

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

Х М И Л Ь
Зиновий Марьянович

УДК 537.874.6

**ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛАХ
СЛОЖНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

01.04.03 — Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



00814440 (L)

Работа выполнена в Физико-механическом институте
имени Г. В. Карпенко АН Украины, г. Львов.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
НАЗАРЧУК ЗИНОВИЯ ТЕОДОРОВИЧ

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук
СИРЕНКО КЮРИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ,
доктор физико-математических наук
ВИНОГРАДОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

Ведущая организация - Институт прикладных проблем механики и
математики АН Украины (г. Львов).

Защита состоится "... 22 ..." декабря 1992 г.
в ... 15⁰⁰ ... часов на заседании специализированного совета
Д 016.64.01 в Институте радиофизики и электроники АН Украины:
310085, Харьков, ул. акад. Проскуры, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИРЭ АН
Украины.

Автореферат разослан "... 12 ..." ноября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

К. А. ЛУКИН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важных проблем современной радиофизики является теоретическое исследование в широком частотном диапазоне волновых процессов, протекающих в элементах проектируемой радиоэлектронной аппаратуры. В настоящее время в связи с прогрессом вычислительной техники все большее распространение находят прямые численные методы, позволяющие решения возникающих при этом краевых задач строить с минимальной идеализацией геометрии структуры и вида первичного поля. Ценность таких подходов заключается в их общности и универсальности. Наиболее результативным является применение техники интегральных уравнений, позволяющих в строгой электродинамической постановке, с заданной точностью в широком частотном диапазоне решать дифракционные задачи. В настоящей работе задачи рассеяния решены методом сингулярных интегральных уравнений (СИУ). Решающим остается вопрос построения эффективных и хорошо обусловленных схем их численного обращения.

Практически важным классом задач является исследование взаимодействия электромагнитного поля с металлодиэлектрическими структурами, которые находят широкое применение при конструировании СВЧ радиосистем и представляют интерес для разведочной геофизики и радиоволновой дефектоскопии. При создании эффективных трактов мм и субмм диапазонов волн значительный интерес представляют цилиндрические и зеркальные щелевые линии, а в квантовой электронике широко применяются открытые резонаторы с диэлектрическими активными телами, являющиеся основными узлами современных квантовых усилителей и генераторов. В антенной технике для плавного управления излучающими свойствами зеркал используются диэлектрические покрытия и насадки. Однако, несмотря на большой практический интерес, существует весьма ограниченное количество публикаций, касающихся численных методов математического моделирования волновых процессов в металлодиэлектрических структурах. Следовательно, разработка универсальных численных подходов решения задач дифракции на металлодиэлектрических телах со сложной геометрией сечения и произвольным взаимным расположением экранов и диэлектрических цилиндров является актуальной проблемой в области теории дифракции.

Воарастает интерес и к электродинамическому анализу иде-

АНБ им. В. Стефанова
АН УРСР

ально проводящих цилиндрических структур кусочно-гладкого профиля: многоугольных стержней, волноводных неоднородностей, решеток из многоугольных цилиндров, которые могут выступать в качестве антенных устройств, замедлителей, фильтров. В антенной технике наиболее актуальным является вопрос управления излучением в дальней зоне, что связано с использованием дополнительных излучателей, решеток переменной прозрачности на краях рефлектора, цилиндрических оболочек и фланцев. Весьма важную область исследования представляет изучение рассеяния на диэлектрических телах в связи с их широким применением в качестве резонаторов и волноводов в мм и субмм диапазонах волн. Следовательно, актуальной задачей теории дифракции является создание универсальных и хорошо обусловленных алгоритмов решения векторных задач возбуждения диэлектрических цилиндров и экранов с произвольно изменяющейся геометрией сечения.

Из сказанного следует, что актуальность выбранного направления исследований подтверждается, во-первых, необходимостью дальнейшего развития численных методов строгого решения задач дифракции на кусочно-однородных структурах с кусочно-гладкими контурами сечений и, во-вторых, возрастающей потребностью практики в более адекватном моделировании волновых процессов и на этой основе прогнозировании электродинамических свойств проектируемых новых узлов и систем СВЧ техники.

Целью работы является:

- разработка с помощью СИУ новых эффективных алгоритмов строгого решения плоских задач дифракции на цилиндрических металлодиэлектрических структурах с кусочно-гладкими контурами поперечных сечений при произвольном соосном взаимном расположении экранов и диэлектрических стержней;

- численное решение векторных задач рассеяния на системе отдельных экранов и диэлектрических цилиндров некоординатного кусочно-гладкого профиля;

- применение полученных вычислительных схем для решения прикладных задач анализа дифракционных свойств сложных электродинамических структур, связанных с антенной и радиолокационной техникой.

Методика исследования. Для решения указанных дифракционных задач в работе используется аппарат СИУ первого или второго рода, определенных на замкнутых или разомкнутых контурах. В

этих уравнениях выделены интегралы с логарифмической, сингулярной (типа Коши) или гиперсингулярной (в смысле Адамара) особенностями, а также учтены слагаемые с неподвижными нерегулярностями. Решение полученных уравнений строится методом механических квадратур, основанном на использовании вычислительных формул интерполяционного типа. Для расчета встречающихся особых интегралов построены некоторые новые квадратурные правила.

Научная новизна и достоверность. В работе впервые на основании метода СИУ разработаны высокопродуктивные универсальные алгоритмы численного решения задач дифракции E- и H- поляризованных волн широкого частотного диапазона на металлodieлектрических структурах кусочно-гладкого профиля (система экранов с dieлектрическими насадками или включениями, частично экранированный dieлектрический стержень) и векторных задач возбуждения экранов и dieлектрических цилиндров некоординатного сечения. Обоснованы рекомендации, направленные на повышение эффективности численных подходов к решению дифракционных задач на ребристых структурах. На основании этого в строгой постановке впервые проведено исследование рассеивающих свойств цилиндрических структур, состоящих из равнообразных комбинаций кусочно-гладких экранов и dieлектрических цилиндров произвольной проводимости. Достоверность полученных результатов подтверждается как внутренним контролем сходимости, так и апробацией предложенных вычислительных схем на известных результатах, полученных другими подходами и авторами.

Практическая значимость работы заключается:

- в разработке универсальных хорошо обусловленных алгоритмов для исследования в широком волновом диапазоне рассеивающих свойств идеально проводящих, dieлектрических и металлodieлектрических структур со сложной геометрией поперечного сечения;

- в создании комплексов вычислительных программ, позволяющих без существенных изменений решать широкий круг задач электромагнитного возбуждения сложных электродинамических структур и сосредоточить при этом внимание исследователей на интерпретации результатов и построении новых модельных представлений;

- в установленных физических закономерностях, касающихся

исследования влияния различных насадок на структуру рассеянного поля и резонансных свойств рассеивателей при разнообразных геометрических и электродинамических параметрах, и имеющих важное значение в антенной, радиолокационной технике, в машинном проектировании СВЧ систем с заданными оптимальными параметрами;

- в расширении сферы приложений развитых строгих численных подходов, основанных на методе СИУ, в квазиоптическую область частот, что можно использовать для определения предела применения приближенных расчетных формул.

Апробация работы. Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на 13 конференции молодых ученых физико-механического института АН УССР (Львов, 1987), семинаре по радиофизике и электронике молодых ученых и специалистов (Харьков, 1986), 4 Всесоюзном симпозиуме "Методы дискретных особенностей в задачах математической физики" (Харьков, 1989), Всесоюзной конференции "Интегральные уравнения и краевые задачи математической физики" (Владивосток, 1990), 4 Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование и САПР радиозлектронных и вычислительных систем СВЧ на ОИС" (Волгоград, 1991), 1 Международной конференции по информационным технологиям для анализа изображений и распознавания образов (Львов, 1990), Северо Американском симпозиуме по радиофизике (Лондон, Канада, 1991), 4 Международном семинаре "Математические методы в теории электромагнетизма" (Алушта, 1991), семинаре "Численное решение прямых и обратных задач электродинамики СВЧ" под руководством д. ф. - м. н. Н. Н. Войтовича (1988). Диссертационная работа в целом обсуждалась на научных семинарах ФМИ, ИРЭ АН Украины.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, пяти приложений на 37 стр. и списка литературы на 17 стр. Она содержит 73 стр. таблиц и рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы, дан обзор публикаций по исследуемым проблемам, сформулирована цель работы, кратко охарактеризовано ее содержание, по

новизна, достоверность и практическое значение результатов исследований и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе метода СИУ разработаны высокопродуктивные схемы численного решения задач дифракции Е- и Н-поляризованных волн на экранах практически любого кусочно-гладкого профиля. В однородной и непроводящей среде с волновым числом k расположена система из n бесконечно тонких идеально проводящих цилиндров, бесконечно протяженных вдоль образующих, которые параллельны оси Oz декартовой системы координат x, y, z . Сечения цилиндров плоскостью $z = \text{const}$ ограничены контурами L_j ($j = \overline{1, n}$), а через L обозначена совокупность направляющих цилиндров ($L = \sum_{j=1}^n L_j$). Не исключены случаи сколь угодно близкого расположения, взаимного соприкосновения и пересечения дуг L_j . Описанная структура облучается первичным электромагнитным полем, компоненты которого зависят от координат z по закону

$$\vec{W}_0(x, y, z) = \vec{W}_0(x, y) \exp(i\delta_0 z). \quad (1)$$

Исходная квазитрехмерная задача дифракции сведена к двум скалярным задачам по определению из уравнения Гельмгольца продольных E_z и H_z компонент суммарного поля, удовлетворяющих соответственно условиям Дирихле (Е-поляризация) или Неймана (Н-случай) на линии L , Мейкснера на ребрах и излучения на бесконечности.

Интегральные представления для суммарных напряженностей электрических и магнитных полей в нормализованной форме имеют вид

$$E_z(z, \bar{z}) = E_0(z, \bar{z}) + \frac{\pi i}{2} \sum_{j=1}^n \int_{-1}^1 j_j(\tau) H_0^{(1)}(\alpha |r_j|) d\tau; \quad (2)$$

$$H_z(z, \bar{z}) = H_0(z, \bar{z}) - \frac{\pi i}{2} \alpha \sum_{j=1}^n \int_{-1}^1 m_j(\tau) H_0^{(1)}(\alpha |r_j|) \dot{I}m \left(\frac{r_j}{|r_j|} \bar{T}_j' \right) d\tau, \quad (3)$$

где $\alpha^2 = k^2 - \delta_0^2$; $r_j = T_j - z$; $z = x + iy$; $\bar{z} = x - iy$; $T_j \equiv T_j(\tau)$ - параметрические уравнения контуров L_j в базисной системе xOy ; $\tau \in (-1, 1)$; функции $j_j(\tau)$ и $m_j(\tau)$ пропорциональны продольной и поперечной компонентам токов, индуцированных на j -ом экране. Краевая задача приведена к системе интегральных уравнений с

логарифмическими особенностями (Е-поляризация) или с выделенными, кроме того, гиперсингулярными интегралами и сильными стационарными особенностями (Н-поляризация). Полученные уравнения решены на основе метода механических квадратур с использованием вычислительных формул интерполяционного типа.

В случае раздельного размещения разомкнутых цилиндрических поверхностей неизвестные функции ищем в следующих классах

$$j_p(\tau) = (1-\tau^2)^{-1/2} \varphi_p(\tau); m_p(\tau) = (1-\tau^2)^{1/2} \psi_p(\tau); \varphi_p(\tau), \psi_p(\tau) \in H, \quad (4)$$

а в качестве узлов интерполяции выбираем нули полиномов Чебышева первого и второго рода.

Исследуемая структура возбуждается плоской электромагнитной волной

$$W_0(z, \bar{z}) = \sin \gamma \exp\{-ik \sin \gamma \operatorname{Re}[z e^{-i\beta}]\}, \quad \delta_0 = k \cos \gamma, \quad (5)$$

где γ - угол между осью Oz и направлением \vec{n} распространения падающей волны, β - отсчитываемый против часовой стрелки угол между отрицательным направлением оси Ox и проекцией \vec{n} на плоскость xOy.

При исследовании диаграммы рассеяния на эллиптическом экране ($a = 0,5\lambda$; $\varepsilon = b/a = 0,5$; a и b - полуоси, расположенные вдоль Ox и Oy; λ - длина облучающей волны) установлено, что уменьшение угла γ вызывает понижение уровня излучения с освещенной и теневой стороны структуры и приводит к более плавному распределению дальнего поля. Здесь же приведены частотные зависимости полного и обратного поперечников рассеяния электромагнитной волны (5) на продольно-щелевом эллиптическом цилиндре и двущелевом резонаторе, состоящем из параболических зеркал при различных геометрических параметрах задачи. Для получения результатов, устойчивых в трех-четыре значащих цифрах, неизвестные функции на элементах структуры аппроксимированы в N=14 точках при ka=1 и N=18 - для ka=3.

Для эффективного и строгого решения задачи дифракции в коротковолновой области спектра возбуждающего поля исходный контур L сечения экрана разбит на n взаимодействующих и соприкасающихся своими концами гладких элементов L_j ($j = 1, n$). Рассмотрены два подхода к построению решений полученных интегральных уравнений. В первом случае, используя представления

(4) и чебышевскую аппроксимацию неизвестных функций, приходим к простой вычислительной схеме, которая неверно учитывает поведение решений в окрестностях гладких стыков дуг L_j и соответствует разрывному контуру L .

Во втором случае неизвестные функции на крайних дугах $L_{i,n}$ представляем в виде

$$j_s(\tau) = (1 \pm \tau)^{-1/2} \varphi_s(\tau); \quad m_s(\tau) = (1 \pm \tau)^{1/2} \psi_s(\tau); \quad s=1, n; \quad \tau \in (-1, 1), \quad (6)$$

а функции $j_s(\tau), m_s(\tau)$ ($s=2, n-1$) считаем непрерывными по Гельдеру. Теперь в случае гладкого контура L поведение решений в окрестностях ребер и точек стыка элементов L_j учтено строго.

Предложенные подходы к определению неизвестных функций апробированы на результатах расчета обратного и полного поперечников рассеяния плоской E- и H- поляризованной волны на круговой цилиндрической щелевой линии при $n=3$ и $N=8$. Сделан вывод о том, что в E-случае неверный учет поведения плотностей токов в точках разбиения экрана практически не влияет на точность вычисления рассеянного поля (полученные данные в 4-5 знаках мантиссы совпадают с эталонными значениями). В случае H-поляризации установлено, что зануление искоемых функций в точках стыка дуг L_j приводит к значительной погрешности результата, причем, в длинноволновой области устойчивые значения получены только при выделении в исходной системе квазисингулярных слагаемых.

На основе предложенных алгоритмов в строгой электродинамической постановке проведен расчет продольной E_z компоненты дифрагированного поля плоской волны на эллиптическом экране:

$2a = 15 \lambda; \quad \varepsilon = 0,1$. Без учета симметрии задачи устойчивый результат с относительной ошибкой $< 1\%$ получается при $n=4$ и $N=30$. Аналогичная дискретизация контура L дает возможность получить устойчивую диаграмму рассеяния E-волн на экране шириной 25λ .

Представлены результаты расчета диаграммы дифрагированного поля на параболическом зеркале, возбужденном токовой нитью. В E(H) - случае параметры экрана принимают значения $2a = 13(12) \lambda; \quad \varepsilon = \delta/a = 0,39$ (δ - глубина рефлектора). Для получения устойчивого результата в трех-четыре значащих цифрах необходимо положить $n=8(10)$ и $N=16(15)$. Учет симметрии сокращает вдвое количество решаемых уравнений. Для замкнутого эллипти-

ческого цилиндра с осями $2a = 82$ и $2b = 162$ устойчивые в 3-4 знаке мантиссы значения дифрагированного поля получены при $n=4$, $N=24$. Указанные задачи не удается решить путем рассмотрения сечения зеркала в виде сплошного контура L и обращения при этом одного интегрального уравнения.

В случае кусочно-гладкого профиля исходный экран точками излома разбит на отдельные гладкие звенья. На основе предыдущих изложений в случае E-поляризации интегральные уравнения алгебраизируем, используя квадратурные формулы Гаусса-Чебышева. В H-случае из анализа характеристической части полученных уравнений следует, что зануление искоемых функций в угловых точках не является необходимым условием и в окрестности ребер они принимают определенные конечные значения, а их производные обращаются в бесконечность. Однако, проведенные численные эксперименты показывают, что скругление точек излома экрана и использование при этом представлений (6), позволяющие применить более простую вычислительную схему, с точностью до трех знаков мантиссы не влияют на результат расчета суммарного поля в ближней и дальней зонах. Необходимым условием получения достоверного результата является корректный учет неподвижных особенностей ядер в окрестностях точек излома.

На основе разработанных алгоритмов проведено исследование влияния формы препятствия на его рассеивающие свойства, решена задача возбуждения продольно-щелевого резонатора эллиптического сечения с параболическими фланцами, позволяющими повысить эффективность его направленного излучения.

Во второй главе решена векторная задача дифракции волн (1) ТМ или ТЕ типа на диэлектрических цилиндрах произвольного кусочно-гладкого профиля. Строгое ее рассмотрение требует решения векторной системы уравнений Максвелла при выполнении граничных условий непрерывности тангенциальных компонент электромагнитного поля и условия излучения Зоммерфельда. Для эффективной алгоритмизации задачи введены скалярные функции

U_{12} и V_{12} , имеющие смысл продольных компонент электромагнитного поля и удовлетворяющие уравнениям Гельмгольца (индексы 1 и 2 соответствуют размещению точки наблюдения во вмещающей среде и в области цилиндров). С целью полного удовлетворения граничным условиям решение задачи представлено в виде суперпозиции волн ТМ и ТЕ типов, несмотря на то, что пер-

вичное поле является волной только одного типа. Тогда поперечные компоненты суммарного поля определяются через функции U_{q2} , V_{q2} и исходная векторная проблема сведена к решению краевых задач по определению скалярных функций, заданных на линии поперечного сечения диэлектрической структуры. На основе представления вторичного поля в виде потенциала простого слоя и принципа суперпозиции получена система интегральных уравнений второго рода, содержащих логарифмическую особенность и нерегулярность типа Коши. Для их численного обращения используются вычислительные схемы метода механических квадратур.

На основе предложенного подхода решена квазитрехмерная задача возбуждения системы n цилиндров произвольной проводимости; сечения которых ограничены гладкими линиями. Алгоритм апробирован на имеющихся литературных данных (Васильев Е. Н., Солодухов В. В.) расчета поперечных компонент поля рассеяния ТЕ волны на проводящем круговом цилиндре: $K_1 a = 2.2$; $K_2 / K_1 = 1.56 + i0.05$. Сравнимые результаты совпадают с точностью до трех-четырех значащих цифр при выборе $N=24$ точек аппроксимации неизвестных функций.

В случае нормального ($\gamma = \pi/2$) падения облучающей волны исходная система интегральных уравнений относительно плотностного потенциала, не имеющих физического смысла, содержит слагаемые только со слабыми логарифмическими особенностями. Здесь же для двумерного случая показана возможность использования формулы Грина для получения интегральных уравнений первого рода с сильной особенностью в ядрах, позволяющих непосредственно определять тангенциальные компоненты суммарного поля на контурах поперечных сечений цилиндров. На основе разработанных вычислительных подходов исследовано взаимодействие трех эллиптических цилиндров ($a = 0.2\lambda$; $\epsilon = 0.5$; $K_2 / K_1 = 1.5 + i\tilde{K}_2$; $\tilde{K}_2 = 0$; 2). Установлено, что характер распределения излучения в волновой зоне в значительной степени зависит от расстояния между цилиндрами, влияние которого на рассеивающие свойства структуры носит резонансный характер. При этом происходит смещение (наиболее осязаемое в Н-случае) резонансных пиков, соответствующих максимумам поперечников полного и обратного рассеяния.

В заключительном параграфе настоящей главы построен алг

ритм решения векторной задачи дифракции на ребристом диэлектрическом цилиндре путем разбиения границы его сечения на n отдельных взаимодействующих звеньев с общими концевыми точками. В полученной системе интегральных уравнений второго рода, кроме логарифмической особенности и сингулярности Коши, выделены стационарные особенности в ядрах. Неизвестные плотности потенциала простого слоя, не имеющие физического смысла, ищем в классе функций, непрерывных по Гельдеру. Проведено исследование влияния электродинамических, геометрических параметров рассеивателя и направления его возбуждения на характер поля в ближней и дальней зонах. Показана возможность эффективного применения предложенного численного подхода к решению задач дифракции в высокочастотной области спектра. Для получения трех верных знаков в мантиссе амплитуды ближнего поля дифракции на эллиптическом цилиндре ($2a = 7\lambda$; $\epsilon = 0.2$) необходимо решить 80 комплексных уравнений. Рассмотрение контура сечения как сплошной линии и нахождение неизвестных плотностей в классе $2\mathcal{X}$ -периодических функций практически не позволяет получить устойчивый результат поля дифракции в ближайшей зоне при малых значениях параметра $\epsilon = b/a$.

В третьей главе решены двумерные задачи дифракции E- и H-поляризованных электромагнитных волн на соосных бесконечно протяженных диэлектрических цилиндрах и идеально проводящих экранах некоординатного кусочно-гладкого профиля при их произвольном взаимном расположении, включая случаи прикосновения и пересечения. Сложность решения таких задач в строгой электродинамической постановке обусловлена прежде всего необходимостью корректного учета геометрических нерегулярностей исследуемой кусочно-однородной структуры. Для эффективной алгоритмизации краевой задачи исходный рассеиватель разделен на отдельные взаимодействующие элементы, концы которых совпадают с точками геометрических и электродинамических сингулярностей: угловые точки, стыки экранов с диэлектрическими телами. Суммарное поле определено в виде суперпозиции первичной волны и полей рассеяния на цилиндрических экранах и диэлектрических стержнях или их звеньях, образованных при разбиении исходной структуры. Соответствующие компоненты поля представлены в виде потенциала простого слоя с неизвестными плотностями, не имеющими физического смысла. Поля рассеяния на металлических пре-

пятствиях определены интегральными слагаемыми (2), (3). Из различных условий получены системы интегральных уравнений второго рода, которые в случае Е-поляризации обладают только логарифмической особенностью, а в Н-случае, помимо этого, содержат гиперсингулярные интегралы (в смысле конечной части по Адамару) и сильные неподвижные сингулярности, позволяющие учесть специфику геометрии исследуемой структуры (близкое расположение ее элементов, их взаимное соприкосновение или пересечение). Неизвестные плотности потенциала простого слоя на контуре сечения диэлектрика ищем в классе непрерывных по Гельдеру функций, не имеющих особенностей на краях элементов разбиения, или в виде 2π -периодических непрерывных функций (граница диэлектрика - сплошной гладкий контур). По аналогии с задачей дифракции на экране в однородном пространстве, функции, пропорциональные плотностям индуцированных токов, находим в классах (6), скругляя при этом точки излома и выделяя корневые особенности только на краях зеркал.

При решении задачи рассеяния на частично экранированном диэлектрическом стержне предложен другой способ алгоритмизации, основанный на применении второй формулы Грина к фундаментальным решениям уравнения Гельмгольца и неизвестным функциям, имеющим смысл компонент дифрагированного поля. В результате для обеих поляризаций получены системы гиперсингулярных интегральных уравнений первого рода, позволяющие непосредственно определить тангенциальные компоненты суммарного поля на экране и свободной от металла части диэлектрика.

Проведено исследование рассеяния электромагнитных волн промежуточного частотного диапазона на различных металлодиэлектрических структурах: параболический резонатор с эллиптическим диэлектрическим включением, экраны параболического и ломаного профиля с цилиндрическими насадками произвольной проводимости, диэлектрический стержень с продольно-щелевым металлическим покрытием эллиптического и прямоугольного профиля. Выявлена существенная зависимость дифракционных свойств таких рассеивателей от геометрических и физических параметров задачи, подтверждающая необходимость ее исследования в строгой электродинамической постановке. Установлено, что использование цилиндрических эллиптических насадок ($a_1 = 0,1\lambda$; $\epsilon_1 = 1$) произвольной проводимости на краях параболического зеркала (a_2

-1.5 λ : $\varepsilon_2 = \sigma_{\text{дв}} / -0.2$) позволяет управлять остронаправленностью основного лепестка диаграммы поля и уровнем бокового излучения в дальней зоне.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, намечены перспективы ее дальнейшего развития.

В приложениях 1-5 приведены соответственно основные соотношения из теории функций комплексной переменной, представления для функций Ханкеля первого рода, формулы численного интегрирования регулярных, логарифмических и сингулярных (по Коши и Адамару) интегралов. Некоторые из квадратурных правил, касающиеся особых и квазисингулярных интегралов с весовыми функциями в виде единицы и $(1 \pm x)^{\pm \nu}$, получены впервые.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Впервые на основе аппарата сингулярных интегральных уравнений (СИУ) построены высокопродуктивные численные алгоритмы строгого решения плоских задач рассеяния на кусочно-однородных металлодиэлектрических телах и векторных задач дифракции на экранах и диэлектрических цилиндрах сложного кусочно-гладкого профиля. В основу алгоритмизации указанных проблем положено представление исходного контура поперечного сечения структуры как суперпозиции гладких дуг, концы которых совпадают с геометрическими и электродинамическими нерегулярностями, и последующий строгий учет особенностей поведения подынтегральных функций в окрестностях точек сшивания элементов рассеивателя. Полученные интегральные уравнения решены методом механических квадратур с использованием новых вычислительных формул, основанных на полиномиальной аппроксимации неизвестных функций.

2. В результате проведенных численных экспериментов установлены следующие закономерности:

- в случае E-поляризации неверный учет особенностей искомых плотностей токов в окрестностях точек касания элементов экранов приводит к простой вычислительной схеме и практически не влияет на точность результата; в H-случае необходимым условием получения достоверного результата в широком частотном диапазоне является корректный учет особенностей поведения неиз-

вестных функций и ядер интегральных уравнений в окрестностях геометрических и электромагнитных неоднородностей, заключающийся в выделении соответственно определенной весовой функции и слагаемых со стационарными особенностями;

- методом потенциала и на основе формулы Грина получены различные по содержанию и эффективности системы интегральных уравнений задач дифракции на частично металлизированном и диэлектрическом цилиндрах, причем первая из них содержит уравнения второго рода и является более простой с точки зрения ее численного обращения;

- показана возможность строгого анализа дифракционных свойств рассматриваемых структур и для высокочастотной области спектра облучающего поля.

3. На основе разработанных вычислительных схем проведены исследования физических закономерностей рассеяния электромагнитных волн на цилиндрических структурах некоординатного профиля.

- При анализе резонансных свойств эллиптического щелевого резонатора установлено, что в Е-случае, в отличие от Н-поляризации, не возникает длинноволновой резонанс Гельмгольца и частотные зависимости полного поперечника рассеяния носят более гладкий характер и менее удобны для наблюдения. Показано, что увеличение вытянутости структуры вдоль направления возбуждения приводит к смещению резонансных максимумов в более длинноволновую область спектра, а при увеличении до определенных границ размеров щели наблюдается возрастание угловой ширины и амплитуды резонансных пиков (Е-поляризация) и смещение их в более высокочастотную область (Н-поляризация).

- Исследован резонансный характер влияния боковых фланцев на излучение эллиптического резонатора в дальней зоне. Показано, что применение параболических насадок, волновые размеры которых соответствует максимуму обратного рассеяния, приводит к уменьшению ширины основных лепестков диаграммы рассеяния и снижению уровня бокового излучения при двух-трехкратном увеличении энергии, переизлученной в направлении источника.

- Расчеты показывают, что смещение облучателя из фокуса параболического рефлектора приводит к значительной деформации главного лепестка диаграммы суммарного поля. При удалении источника наблюдается увеличение уровня теневого излучения,

его приближение вызывает возрастание боковых лепестков диаграммы с освещенной стороны зеркала.

- Изучен характер влияния сплошных концевых цилиндрических насадок на характер излучения параболического экрана в волновой зоне. Установлено, что при увеличении проводимости добавок в случае $E(H)$ -поляризации наблюдается одновременное уменьшение (увеличение) угловой ширины основного лепестка диаграммы направленности и уровня бокового рассеяния.

- Установлен резонансный характер взаимодействия трех цилиндров произвольной проводимости. В случае $E(H)$ -поляризации при расстоянии между цилиндрами, соответствующему максимуму полного поперечника рассеяния, наблюдается уменьшение (увеличение) уровня бокового излучения при значительном (несущественном) изменении амплитуды основного лепестка по сравнению с геометрией структуры, соответствующей минимальному полному рассеянию. Уменьшение уровня бокового излучения и возрастание амплитуды основных лепестков происходит при параметрах препятствия, соответствующим пику переизлученной в направлении источника энергии.

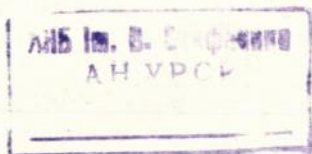
ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Назарчук З. Т., Хмиль З. М. Дифракция E -поляризованной электромагнитной волны на системе экранов, расположенных вне диэлектрического цилиндра // Теорет. электротехника. - 1986. - Вып. 40. - С. 89-94
2. Назарчук З. Т., Хмиль З. М. Численное решение задачи дифракции E -поляризованных электромагнитных волн на цилиндрическом экране произвольного сечения // Изв. вузов. Радиофизика. - Горький, 1986. - 15с. - Деп. в ВИНИТИ 26.11.86, N 8034-В.
3. Назарчук З. Т., Хмиль З. М. Плоская задача дифракции электромагнитных волн на системе экранов, находящихся вне диэлектрического цилиндра (H -поляризация) // Теорет. электротехника. - 1987. - Вып. 42. - С. 24-29.
4. Назарчук З. Т., Хмиль З. М. О регуляризирующей роли слагаемых с неподвижной особенностью при численном решении СИУ // В кн.: Методы дискретных особенностей в задачах математической физики. ч. II. Тезисы докл. IV Есесокон. симпоз. - Харьков, 1989. - С. 182-185.
5. Назарчук З. Т., Хмиль З. М., Овсянников О. И. Сингулярные ин-

тегральные уравнения в электродинамическом анализе цилиндрических металлодиэлектрических структур // В кн.: Интегральные уравнения и краевые задачи математической физики. Тезисы докл. Всесоюз. конф., Владивосток, 22-26 окт., 1990. - С. 75.

6. Nazarchuk Z. T., Khmil Z. M. Vektor Problem of Waves Diffraction by Dielectric Cylinder // Ist IAPR'90. The First Int. Conf., Lviv, USSR, October 22-28, 1990. V. II. - P. 331-335.
7. Назарчук З. Т., Хмил З. М. Численное исследование дифракции волн на металлодиэлектрических цилиндрических структурах // В кн.: Математическое моделирование и САПР радиоэлектронных и вычислительных систем СВЧ и КВЧ на объемных интегральных схемах (ОИС). Тезисы докл. IV Всесоюз. научно-техн. конф., Волгоград, 11-13 сент., 1991. - С. 44-45.
8. Nazarchuk Z. T., Khmil Z. M. Waves Diffraction on Screens with Dielectric Tips // Proc. North American Radio Science Meeting & Int. IEEE/AP-S Symposium. London, The University of Western Ontario, Canada, 24-28 June, 1991. - P. 67.
9. Nazarchuk Z. T., Khmil Z. M. Diffraction of Electromagnetic Waves on Screens With Dielectric Tips // Math. Methods in Electromagnetic Theory. Proc. 4th Int. Seminar, 15-24 Sept., 1991, Alustha. - P. 92-105.
10. Назарчук З. Т., Хмил З. М. Численный анализ дифракции E-поляризованных волн на частично экранированном диэлектрическом цилиндре произвольного профиля // Теорет. электротехника. - 1991. - Вып. 50. - С. 3-12.

З.Т.



Подписано к печ. 30.10.92. Формат 60x84/16 Печать офсет. Бумага
офсет. Усл. п.л. 0,93 Усл. кр.-отт 1,17 Уч.-изд.л. 0,8 Тираж 120 экз.
Зак. 3211.

Областная книжная типография, 290000, Львов, ул. Стефаника, 11.

469033

Ab 26.335

Ab 26.335

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.

Handwritten text, mostly illegible due to fading and bleed-through.