

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

ОВСЯННИКОВ Олег Иванович

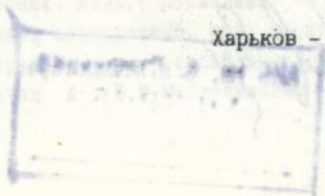
ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
НЕОДНОРОДНОСТЯХ В ПЛОСКОСЛОИСТОЙ СРЕДЕ

01.04.03- радиопизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1993





В 26.582

Работа выполнена в Физико- механическом институте  
им. Г.В. Карпенко АН Украины

Научный руководитель: доктор физико- математических наук,  
старший научный сотрудник  
НАЗАРЧУК З.Т.

Официальные опоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Кириленко Анатолий Афанасиевич  
(ИРЭ АН Украины)

кандидат физико-математических наук  
Яровой Александр Георгиевич (ХГУ)

Ведущая организация: Радиоастрономический институт АН Украины

Защита состоится "12" марта 1993 г. в 15<sup>30</sup> часов на заседании  
специализированного совета Д 053.06.04 Харьковского  
госуниверситета по адресу: Харьков-77, пл. Свободы 4, ХГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной  
библиотеке ХГУ

Автореферат разослан "9" февраля 1993г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
каф. физ.-мат. наук


АБ - 26. 000

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Двумерные задачи дифракции электромагнитных волн на цилиндрических неоднородностях в кусочно-однородной среде занимают важное место в современной радиофизике, дефектоскопии, геофизике. Одним из наиболее распространенных в настоящее время методов строгого решения таких задач является метод интегральных уравнений. Как правило, используют два вида таких уравнений: двумерные интегральные уравнения по поперечному сечению препятствия или одномерные интегральные уравнения по охватываемому сечению граничному контуру. В зависимости от физических свойств и геометрии препятствий используют их различные упрощенные математические модели: идеально проводящий бесконечно тонкий экран, неидеально проводящий или диэлектрический цилиндр, тонкое включение постоянной толщины. Задачи дифракции электромагнитных волн на таких неоднородностях удобно свести к контурным интегральным уравнениям. Их численное решение весьма эффективно в наиболее трудном для анализа промежуточном (резонансном) диапазоне, когда геометрические размеры неоднородностей сравнимы с длиной возбуждающей волны.

В задачах дифракции на неоднородностях, содержащихся в больших по сравнению с длиной волны телах, приходится ограничиваться упрощенной электродинамической моделью тела, состоящей в учете лишь одной границы раздела. В наиболее простом случае плоской границы имеем наделенное различными электродинамическими свойствами полупространство. Задача дифракции электромагнитной волны на прямолинейной полосе в проводящем полупространстве решалась В.И.Дмитриевым. Здесь предполагалось, что проводимость полосы немного больше проводимости среды и задача сводилась к рассмотрению рассеяния электромагнитного поля идеально проводящим бесконечно тонким прямолинейным экраном.

Существенно более сложной в математическом и более богатой в физическом отношении является электродинамическая модель вмещающей среды в виде плоскопараллельного слоя. При отсутствии потерь в таком слое допускается существование собственных незатухающих волн. Последний эффект широко используется в современной электронике при проектировании различных устройств миллиметрового и субмиллиметрового волновых диапазонов. А.И.Носичев и В.П.Шестопаловым предложено самосогласованное

решение задачи дифракции на неоднородности в открытом планарном волноводе.

Главной особенностью известных из литературы решений дифракционных задач для плоскослойной среды с цилиндрическими неоднородностями является ограниченность формы контура препятствий. Эффективные алгоритмы и достоверные расчеты дифрагированного поля получены лишь для сечения постоянной кривизны. На практике же требуются методы, позволяющие получать достоверные результаты в широком диапазоне изменений геометрических и физических параметров исследуемой структуры. Развитие таких подходов в значительной степени определяет наши познания физики происходящих процессов, а следовательно и успех в освоении новых (мм и субмм) радиодиапазонов путем проектирования соответствующей аппаратуры.

Целью работы является:

1. Развитие метода сингулярных интегральных уравнений для задач дифракции волн на цилиндрических телах произвольного поперечного сечения в плоскослойной среде.

2. Разработка эффективных численных алгоритмов, позволяющих определять дифрагированное поле с гарантированной точностью.

3. Исследование электродинамических свойств тонких цилиндрических неоднородностей и возникающих резонансных явлений при их наличии в плоскослойной среде.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. В строгой постановке решена двумерная задача дифракции электромагнитных волн на системе экранов произвольного профиля в полупространстве и на его поверхности.

2. Решена задача рассеяния электромагнитного поля системой криволинейных тонких диэлектрических или слабо проводящих вкраплений, расположенных в полупространстве.

3. Решена задача дифракции электромагнитной волны в полупространстве с цилиндром, ослабленным тонким дефектом, моделирующая растрескивание сварного шва или сложных металлических конструкций.

4. В корректной постановке решена задача дифракции электромагнитных волн на системе экранов произвольного профиля в трехслойной среде.

5. Разработан подход эффективного вычисления интегралов типа

Зоммерфельда, связанных с функциями Грина дифракционных задач для плоскостных сред, на основе интерполяционного полинома.

6. Для численного решения систем интегральных уравнений предложен итерационный подход, учитывающий последовательное переотражение волн на неоднородностях. Последний позволил решить задачу дифракции на экранах с размерами до 30 длин волн и существенно уменьшить машинное время.

#### Практическая ценность работы.

1. Создан комплекс программ определения рассеянного поля тонкими неоднородностями произвольного профиля в плоскостной и кусочно-однородной средах.

2. Создан пакет программ для массового определения интегралов типа Зоммерфельда на основе интерполяционных формул и с использованием метода контурного интегрирования.

3. Показана возможность оценки глубины погружения, форм и размера дефектов по фазовым зависимостям рассеянного поля.

4. Показано, что, исследуя амплитуду рассеянной волны, можно определить расстояние между неоднородностями в плоскостной среде.

5. Исследовано влияние кривизны резонансного экрана на прохождение собственной волны диэлектрического волновода. Показано, что выбором соответствующей кривизны экранов можно улучшить свойства резонансных фильтров.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы определяется тем, что рассмотренные задачи исследованы в корректной постановке. Все численные результаты подвергались проверке на сходимость путем изменения количества узлов в квадратурных формулах. Часть полученных результатов согласуется с работами других авторов.

Апробация работы и публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на: I-й Международной конференции по анализу изображений и распознаванию образов (Львов, 1990), Международном симпозиуме "Progress in Electromagnetics Research" (Массачусетс, 1991), XI и XII Всесоюзных научно-технических конференциях "Неразрушающие физические методы и средства контроля" (Москва, 1987; Свердловск, 1990), III Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование и САПР радиозлектронных систем СВЧ на ОИС" (Суздаль, 1989), Всесоюзной научно-технической конференции "Интегральные уравнения и краевые задачи

решение задачи дифракции на неоднородности в открытом планарном волноводе.

Главной особенностью известных из литературы решений дифракционных задач для плоскостной среды с цилиндрическими неоднородностями является ограниченность формы контура препятствий. Эффективные алгоритмы и достоверные расчеты дифрагированного поля получены лишь для сечения постоянной кривизны. На практике же требуются методы, позволяющие получать достоверные результаты в широком диапазоне изменений геометрических и физических параметров исследуемой структуры. Развитие таких подходов в значительной степени определяет наши познания физики происходящих процессов, а следовательно и успех в освоении новых (мм и субмм) радиодиапазонов путем проектирования соответствующей аппаратуры.

Целью работы является:

1. Развитие метода сингулярных интегральных уравнений для задач дифракции волны на цилиндрических телах произвольного поперечного сечения в плоскостной среде.

2. Разработка эффективных численных алгоритмов, позволяющих определять дифрагированное поле с гарантированной точностью.

3. Исследование электродинамических свойств тонких цилиндрических неоднородностей и возникающих резонансных явлений при их наличии в плоскостной среде.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. В строгой постановке решена двумерная задача дифракции электромагнитных волн на системе экранов произвольного профиля в полупространстве и на его поверхности.

2. Решена задача рассеяния электромагнитного поля системой криволинейных тонких диэлектрических или слабо проводящих включений, расположенных в полупространстве.

3. Решена задача дифракции электромагнитной волны в полупространстве с цилиндром, ослабленным тонким дефектом, моделирующая растрескивание сварного шва или сложных металлических конструкций.

4. В корректной постановке решена задача дифракции электромагнитных волн на системе экранов произвольного профиля в трехслойной среде.

5. Разработан подход эффективного вычисления интегралов типа

Зоммерфельда, связанных с функциями Грина дифракционных задач для плоскостных сред, на основе интерполяционного полинома.

6. Для численного решения систем интегральных уравнений предложен итерационный подход, учитывающий последовательное переотражение волн на неоднородностях. Последний позволил решить задачу дифракции на экранах с размерами до  $30\lambda$  длин волн и существенно уменьшить машинное время.

#### Практическая ценность работы.

1. Создан комплекс программ определения рассеянного поля тонкими неоднородностями произвольного профиля в плоскостной и кусочно-однородной средах.

2. Создан пакет программ для массового определения интегралов типа Зоммерфельда на основе интерполяционных формул и с использованием метода контурного интегрирования.

3. Показана возможность оценки глубины погружения, формы и размера дефектов по фазовым зависимостям рассеянного поля.

4. Показано, что, исследуя амплитуду рассеянной волны, можно определить расстояние между неоднородностями в плоскостной среде.

5. Исследовано влияние кривизны резонансного экрана на прохождение собственной волны диэлектрического волновода. Показано, что выбором соответствующей кривизны экранов можно улучшить свойства резонансных фильтров.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы определяется тем, что рассмотренные задачи исследованы в корректной постановке. Все численные результаты подвергались проверке на сходимость путем изменения количества узлов в квадратурных формулах. Часть полученных результатов согласуется с работами других авторов.

Апробация работы и публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на: I-й Международной конференции по анализу изображений и распознаванию образов (Львов, 1990), Международном симпозиуме "Progress in Electromagnetics Research" (Массачусетс, 1991), XI и XII Всесоюзных научно-технических конференциях "Неразрушающие физические методы и средства контроля" (Москва, 1987; Свердловск, 1990), III Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование и САПР радиозлектронных систем СВЧ на ОИС" (Суздаль, 1989), Всесоюзной научно-технической конференции "Интегральные уравнения и краевые задачи

математической физике" (Владивосток, 1991г.), научных семинарах и конференциях ФМИ АН Украины.

Основные ее результаты опубликованы в статьях и тезисах докладов [1-18].

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и двух приложений. Она содержит 118 страниц текста, 45 страниц таблиц и рисунков, список литературы из 119 наименований на 14 страничках.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертационной работе представлено современное состояние вопроса, дан обзор литературы по исследуемой проблеме, обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, ее научная новизна и кратко изложено содержание диссертации. Приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена задача дифракции электромагнитных волн на экранах в полупространстве при обеих поляризациях возбуждающего поля (рис.1). Дифрагированная волна представляется сумой падающей и рассеянной. Рассеянное поле в свою очередь представляется в виде потенциалов простого слоя ( $\kappa$ - поляризация) или двойного слоя ( $\varepsilon$ - поляризация). В связи с наличием функции Грина представляемое автоматически удовлетворяет уравнению Гельмгольца и условиям: непрерывности на границах раздела сред с волновыми числами  $\chi_1, \chi_2$  и на бесконечности, требующим отсутствия приходящих из бесконечности волн, кроме падающей. Удовлетворяя условиям Дирихле ( $\varepsilon$ - поляризация) или Неймана ( $\kappa$ - поляризация) на контурах экранов, приходим к системе интегральных уравнений первого рода с логарифмической особенностью вида

$$2\pi \sum_{\alpha=1}^N \int_{L_\alpha} J_\alpha(\tau) \sigma_{2N}^2(\tau, l_\alpha^0) d\tau = E^*(l_\alpha^0).$$

$$l_\alpha \in L_\alpha, \quad l_\alpha^0 \in L_\alpha, \quad J_\alpha(\tau) = J_\alpha(l_\alpha) |l_\alpha^0(\tau)| \cdot \overline{1 - \tau} \quad (1)$$

( $\varepsilon$ -поляризация) или к системе сингулярных интегродифференциальных уравнений первого рода вида

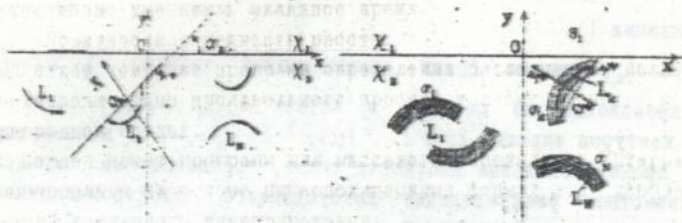


Рис.1

Рис.2

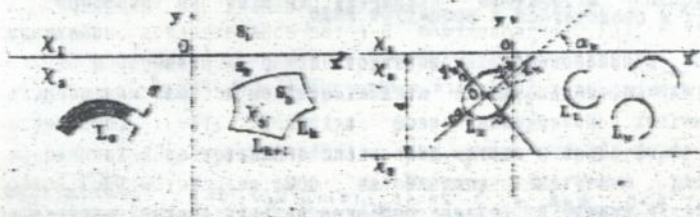


Рис.3

Рис.4

$$2\pi \frac{\partial}{\partial n_0} \sum_{k=1}^N \int_{-1}^1 \left[ \pi_k(\tau) \frac{\partial}{\partial n} G_{2N}^2(t_k, t_1^0) |t_k'| d\tau \right] = - \frac{\partial}{\partial n_0} H^*(t_1^0),$$

$$t_k \in L_k, t_1^0 \in L_1, t_k' = t_k'(\tau), \pi_k(\tau) = \overline{\pi_k(t_k)} \cdot l = 1, N \quad (2)$$

(H-поляризация).

Здесь  $G_{2N, H}^2$ -функция Грина дифракционной задачи,  $\frac{\partial}{\partial n}$  и  $\frac{\partial}{\partial n_0}$  - частные производные по нормали в точках  $t_k = t_k(\tau) = x_k(\tau) + iy_k(\tau)$  и  $t_1^0 = t_1^0(x_0)$  контуров экранов  $L_k$  и  $L_1$ ,  $J_k(t_k)$  и  $\pi_k(t_k)$  - неизвестные функции, пропорциональные плотности токов, наведенных на экранах,  $E^*, H^*$  - известное распределение возбуждающего электромагнитного поля при отсутствии отражателей.

Условие на ребрах экранов, требующему ограниченности вблизи них энергии поля, удовлетворим выбором функций  $J_k(\tau)$  и  $\pi_k(\tau)$  в виде

$$J_k(\tau) = \frac{J_k^*(\tau)}{\sqrt{1-\tau^2}}, \pi_k(\tau) = \pi_k^*(\tau) \sqrt{1-\tau^2}, \quad (3)$$

где  $J_k^*(\tau)$  и  $\pi_k^*(\tau)$  - принадлежит классу Гельдера.

Численные решения интегральных уравнений получены методом механических квадратур, учитывающим особенности поведения искомых плотностей поверхностных токов на концах отрезков интегрирования. Сходимость алгоритмов проверялась изменением количества узлов в квадратурных формулах. Выполнены расчеты как для одиночного экрана в полупространстве, так и для системы таких экранов. В последнем случае показана возможность применения метода последовательных приближений, учитывающего последовательные преобразования волн на экранах и сводящегося к процедуре вида

$$- \int_{-1}^1 J_{1k}(\tau) \ln |\tau - \tau_0| d\tau + \int_{-1}^1 J_{1k}(\tau) K(\tau, \tau_0) d\tau = - E^*(t_1^0) - \Delta_{v, u} = 0, R, \quad (4)$$

$$l = 1, N, \Delta_0 = 0, \Delta_v = \Delta_{v-1} + \sum_{k=1}^N 2\pi \int_{-1}^1 J_{k, v-1}(\tau) G_{2N}^2(t_k, t_1^0) d\tau; \quad v = 1, R; J_{k0} = 0,$$

$$j_{AV} - j_A \nu^{-1} (j_{AV} - j_{AV-1}) s_{it}, 0 < s_{it} \leq 1; j_A = j_{AR}; \text{при} \left( \frac{|j_{AR} - j_{AR-1}|}{|j_{AR}|} \right) < \delta, \quad \delta > 0,$$

$$t_A \in L_A, t_i^0 \in L_i; j_A(\tau) = j_A(t_A) |t'_A(\tau)|, \quad k=1, N$$

( $\lambda$ -поляризация) или

$$\int_{-1}^1 \frac{\pi'_i u(\tau)}{c - \tau_0} d\tau - \int_{-1}^1 \pi_{iu}(\tau) K_1(t_i, t_i^0) \ln |\tau - \tau_0| d\tau + \int_{-1}^1 \pi_{iu}(\tau) K_2(t_i, t_i^0) d\tau = - |t_i^0|' \frac{\partial}{\partial n_0} \#^*(t_i^0) - \Omega_u, u=0, R, l=1, N; \quad (5)$$

$$\Omega_0 = 0, \quad \Omega_v = \Omega_{v-1} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^N 2\pi |t_i^0|' \int_{-1}^1 \pi_{AV-1}(\tau) \frac{\partial^2}{\partial n_0 \partial n} f_{2N}^2(t_A, t_i^0) |t'_A| d\tau;$$

$$\pi_{AV} = 0, \pi_{AV} = \pi_{AV-1} + (\pi_{AV} - \pi_{AV-1}) s_{it}, 0 < s_{it} \leq 1; v=1, R; \pi_A = \pi_{AR};$$

$$\text{при} \left( \frac{|\pi_{AR} - \pi_{AR-1}|}{|\pi_{AR}|} \right) < \delta, \delta > 0; t_A \in L_A, t_i^0 \in L_i; t'_A = t'_A(\tau), \pi_A(\tau) = \pi_A(t); k=1, N$$

( $\mu$ -поляризация).

Здесь  $\lambda$  и  $\mu_{1,2}$  - регулярные непрерывные функции, коэффициент  $s_{it}$  выбираем из условия улучшения сходимости итерационного процесса.

В результате изучения структуры дифрагированного на тонких подповерхностных неоднородностях электромагнитного поля установлено; что, исследуя фазу поперечной тангенциальной составляющей на границе раздела сред, можно оценить форму экрана, его размеры и гл.зину погружения. Диаграмма рассеянного  $\lambda$ -поляризованного поля существенно зависит от велич.  $i$  отражающей поверхности и, как следствие этого, от ориентации экрана относительно границы раздела. При этом величина цели в экране

производит значительное влияние на рассеянное поле. Положение резонанса в частотной зависимости для экранов в полупространстве зависит от его расположения относительно границы раздела. Как при  $E$ -, так и при  $H$ -поляризованном облучении системы подповерхностных отражателей некоторые расстояния между экранами приводят к максимальному отражению электромагнитной волны. Показано, что предложенный алгоритм расчета дифрагированного поля позволяет решить задачу дифракции электромагнитной волны на экранах с раскрывом порядка десятков длин волн.

Вторая глава посвящена рассмотрению задач дифракции  $E$ -поляризованных электромагнитных волн на тонких включениях конечной проводимости (рис. 2). Решение задачи ищем в виде двумерного интеграла аналогично способу, предложенному в работе В.Д.Курпадзе для однородного пространства. Учитывая точность включения, задача сведена к контурному интегральному уравнению, определенному на средней линии поперечного сечения неоднородности. Для системы включений построена система контурных интегральных уравнений второго рода вида

$$E(t_i^0) - \sum_{k=1}^N 2h_k \chi_k^2 \chi_k^2 \int_{-1}^1 E(t_k) G_{2h_k}(t_k, t_i^0) |t_k - t_i^0| t_k \in L_k \quad (6)$$

$$t_i^0 \in h_{1k} l = 1, \dots, N.$$

Здесь  $\chi_k$  - волновое число материала неоднородности, контур  $L_k$  - средняя линия поперечного сечения  $k$ -го включения толщины  $2h_k$ . Система решается как строго, так и приближенно методом последовательных приближений. Для получения конечной системы линейных алгебраических уравнений показана возможность использования квадратурных формул типа Гаусса - Чебышева и Гаусса - Лежандра. Установлено, что, итерационный подход более эффективен с точки зрения затрат ресурсов ЭВМ. Проведен анализ рассеянного электромагнитного поля в зависимости от параметров задачи. В результате установлено, что изменяя частоту возбуждающей волны, можно увеличить информативность рассеянного поля. Над местами расположения дефектов на границе раздела наблюдаются максимумы амплитуды магнитной тангенциальной составляющей вторичного поля и минимумы фазы этой компоненты. При расстоянии между включениями, меньшем  $0,3\lambda$ , для проводящего полупространства существует довольно

сильная электромагнитная связь, а над местами их расположения отсутствуют минимумы в нормальной составляющей магнитного поля.

В третьей главе изучается дифракция электромагнитной волны на тонких включениях, расположенных вблизи цилиндра в полупространстве. Данная структура хорошо моделирует процессы, возникающие в дефектоскопии сварных швов сложных конструкций. Задача сведена к связанным системам контурных интегральных уравнений, определенных на средних линиях включений и на границе цилиндра. В частности, при дифракции  $z$ -поляризованной волны на цилиндре, ослабленном дефектом типа трещины (рис.3), система уравнений имеет вид

$$2\pi \sum_{k=1}^N \int_{-1}^1 J_A^{(3)}(\tau) \frac{1}{4} H_0^{(1)}(\chi_2 |t_A - t_1^0|) d\tau - 2\pi \sum_{k=0}^{N-1} \int_{-1}^1 J_A^{(2)}(\tau) G_{2k}^2(t_A, t_1^0) d\tau =$$

$$-E^{(2)*}(t_1^0) - E^{(3)*}(t_1^0), t_1^0 \in L_1, \quad l=1, N.$$

$$-\left\{ \pi J_A^{(3)}(\tau_0) + \pi J_A^{(2)}(\tau_0) \right\} + 2\pi \sum_{k=1}^N \int_{-1}^1 J_A^{(3)}(\tau) \frac{1}{4} \frac{\partial}{\partial n_1} H_0^{(1)}(\chi_2 |t_A - t_1^0|) d\tau =$$

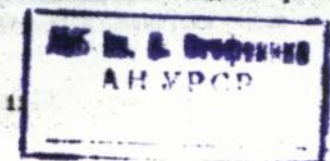
$$-2\pi \sum_{k=0}^{N-1} \int_{-1}^1 J_A^{(2)}(\tau) \frac{\partial}{\partial n_1} G_{2k}^2(t_A, t_1^0) d\tau - \frac{\partial}{\partial n_1} E^{(2)*}(t_1^0) - \frac{\partial}{\partial n_1} E^{(3)*}(t_1^0),$$

$$t_1^0 \in L_1, \quad l=1, N.$$

$$J_0^{(2)*}(t_0^0) / (\Delta(t_0^0))' - 2\pi \sum_{k=0}^{N-1} \int_{-1}^1 J_A^{(2)}(\tau) G_{2k}^2(t_A, t_0^0) d\tau - E^{(2)*}(t_0^0), t_0^0 \in L_0.$$

$$t_A \in L_A, \quad G_k(t, z) = G_{2k}^2(t, z), \quad \Delta = (h/\pi)(\kappa_0^2 - \chi_2^2), \quad (7)$$

Здесь  $H_1^{(0)}$  - функция Ханкеля первого рода,  $J_A^{(2),(3)}(\tau)$  - неизвестные функции,  $\kappa_0$  - волновое число материала включения толщиной  $2h$ , средняя линия которого является гладким разомкнутым



контурами  $L_0$ , гладкие контуры  $L_i$ ,  $i=1, \dots, N$  образуют профиль цилиндра. Численное решение приведенной системы уравнений получено непосредственно методом механических квадратур или с использованием процедуры последовательных приближений. В конце главы приводятся результаты численных экспериментов для проводящего полупространства, демонстрирующие эффективность и возможности построенных алгоритмов. При этом показано, что подповерхностные дефекты ( $-\pi < \alpha < 0$ ) удобно исследовать в частотном диапазоне, для которого глубина погружения  $l = 0,25\lambda + 0,5\lambda$  (увеличение частоты выше границы этого диапазона нежелательно в связи с наличием затухания в нижнем полупространстве).

Четвертая глава посвящена решению задач рассеяния электромагнитного поля криволинейным экраном в трехслойной среде (рис. 4). Аналогично случаю полупространства, задачи сведены к интегральным уравнениям вида (1). Здесь функция Грина задачи удовлетворяет уравнению Гельмгольца с кусочно- постоянным волновым числом, а также условиям сопряжения на границах раздела и условию на бесконечности, которое требует отсутствия приходящих из бесконечности волн, кроме возбуждающей, и учитывает весь спектр незатухающих собственных волн слоя. Проведен анализ структуры дифрагированного электромагнитного поля в зависимости от геометрических и физических параметров задачи. При этом установлено, что амплитуда электрической составляющей в случае E-поляризации существенно зависит от электромагнитных свойств нижнего полупространства и слоя. Минимум амплитуды и резкое изменение фазы нормальной магнитной компоненты рассеянного поля при этом указывает на место расположения одиночного экрана. Фаза рассеянного поля менее подвержена влиянию флуктуациям вмещающей среды и более адекватно определяет глубину погружения неоднородности. В случае k- поляризации увеличение волновых размеров цилиндра ведет к плавному уменьшению проходимости слоя для собственной волноводной моды. Для экранов малых волновых размеров увеличение ширины практически не влияет на коэффициент отражения, а ее ориентация относительно границ раздела слабо влияет на энергию рассеянного во внешнее пространство поля. Показано влияние формы и размеров экрана на резонансные свойства исследуемой структуры. При y-поляризованном облучении экрана собственной волной планарного волновода наблюдался резонанс в

диапазоне  $\chi_d = (0,35; 0,7)$ . При этом увеличение резонансного объема ведет к уменьшению частоты резонанса. Уменьшение угловых размеров щели в цилиндре ведет к уменьшению частоты резонанса и повышению его добротности.

В пятой главе рассматривается задача дифракции собственных волн слоя на системе экранов произвольной кривизны. Супераозицией интегральных представлений из первой и четвертой глав диссертации, получены системы интегральных уравнений первого рода с логарифмической особенностью ( $E$ -поляризация) или сингулярных интегродифференциальных уравнений первого рода ( $H$ -поляризация). Системы уравнений решаются как строгим подходом, так и методом последовательных приближений. Проведен анализ прохождения волн планарного диэлектрического волновода для различных параметров экранов. Как в случае  $E$ -, так и в случае  $H$ -поляризации на рассеяние собственной волны слоя существенно влияет расстояние между содержащимися в нем волноводными неоднородностями. При этом в случае  $E$ -поляризации увеличение размеров отражателей приводит лишь к монотонному увеличению рассеяния энергии вне слоя. При обеих поляризациях возбуждения некоторые расстояния между отражателями приводят к минимуму рассеянной энергии и максимуму прохождения волн. В случае  $H$ -поляризации наблюдается суперпозиция резонансов, связанных со свойствами одиночных цилиндров и с дифракционным взаимодействием отражателей.

В первом приложении предлагается алгоритм определения функций Грина и ее производных. Для их вычисления предложена интерполяционная формула, определенная на заранее вычисленной сетке узлов. Для нахождения встречающихся несобственных интегралов предложен контур интегрирования, позволяющий существенно уменьшить осцилляции подынтегральных функций.

Во втором приложении изложен метод механических квадратур для численного решения основных типов интегральных уравнений, встречающихся в диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Предложены универсальные алгоритмы решения задач дифракции электромагнитных волн на цилиндрических неоднородностях произвольного профиля в плоскостной среде на основе контурных

интегральных уравнений. Решение последних строится численным методом механических квадратур, учитывающим как имеющиеся сингулярности ядер, так и особенности поведения искомым функций на концах контуров интегрирования.

2. Разработан подход эффективного вычисления массива интегралов типа Зоммерфельда, связанного с функциями Грина дифракционных задач для плоскослойных сред. Его сущность заключается в построении интерполяционного полинома по двум переменным, использующего в качестве опорных значений предварительно вычисленные аналогичные интегралы. Для численного определения последних предложен контур интегрирования, на котором подынтегральные функции минимально осциллируют и максимально затухают.

3. Для численного решения систем интегральных уравнений предложен итерационный подход, учитывающий последовательное переотражение волн на неоднородностях. Последний позволил существенно уменьшить машинное время, а в некоторых случаях получить решения впервые.

4. Показано, что построенные алгоритмы могут быть использованы при определении профиля, ориентации и глубины погружения отражателей в плоскослойной среде. Исследуя рассеянное поле, можно определять расстояние между неоднородностями. Путем подбора геометрии и количества экранов можно моделировать в планарном волноводе фильтры с заданными свойствами.

5. Для оценки информативных параметров отраженного сигнала в ряде случаев проведен анализ дифрагированного поля как в ближней, так и в дальней зонах в зависимости от физических и геометрических свойств структуры.

Публикации автора, отражающие содержание работы:

1. Овсянников О.И. Рассеяние  $z$ - поляризованных электромагнитных волн тонкими включениями в проводящем цилиндре // Материалы XI конф. мол. ученых Физико-механического ин-та им. Г.В. Карпенко АН УССР. - Физ.-мех. ин-т АН УССР г. Львов. - 1985. - С. 35-37. - Деп. ВИНТИ 18.04.86. №2833-86.
2. Овсянников О.И. Об определении электромагнитного поля, рассеянного тонким включением в проводящем полупространстве //

- Материалы 2-й конф. мол. ученых и специалистов "Проблемы повышения качества материалов и оборудования". Физ.-мех. ин-т АН УССР г. Львов.- 1986.- С.75-77.- Деп.ВИНИТИ 27.04.87. №3007-В87.
3. Назарчук З.Т., Овсянников О.И. Метод сингулярных интегральных уравнений в задачах радиоволнового контроля проводящего полупространства с тонкими дефектами произвольного профиля// Е. кн. XI Всес. научно-технич. конференция "Неразрушающие физические методы и средства контроля" М., 1-3 октября 1987г ч.3.- С.56.
  4. Назарчук З.Т., Овсянников О.И. Об определении электромагнитного поля, рассеянного экраном в проводящем полупространстве (E- случай)// Отбор и обработка информации.- 1989.- Вып.3.- С.39-43.
  5. Назарчук З.Т., Овсянников О.И. Об определении электромагнитного поля, рассеянного экраном в проводящем полупространстве (H- случай)// Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли.- 1989.- №.- С.89-92.
  6. Назарчук З.Т., Тетерко А.Я., Овсянников О.И. Рассеяние электромагнитного поля тонким включением в проводящем полупространстве// Отбор и обработка информации.- 1989.- Вып.4.- С.26-30.
  7. Назарчук З.Т., Овсянников О.И. Электродинамический анализ системы экранов в плоскопараллельном слое на основе сингулярных интегральных уравнений //Тез. докладов III Всес. научн.-техн. конференции "Математическое моделирование и САПР радиозлектронных систем СВЧ на ОИС".-Судзаль, 3-7 апреля, 1989г.-С.58.
  8. Овсянников О.И. Дифракция H-поляризованной электромагнитной волны на криволинейном экране в проводящем полупространстве// Отбор и обработка информации.- 1990.- Вып.5.- С.34-38.
  9. Назарчук З.Т., Овсянников О.И. Про визначення електромагнітного поля, розсіяного тріщиною у кусково однорідному середовищі //ФХММ.-1990.- №.-С.94-100.
  10. Овсянников О.И. Об определении функции Грина плоскослоистой среды в задачах дифракции// Современные проблемы физического материаловедения.-Сб. научных трудов.- Киев.- 1990.- Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича.-С.151-158.
  11. Овсянников О.И. Определение электромагнитного поля,

рассеянного системой

сб. Теоретическая электр...

12. Ovsyannikov O.I. On Calculation of Green's function in Diffraction Two-Dimensional Problems// Proc. First International Conf. on Information Technologies for Image Analysis and Pattern Recognition.- Lviv, USSR, Oct.22-28, 1990. V.2.- P.336-34.
13. Назарчук З.Т., Овсянников О.И. Определение электромагнитного поля, рассеянного тонкими дефектами в плоскостной среде //Тез. докл. XII Всес. научн.-техн. конференции "Не разрушающие физические методы контроля".-Свердловск, 11-13 сентября, 1990г.- т.3- С.27-28.
14. Назарчук З.Т., Хмиль З.М., Овсянников О.И. Сингулярные интегральные уравнения в электродинамическом анализе цилиндрических металлодиэлектрических структур// Тез. докл. Всес. научн.-техн. конференции "Интегральные уравнения и краевые задачи мат. физики". -Владивосток, 22-26 октября, 1990г.- С.75.
15. Назарчук З.Т., Овсянников О.И. Рассеяние Н-поляризованной волны системой экранов в проводящем полупространстве//Отбор и обработка информации.- 1991.- Вып.7.- С.55-60.
16. Назарчук З.Т., Овсянников О.И. Зондування електромагнітної хвилі у провідного півпростору з тонкими включеннями// ФХММ.- 1991.- №3.- С.100-105.
17. Nazarchuk Z.T., Ovsyannikov O.I. Waves Scattering by Screens in Planar Waveguides //Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium.- Cambridge, Massachusetts, USA, July 1-5, -1991.-P.520.
18. Назарчук З.Т., Овсянников О.И. Дифракція електромагнітних хвиль на системі екранів у плоскопаралельному шарі//Доп. АН України, 1992, А, №3, С.76-80.

Подписано к печ. 26.01.93г. Формат 60x04/16 Печать офсет. Бумага офсет. Усл.п.л. 0,93 Усл. кр-отт 0,93 Уч.-изд.л. 0,8 Тираж 120 экз. Зак. 2077.

Областная книжная типография, 200000, Львов, ул. Стефаника, 11