности и ее ориентации в пространстве, задание необходимого рабочего спектрального диапазона и фокусирующих свойств в нем и т.д. Этот этап работы характеризуется интенсивным диалогом "пользователь - РС".

Следующий этап работы заключается в определении области существования решения и корректности начальных данных. Для этого определяется тип уравнений, описывающих требуемую пользователю ситуацию (приведение уравнений к стандартному каноническому виду) и область существования решения. Проверяется также и корректность задания начальных данных (граничных условий): меньшей из возможных длин волн излучения, падающего на дифракционный элемент, должно соответствовать большее фокусное расстояние.

В основном этот этап необходим при решении обратных задач по синтезу элементов дифракционной квазиоптики. Характерными примерами таких задач служат вопросы синтеза фокусаторов с заданными свойствами [1], конструирования дифракционных элементов на заранее заданных неплоских поверхностях, например, поверхностях вращения второго порядка [2], воссоздание профиля поверхности и дискретной фазовой функции элемента с заданными пространственно-частотными свойствами в заданном спектральном диапазоне и т.п.

На этом же этапе работы происходит анализ единственности решения поставленной задачи и, по возможности, запрос у пользователя требуемого ему решения из возможных. Простейшим примером такой ситуации является задача синтеза обыкновенной зонной пластины Френеля. Дело в том, что при конструировании дискретной фазовой функции зонной пластины (радиусов зон Френеля) обычно предполагают, что первый френелевский радиус равен нулю. В то же время легко показать, что он может быть выбран произвольным, а границы остальных зон Френеля определяются из обычного условия синфазности излучения в фокусе.

Этап выбора метода решения. В зависимости от типа синтезируемого ЭДК, его назначения и требуемых характеристик пользователем производится выбор метода решения задачи.

Условно все эти методы в данной подсистеме можно разделить на два больших класса:

- реализующие точные методы решения задачи дифракции электромагнитных волн на квазипериодических структурах;
- приближенные аналитические соотношения, предназначенные прежде всего для экспресс-анализа свойств разрабатываемых структур на качественном уровне.

С целью предоставления средств гибкой адаптации РС к конкретным параметрам расчета свойств элементов дифракционной квазиоптики, зависящих в том числе и от их назначения, базовое программное обеспечение реализовано в виде библиотеки подпрограмм, ориентированной на работу в среде MS ДУБНА.

Функционально полный набор подпрограмм библиотеки фактически представляет собой программную среду, в которой пользователь строит алгоритм и программу решения широкого спектра конкретных задач. При этом распределение функций в таких системах устанавливается на этапе конструирования, а набор подпрограмм по необходимости легко может быть расширен.

Такой подход позволил создать подпрограммы, реализующие точные и приближенные методы решения.

### 1.1. ТОЧНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Выбираемый метод решения задачи должен обеспечивать приемлемую точность расчета при небольших размерностях используемых расчетных полей. Это необходимо, с одной стороны, для обеспечения решения задачи в достаточно короткое время, с другой стороны, для того, чтобы количество хранимой на внешних носителях информации не было слишком велико. Кроме того, должна быть обеспечена возможность записи рассчитываемой информации на внешний носитель через определенное количество шагов для ее сохранения от сбояв ЭВМ. При этом такие записи необходимо делать как можно чаще, желательно на каждом шаге процесса, с другой стороны, при больших размерностях расчетных полей это нецелесообразно из-за значительных затрат машинного времени на обмены с внешним носителем.

Кроме того, поскольку время счета задачи с достаточно большим размером расчетного поля составляет от нескольких минут до единиц часов времени центрального процессора, время ответа РС в диалоге с пользователем также крайне велико на данном этапе. Поэтому после постановки задачи, проверки исходных данных на корректность и единственность решения сформированные данные заносятся в архив постановок задач и по указанию пользователя осуществляется пакетный (автономный, без диалога) счет с накоплением и отображением результатов.

В рассматриваемой САПР при проведении вычислительного эксперимента за основу взята скалярная теория дифракции. Основной счетный блок включает в себя следующие основные подпрограммы:

а) строгого вычисления дифракционного интеграла Френеля - Кирхгофа (ИФК) при падении плоского либо сферического волнового фронта на плоский ЭДК с осевой симметрией. Подпрограмма реализует усовершенствованный алгоритм вычисления многократных интегралов от быстроосциллирующей функции [3]. Входными параметрами к соответствующей подпрограмме являются: массив радиусов зон Френеля для изучаемого ЭДК, массив декартовых координат источника (источников) излучения и точки наблюдения, а также текущая длина волны. При моделировании изображения от нескольких точечных источников излучения для каждого из них возможно задание своего "веса" коэффициента. Выходными параметрами подпрограммы являются действительная и мнимая компоненты скалярного поля;

б) вычисления дифракционного интеграла при падении плоского волнового фронта на плоский ЭДК по нормали к его поверхности. В этом случае двукратный дифракционный интеграл сводится к однократному виду Фурье-преобразования от некоторой вещественной функции [4];

в) вычисления ИФК при падении плоского или сферического волнового фронта на ЭДК, выполненного на поверхности вращения второго порядка. Дополнительными по сравнению со случаем а) входными параметрами к данным подпрограммам является тип поверхности элемента (сфера, парабола, гипербола, конус), заданной в виде уравнения корня квадратного от квадратного трехчлена. Возможны три основных режима работы подпрограмм: равномерное, произвольное и автоматическое распределение амплитуды падающего на поверхность ЭДК поля. В последнем случае для каждой из зон Френеля определяется угол падения излучения на нее и коэффициент прохождения излучения через эту зону с учетом его реального отражения и преломления. Поперек каждой зоны Френеля данное распределение принято равномерным.

## 1.2. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ

Подсистему, реализующую приближенные методы анализа свойств разрабатываемых дифракционных элементов, в свою очередь возможно разбить на две подсистемы, реализующие расчет ЭДК на основе:

- асимптотических свойств;
- законов геометрической оптики.

Подпрограммы, реализующие вычисление асимптотических свойств ЭДК, основаны на приближенных методах вычисления ИФК. Основными являются два приближения:

- длиннофокусная система, т.е.  $f \gg D$ , где  $f$  - фокусное расстояние,  $D$  - диаметр ЭДК;
- большой относительный диаметр ЭДК, т.е.  $D/\lambda \gg 1$  (это же условие может быть записано как  $N > 50 \dots 100$ , где  $N$  - число зон Френеля, укладывающихся на апертуру ЭДК).

Подсистема, реализующая вычисления асимптотических свойств ЭДК, позволяет проводить:

- расчет распределения интенсивности поля вдоль и поперек оптической оси в области фокуса плоского синтезируемого ЭДК в параксиальном приближении;
- расчет распределения интенсивности поля вдоль и поперек оптической оси в области фокуса ЭДК на поверхности вращения второго порядка в параксиальном приближении;
- определение разрешающей способности осесимметричного плоского ЭДК на основе функции Эйри, "взвешенной" по его зонам Френеля [4];
- вычисление коэффициента усиления ЭДК во всем его рабочем спектральном диапазоне.

Подпрограммы, реализующие указанные выше возможности, используют внешнюю подпрограмму, осуществляющую вычисление функций Бесселя и Ганкеля по рекуррентным соотношениям [5].

Подпрограммы, описывающие свойства ЭДК на основе законов геометрической оптики, предназначены прежде всего для синтеза их дискретной фазовой функции и экспресс-анализа фокусирующих и частотных свойств:

- синтез фазовой функции плоских ЭДК, работающих при плоском либо сферическом падающем волновом фронте и имеющих осевую симметрию. Учитывается неединственность решения задачи. Например, возможен синтез нескольких типов зонных пластин и ЭДК, фокусирующих излучение в кольцо для каждого вида падающего волнового фронта. Входными параметрами подпрограмм являются: фокусное расстояние (передний и задний отрезки), расчетная длина волны, диаметр, количество уровней квантования фазы. На выходе из подпрограмм формируется массив радиусов зон Френеля, их количество, уточняется диаметр ЭДК по значению последней зоны, определяемого по условию  $R_N \geq D$ . При отрицательной расчетной длине волны происходит распечатка параметров ЭДК на АЦПУ;

- синтез фазовой функции ЭДК на заранее заданной поверхности вращения второго порядка с учетом ее ориентации в пространстве;

- фазовая функция и профиль поверхности ЭДК с заданными фокусирующими свойствами в заданном спектральном диапазоне;

- фазовая функция ЭДК по алгоритму С.М. Райского;

- фазовая функция и профиль поверхности комбинированных ЭДК (например, предназначенных для фокусировки излучения в два кольца разных диаметров и с разным фокусным расстоянием);

- фазовая функция и профиль поверхности ЭД-структур. В частности, ЭДК, преобразующего расходящийся сферический (или плоский) волновой фронт в две различные в пространстве точки (расщепитель излучения);

- фазовая функция внеосевых ЭДК [6];

- фазовая функция ЭДК с внеосевым фокусом [6];

- определение рабочего спектрального диапазона ЭДК по значениям радиусов зон Френеля и фокусному расстоянию, являющихся входными параметрами;

- частотные свойства ЭДК на произвольной поверхности и при заданной ее ориентации в пространстве. Входными параметрами являются: двумерный массив радиусов зон Френеля, фокусное расстояние на расчетной длине волны, текущая длина волны. Выходным параметром соответствующей подпрограммы служит текущее фокусное расстояние;

- продольное разрешение ЭДК на заданной поверхности при заданной ее ориентации в пространстве.

Подпрограммы, осуществляющие расчет частотных свойств ЭДК, используются также и для определения эйконала проектируемого элемента при работе в нерасчетном режиме, т.е. когда длина волны падающего на него излучения отличается от расчетной.

Этап решения задачи происходит в автономном режиме. Пользователь лишь должен следить за ходом прохождения задачи в центральном процессоре и перезапускать задачу при возможных сбоях ЭВМ. Этап отображения результатов подробно рассмотрен ниже на примере РС интерактивного документирования. Укажем лишь, что полные результаты расчета через заданное количество шагов записываются в специально

организованный архив. Кроме защиты от сбоев ЭВМ этим обеспечивается параллельное со счетом отображение результатов, выполняемое специальной подсистемой. Параллельность отображения информации необходима как для оперативного контроля хода вычислительного эксперимента, так и для того, чтобы не тормозить процесс счета в целом.

На конечном этапе анализа данных и их документирования пользователь просматривает полученную в ходе вычислительного эксперимента информацию в удобном для него виде (одномерные графики, изолинии, изофоты, 3D - изометрические картины, яркостные кадры изображения), принимает решение о дальнейших этапах работы и о необходимости документирования полученных данных.

## 2. РС интерактивного документирования результатов

Развитие элементной базы, микропроцессорной техники и средств программного обеспечения дисплейных станций привело к тому, что растровые дисплеи из интеллектуальных терминалов, используемых преимущественно только для отображения информации, превратились в многофункциональные графические станции, обладающие собственными микроЭВМ, развитой периферией и собственными операционными системами. Все это позволяет функционировать им не только в качестве программируемых подсистем мощных ЭВМ, но и в качестве автономных станций, способных самостоятельно решать достаточно широкий круг задач.

В частности, в вопросах синтеза и изучения свойств новых дифракционных элементов значительные вычислительные мощности требуются в основном на этапе проведения вычислительного эксперимента. На других же этапах достаточно использования возможностей современных дисплейных станций типа "ГАММА-4.2" [7].

Как уже указывалось, для документирования результатов вычислительного эксперимента и обеспечения их доступности реальному пользователю существенным является представление информации в графической форме в виде изолиний, изофот, графиков, двумерных яркостных картин. При этом делается акцент на полный отказ от выдачи насчитанной информации в виде массивов чисел. Существенным моментом в такой РС является широкое использование средств распределенной системы машинной графики [8].

Полученные изображения могут быть задокументированы в виде твердой копии экрана средствами базового программного обеспечения собственно дисплейной станции [9].

Важной формой представления результатов вычислительного эксперимента является диалоговое формирование и просмотр машинных фильмов, создаваемых из последовательности отдельных кадров решения [10]. Это дает возможность не только наиболее сжато и информативно представить результаты, но и изучить процесс в динамике.

При работе как на рассматриваемой РС, так и целиком на САПР ДИК-М, предусмотрен режим "эха", в котором вся текстовая и числовая информация, выдаваемая на экран терминала, параллельно распечатывается на АЦПУ. Этот режим работы необходим в ряде случаев как для документирования процесса разработки ЭДК, так и для последующего самоконтроля.



### 3. РС интерактивного проектирования

Данный тип РС может быть использован двояко: на этапе, следующем непосредственно за вычислительным экспериментом, и как самостоятельная РС проектирования при наличии достаточных знаний у пользователя.

Математическое обеспечение рассматриваемой РС в САПР ДИК-М включает в себя все подпрограммы моделирования свойств ЭДК на основе законов геометрической оптики, описанных выше. Для оперативного отображения графической информации достаточно использования относительно небольших вычислительных мощностей, например, графических дисплеев "ГАММА-5" [11,12].

Для оперативного и наглядного анализа качества изображения проектируемых ЭДК могут быть использованы различные графические критерии. Так, в САПР ДИК-М введена специальная функция качества изображения точечного источника излучения реальным ЭДК. Эта функция представляет собой разность нормированных безразмерных функций, описывающих реальное изображение точечного источника (дифракционное пятно) и идеального безаберрационного объектива (функция Эйри, являющаяся инвариантом в пространстве Лагранжа-Гельмгольца). Для идеальной системы эта функция представляется в виде горизонтальной прямой, а по степени ее искажения легко судить об искажениях, вносимых ЭДК. Для оценки энергетических параметров ЭДК рядом с этой функцией указывается соответствующее число Штреля.

В САПР ДИК-М разрабатываемые ЭДК представлены двумя типами:

- чисто дифракционный элемент (амплитудного типа);
- фазоинверсный элемент, который представляется в виде совокупности чисто дифракционного, бесконечно тонкого ЭДК, и чисто рефракционного компонента (подложки).

Для ЭДК первого типа предусмотрен режим выдачи чертежа его маски на графопостроитель. Кроме того, маска элемента может быть выдана на экран дисплейной станции как для последующего фотографирования, так и для визуального контроля.

Алгоритм проектирования фазоинверсного ЭДК состоит в следующем. В диалоговом режиме у пользователя запрашиваются конструктивные параметры элемента, фокусное расстояние (передний и задний отрезки), расчетная длина волны, диаметр, форма поверхности, количество уровней квантования по фазе и толщина подложки. По этим данным рассчитывается фазовый профиль амплитудного ЭДК (с поправкой на радиусы зон Френеля за счет рефракции излучения на фазовой подложке). Далее в точках, соответствующих границам зон Френеля, определяется внутренняя нормаль к поверхности ЭДК и вычисляется ее смещение на величину, соответствующую высоте текущего фазового рельефа, определяемой показателем преломления материала ЭДК, количеством уровней квантования фазы и текущим значением этого уровня. Если центральная зона Френеля задана минимальной толщины, то последующие фазовые "ступеньки" идут с возрастающей толщиной, которая сбрасывается до толщины подложки при их количестве, равном количеству уровней квантования фазы. Далее этот процесс повторяется. Соответственно, если центральная зона Френеля задана максимально возможной толщины, то последующие фазовые "ступеньки" идут с убывающей толщиной, которая уменьшается до толщины подложки при их количестве, равном количеству уровней квантования фазы.

Данная РС обеспечивает пользователю возможность выдачи результатов проектирования ЭДК на перфоленду в виде программы для станков с ЧПУ. Это позволяет осуществить быструю экспериментальную проверку разработанного элемента и при

необходимости - его корректировку. Таким образом существенно уменьшается время от момента возникновения замысла ЭДК до его практической реализации.

## Выводы

Разработана интерактивная система автоматизированного проектирования элементов дифракционной квазиоптики ДИК-М, позволяющая проводить исследования пользователю, не являющемуся специалистом в области численных методов и программирования на ЭВМ.

Объем программного кода около 10000 строк.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. С и с а к я н И.Н. Формирование волновых фронтов когерентного электромагнитного излучения в продольно- и поперечно-неоднородных средах: Дисс. д.ф.-м.н.М., 1982. - 60 с.
2. М и н и н И.В., М и н и н О.В. Параболические дифракционные объективы // Современные проблемы физики и ее приложений. Тез. докл. Всесоюз. конф. М., 1987, Т. 2, С. 10.
3. Б а й б у л а т о в Ф.Х., М и н и н И.В., М и н и н О.В. Исследование фокусирующих свойств зонной пластины Френеля // Радиотехника и электроника, 1985, Т. 30, № 9, С. 1681.
4. М и н и н И.В., М и н и н О.В. Исследование структуры поля в области фокуса зонной пластины Френеля // Материалы 19-й Всесоюз. конф.: Физика. Новосибирск: НГУ, 1981, С. 54.
5. НР-65, МАТ.1, addendum, 1974.
6. М и н и н И.В., М и н и н О.В. Дифракционные радиооптические системы СВЧ диапазона // Тез. докл. 6-й Всесоюз. конф. по методам и средствам измерений электромагнитных характеристик материалов на ВЧ и СВЧ. Новосибирск, 1987, С. 169.
7. С и з ы х В.Г. Многоцелевой цветной графический дисплей высокого разрешения "ГАММА-4.2" // Тез. докл. 2-й Всесоюз. конф. по методам и средствам обработки сложной графической информации. Горький, 1985, С. 328.
8. В е л ь т м а н д е р П.В., П р о ш к и н А.А., С и з ы х В.Г. Система "массовой" интерактивной машинной графики, основные принципы и архитектура // Тез. докл. Всесоюз. конф. по проблемам машинной графики и цифровой обработки изображений. Владивосток, 1985, С. 77.
9. Б у ч н е в А.А., С и з ы х В.Г. Базовое программное обеспечение дисплея "ГАММА-4.2" // Тез. докл. 2-й Всесоюз. конф. по методам и средствам обработки сплошной графической информации. Горький, 1985, С. 192.
10. В е л ь т м а н д е р П.В. Аппаратно-ориентированные графпакеты // Проблемы машинной графики. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1982, С. 32.
11. К у л и к о в Г.Г., С и з ы х В.Г. Графический растровый дисплей для систем массовой машинной графики "ГАММА-5", технические средства // Тез. докл. Всесоюз. конф. по проблемам машинной графики и цифровой обработки изображений. Владивосток, 1985, С. 54.
12. В е л ь т м а н д е р П.В. Программное обеспечение интеллектуального графического терминала "ГАММА-5" // Тез. докл. Всесоюз. конф. по проблемам машинной графики и цифровой обработки изображений. Владивосток, 1985, С. 22.