

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ИЩЕНКО Наталья Михайловна

Ищенко

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ОПЕРАТОРА В АНИЗОТРОПНОЙ
СРЕДЕ

01.04.03 - радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1992



00814375 (S)

Работа выполнена в Харьковском государственном университете

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
профессор Хижняк Николай Антонович

Специальные оппоненты - член-корреспондент АН Украины,
доктор физико-математических наук,
профессор Литвиненко Леонид Николаевич

доктор физико-математических наук,
Масалов Сергей Александрович

Выдающая организация - Харьковский институт радиоэлектроники

Защита состоится "14" декабря 1992 г.

в 14 часов на заседании специализированного ученого совета
Д053.06.04 Харьковского государственного университета: 310077,
г. Харьков - 77, площадь Свободы, 4, ауд. 3-9.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной
библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан "6" ноября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физико-математических наук,
доцент

 В.И. Чеботарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Теория линейных антенн в силу своего большого практического значения вызывает неизменный интерес у специалистов. В последнее время особое внимание уделяется изучению характеристик антенн, расположенных в анизотропном пространстве, и в частности, одноосном, что обусловлено постановкой задач, связанных с нагревом замагниченной плазмы высокочастотными электромагнитными полями, а также возмущением волн в монокристаллах. Практически во всех работах, опубликованных по этой тематике, рассматриваются соответствующие антенные задачи для элементарных излучателей (длинноволновое приближение). В этом случае допустимым является априорное задание тока по длине антенны в виде линейного или равноамплитудного закона. При переходе к длинным или соизмеримым с длиной волны антеннам предварительное задание функции распределения тока некорректно. Определение истинного вида этой функции является основной и в то же время наиболее трудной задачей теории антенн. Работы, посвященные исследованию тока в длинных антеннах стали появляться лишь в последнее время. Для таких антенн методом возмущения получены выражения для тока в ненастроенном симметричном вибраторе и определено значение входного тока в настроенном вибраторе в частных случаях пространственной ориентации (параллельно и перпендикулярно оси анизотропии). Предложен также еще один способ получения и решения интегрального уравнения тонкой антенны, основанный на представлении функции Грина уравнений Максвелла в виде разложения по присоединенным функциям Лежандра, допускающий определение значения тока в антенне лишь численными методами.

АНБ им. Б. Стефанова
АН УРСР

Таким образом, получение аналитических выражений для тока в тонкой антенне, справедливых вне зависимости от способа возбуждения для антенны любой длины, в том числе резонансной, произвольно ориентированной относительно оси анизотропии, работающей во всем частотном диапазоне, включая области с отрицательными значениями одной из компонент тензора диэлектрической проницаемости, является важным и необходимым, что и делает тему диссертации актуальной.

Целью диссертационной работы является построение общего аналитического решения задачи о возбуждении тока в тонкой линейной антенне, произвольно ориентированной в одноосной анизотропной среде, в самосогласованной постановке, а также исследование на его основе конкретных способов возбуждения, влияния анизотропии на ее характеристики и определение условий эффективной работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые уравнения поля для одноосной анизотропной среды представлены в форме интегральных уравнений, построенных на базе точного выражения функции Грина;
- впервые получены интегральные уравнения для тока в тонкой антенне, произвольно ориентированной относительно оси анизотропии среды, обобщающие уравнения Поклингтона и Леонтовича-Левина, известные в теории линейных антенн, на случай одноосной анизотропии;
- получено асимптотическое выражение для тока в тонкой линейной антенне, справедливое для антенны любой длины, в том числе и резонансной, работающей во всем диапазоне частот, где среда остается одноосной, включая области с отрицательным зна-

чением компоненты тензора диэлектрической проницаемости, не накладывающие никаких ограничений на способ возбуждения;

- теоретически определены условия эффективного возбуждения импедансной антенны в анизотропной, включая закритическую, магнитоактивной плазме.

Практическая ценность результатов работы определяется тем, что полученные аналитические выражения дают возможность рассчитать характеристики вибраторной антенны (ток, комплексный входной импеданс, резонансную длину), расположенной в анизотропной среде (одноосные кристаллы, сильно замагниченная лабораторная плазма). Установленная зависимость резонансной длины антенны и амплитуды тока от ориентации антенны в среде и диэлектрических свойств самой среды позволяет использовать полученные результаты для целей диагностики плазмы, а также для изучения линейных дефектов в монокристаллах. Найденные условия эффективного возбуждения импедансной антенны в закритической магнитоактивной плазме могут быть полезными при выборе геометрических (длина, радиус, форма, ориентация во внешнем магнитном поле) и электрических (частота) параметров антенн, используемых при высокочастотном нагреве плазмы.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты.

1. Определение функции Грина уравнения Максвелла для неограниченного одноосного анизотропного пространства.
2. Получение интегральных уравнений рассеяния электромагнитных волн произвольными телами, расположенными в анизотропном пространстве.

3. Вывод интегрального уравнения для тока в тонкой линейной антенне, произвольно ориентированной относительно оси анизотропии.

4. Получение общих аналитических выражений для тока в тонких линейных антеннах.

5. Определение условий эффективного возбуждения импедансной антенны в анизотропной среде.

6. Исследование влияния анизотропии, поверхностного импеданса и положения антенны в пространстве на ее ток и комплексный входной импеданс.

Диробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

- Всесоюзном научно-техническом семинаре "Функциональные электродинамические системы и элементы" (Саратов, 1988 г.);
- Всесоюзной научно-технической конференции "Физика космической плазмы" (Аштарак АрССР, 1989 г.);
- Всесоюзной научно-технической конференции "Взаимодействие электромагнитного излучения с плазмой" (Ташкент, 1989 г.);
- Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование и САПР радиоэлектронных и вычислительных систем СВЧ и КВЧ на объемных интегральных схемах (ОИС)" (Волгоград, 1991 г.);
- семинаре ВНТО РЭС им. А.С. Попова "Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств" (Харьков, 1991 г.)

Публикации. Результаты диссертации изложены в 7 научных статьях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав с 17 рисунками, заключения, приложения и списка цитируемой литературы, включающего 44 наименования. Общий объем работы - 105 страниц, объем основного текста - 84 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика рассматриваемых проблем, определена цель работы, кратко изложено содержание диссертации по главам, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе сформулирована общая задача о рассеянии волн произвольными телами конечных размеров, расположенных в одноосной анизотропной среде. Прежде всего рассмотрено излучение точечного источника и найдено точное выражение для функции Грина. В функции Грина, представляющей решение уравнений Максвелла в виде запаздывающих потенциалов, выделено две группы слагаемых, первая из которых описывает необыкновенную волну, распространяющуюся во всех направлениях, а вторая - суперпозицию обыкновенной и необыкновенной волн, распространяющихся в плоскости, нормальной оси анизотропии. По известному выражению функции Грина построены общие интегральные уравнения рассеяния электромагнитных волн, с помощью которых поле внутри и вне рассеивающего тела может быть выражено через поле падающей волны. Таким образом, фактически решение краевой задачи электродинамики сводится к двум этапам. На первом этапе определяется внутреннее поле или плотность тока, наведенного в теле, по заданному падающему полю. Затем строится рассеянное и дифрагированное поля. В заключение главы полученные интегральные урав-

нения распространены на систему рассеивающих тел.

Во второй главе на базе интегральных уравнений рассеяния получено уравнение для плотности тока в тонкой идеальной антенне, произвольно ориентированной относительно оси анизотропии, обобщающее известное уравнение Поклингтона на анизотропную среду. Выделением главной части интеграла данное уравнение сведено к уравнению с малым параметром, которое можно рассматривать в качестве аналога уравнения Леонтовича и Левина для одноосной анизотропной среды. Показано, что полученные уравнения справедливы как для сред, описываемых положительными значениями диэлектрической проницаемости, так и для сред, диэлектрические свойства которых характеризуются тензором с отрицательной или нулевой компонентой. Влияние анизотропии заключено в коэффициентах и двух слагаемых, соответствующих структуре функции Грина, описывающих собственное поле антенны. Используя метод Лагранжа уравнение тонкой антенны сведено к системе интегро-дифференциальных уравнений в стандартной форме, не разрешенных относительно производных. Решение системы построено с помощью методов частичного усреднения. В итоге получено выражение для тока в идеальной антенне при произвольном возбуждении, справедливое для резонансных и нерезонансных антенн. На примере симметричного вибратора исследовано влияние анизотропии на ток и входной импеданс антенны. Определены условия резонанса. Для закритической магнитоплазмы выделены пространственные области, в которых возбуждение идеальной антенны эффективно, и исследованы характеристики антенны в этих областях. Полученные выражения сопоставлены с уже известными.

В третьей главе получено интегральное уравнение для тока в тонкой импедансной антенне и приведено к виду уравнения с малым параметром. Данное уравнение также сведено к системе ин-

тетро-дифференциальных уравнений в стандартной форме, решенных методами частичного усреднения. В итоге построено наиболее общее аналитическое выражение для тока в импедансной антенне, произвольно ориентированной в одноосной среде, при любом способе возбуждения. Показано, что в этом выражении влияние поверхностного импеданса антенны на ток происходит через изменение комплексного волнового числа, связывающего активную и реактивную части поверхностного импеданса антенны с ее расположением в среде и диэлектрическими характеристиками самой среды. Для симметричного вибратора, возбуждаемого полем плоской электромагнитной волны и δ -образным генератором, по полученным формулам исследовано влияние поверхностного импеданса на распределение тока в вибраторе и его входной импеданс. Отдельно рассмотрены и определены требования, обеспечивающие согласованную работу импедансной антенны в закритической магнитоактивной плазме.

В заключении сформулированы основные положения и выводы по работе.

В приложении приведено подробное вычисление интегралов, используемых при определении функции Грина.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований решена в самосогласованной постановке задача о возбуждении тока в тонкой линейной антенне, произвольно ориентированной в одноосной анизотропной среде. Математическая модель электромагнитного процесса построена на базе интегральных уравнений макроскопической электродинамики, обобщенных в данной работе на одноосные анизотропные среды, с использованием асимптотических методов усреднения. Полученные аналитические выражения для тока не

накладывают никаких ограничений на длину, ориентацию и способ возбуждения антенны и справедливы во всем частотном диапазоне, где среда остается одноосной, включая области, в которых одна из компонент тензора диэлектрической проницаемости отрицательна (закритическая магнитоплазма).

Из интегральных уравнений дифракции электромагнитных волн на произвольных материальных объектах в одноосной среде, полученных на основе точного выражения функции Грина, выведены интегральные уравнения относительно функции распределения тока, возбуждаемого сторонним полем, в тонкой линейной антенне. Введение понятия эффективной диэлектрической проницаемости^{эф}, связывающей компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды с углом между осью анизотропии и осью антенны, позволило включить в это уравнение антенны произвольной ориентации. Для описания собственного поля в соответствии со структурой функции Грина получено два вида слагаемых, одно из которых аналогично функции собственного поля антенны в изотропной среде и переходит в него при $\epsilon_1 = \epsilon_3$, а второе - обусловлено исключительно анизотропией среды. Влияние этого второго слагаемого на амплитуду тока тем существеннее, чем больше степень анизотропии (отношение ϵ_1/ϵ_3) и чем дальше отклонена антенна от оси анизотропии. С исчезновением анизотропии упомянутое слагаемое обращается в нуль. То же происходит и в случае антенны, ориентированной вдоль оси анизотропии. Кроме того, можно сказать, что ток в антенне длиной $2L$, радиусом ρ , расположенной параллельно оси анизотропии в одноосной среде, такой же, как в антенне той же длины, имеющей радиус $\sqrt{\epsilon_3/\epsilon_1} \rho$, расположенной в изотропной среде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = \epsilon_1$.

В самом общем случае пространственная периодичность функции распределения тока определяется действительной частью величины $K_0 \sqrt{\epsilon_{ef}} L$ и зависит в основном от свойств среды в перпендикулярном к антенне направлении. Для одноосных кристаллов и докритической магнитоплазмы эффективная диэлектрическая проницаемость всегда равна действительному положительному числу, а в выражения для тока входят лишь тригонометрические функции. Входной ток симметричного вибратора имеет резонансный характер. Ширина резонанса зависит от диэлектрических проницаемостей ϵ_1 , ϵ_3 и направления антенны в среде, амплитуда определяется балансом потерь на излучение и потерь, связанных с анизотропией среды. Переориентация антенны определенной физической длины приводит к изменению ее электрической длины и соответствующему изменению функции распределения тока. Такая связь тока с диэлектрической проницаемостью, являющейся функцией частоты, и ориентацией позволяет сделать вывод о возможности управления антенной двумя способами: механическим (изменяя положение антенны в пространстве) и электрическим (изменяя рабочую частоту).

При переходе в область частот, где одна из компонент тензора $\hat{\epsilon}$ отрицательна (закритическая магнитоплазма), эффективная диэлектрическая проницаемость в общем случае комплексна, даже если потери в среде не учитываются. Тогда в зависимости от положения антенны в пространстве можно выделить области, в которых возбуждение идеально проводящей антенны эффективно, и области, в которых такое возбуждение невозможно. Критерием этого служит величина эффективной диэлектрической проницаемости, которая в резонансной области равна действительному положительному числу. Все характеристики антенны, расположенной в резонансной области соответствуют описанным выше. После перехода в не-

резонансную область свойства антенны принципиально меняются. В выражение для тока наряду с тригонометрическими входят гиперболические функции. В распределении тока по длине антенны теряется периодичность, входной ток не обладает резонансами, амплитуда тока существенно ниже (для коротких антенн - примерно на порядок, для более длинных - на несколько порядков по сравнению с резонансной областью), что делает практически невозможной согласованную работу антенны в среде.

С целью выяснения условий эффективной передачи электромагнитной энергии от антенны к среде, особенно в случае заграничной магнитоплазмы, что актуально в задачах высокочастотного нагрева плазмы, были исследованы импедансные антенны. Получены формулы, описывающие ток в произвольной импедансной антенне, в которые свойства самой антенны входят через комплексное волновое число \tilde{K} , связывающее эффективную диэлектрическую проницаемость с комплексным поверхностным импедансом антенны. Показано, что в средах с $\epsilon_1, \epsilon_3 > 0$, активная часть поверхностного импеданса всегда приводит к затуханию тока, а реактивная часть вызывает изменение резонансной длины антенны, соответствующее характеру реактивности (индуктивной или емкостной). Таким образом, наличие поверхностной реактивности обуславливает такие изменения тока в импедансной антенне, какие в идеальной антенне вызываются изменением эффективной диэлектрической проницаемости. Если активная часть поверхностного импеданса такая, что $|\tilde{K}''| \gg |\tilde{K}'|$, ток в антенне практически отсутствует из-за значительных джоулевых потерь.

В средах, где $\epsilon_1/\epsilon_3 < 0$ наиболее существенным при возбуждении тока в нерезонансных областях является соотношение между активной и реактивной частями поверхностного импеданса. При произвольном выборе поверхностного импеданса волновое чис-

до комплексное, а возбуждение значительных токов в антенне невозможно. Ситуация меняется, если соотношение между обеими частями поверхностного импеданса выбрано так, что $\text{Im } \tilde{K} = 0$. Тогда распределение тока в импедансной антенне выражается так же, как и в идеальной при $\epsilon_1, \epsilon_3 \rightarrow 0$, через тригонометрические функции. Различие состоит в общем виде функции потерь, которые в случае импедансной антенны содержат множители, экспоненциально зависящие от длины антенны. Из этого следует, что предпочтение должно быть отдано коротким антеннам перед длинными. Длина антенны определяется из дисперсионного уравнения, устанавливающего связь между параметрами антенны и параметрами среды при резонансе.

В самом общем случае эффективная работа антенны в заграничной магнитоплазме обеспечивается выполнением двух условий.

Во-первых, поверхностный импеданс и ориентация антенны должны быть подобраны так, чтобы выполнялись соотношения

$$|\text{Re } \tilde{K}| \gg |\text{Im } \tilde{K}| \quad \text{Im } \tilde{K} \rightarrow 0.$$

Во-вторых, антенна должна быть резонансной, т.е. иметь длину, удовлетворяющую одному из первых корней дисперсионного уравнения. Следует учитывать также сильную зависимость тока от всех параметров антенны и диэлектрической проницаемости среды, что накладывает дополнительные требования к их стабильности при обеспечении согласованной работы антенны в среде.

Материалы диссертации изложены в следующих работах.

1. Хижняк Н.А., Яценко Н.М. Характеристики электрического вибратора в анизотропной плазме. // РЭ.-1990.-35, № 12.- С.2541-2547.

2. Хижняк Н.А., Яценко Н.М. Возбуждение линейной антенны, произвольно ориентированной в заграничной плазме. // Изв. вузов. Радиоэлектроника.-1991.-34, № 2.-с.75-78.

3. Хижняк Н.А., Яценко Н.М. Возбуждение линейной антенны, произвольно ориентированной в анизотропной среде.//Изв. вузов. Радиоэлектроника.-1990.-33, № 5.-С.12-15.

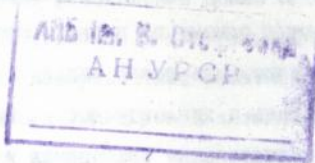
4. Хижняк Н.А., Яценко Н.М., Яценко Е.А. О возбуждении линейной антенны в анизотропной среде.//УФЖ.-1989.-34, № 5.- С.687-692.

5. Хижняк Н.А., Яценко Н.М. Об условиях эффективного излучения энергии в плазму.//УФЖ.-1990.-35, № 12.-С.1822-1826.

6. Хижняк Н.А., Яценко Е.А., Яценко Н.М. Функция Грина уравнений Максвелла для неоднородных анизотропных сред.//Вестн. Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника.-1989.- № 336.- С.19-23.

7. Хижняк Н.А., Яценко Н.М., Яценко Е.А. Характеристики вибраторной антенны в анизотропной среде.//Теория, элементы и узлы антенно-волноводных трактов. Сб. трудов НИО "Тест-Радио". Харьков, 1991.-вып.2.-С.31-48.

Хижняк



Подп. к печ. 19.10.92; Формат 60×84^{1/16}. Бумага тип. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2.
Уч.-изд. л. 1. Тираж 2 экз. Зак. № 2677. Бесплатно.

Харьковское межвузовское арендное полиграфическое предприятие.
310093, Харьков, ул. Свердлова, 115.

469011

Ab 26.342

AB 26.342