

На правах рукописи



Зайцева Анна Сергеевна

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АНТЕНН ПРИ  
НАЛИЧИИ ЗАМАГНИЧЕННЫХ  
ПЛАЗМЕННЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ  
СИСТЕМ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Кудрин Александр Владимирович,  
ФГБОУ ВПО «Нижегородский  
государственный университет им. Н. И.  
Лобачевского»

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Смирнов Александр Ильич,  
ФГБУН ИПФ РАН

кандидат физико-математических наук,  
доцент Петров Евгений Юрьевич,  
ФГБОУ ВПО «Нижегородский  
государственный университет им. Н. И.  
Лобачевского»

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Московский физико-  
технический институт (государственный  
университет)»

Защита состоится «25» декабря 2013 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского по адресу:  
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского.

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.ф.-м.н., доцент



Черепенников Владимир Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность темы исследования

Анализ электродинамических характеристик металлических антенн, работающих при наличии замагниченных плазменных направляющих структур, представляет существенный теоретический интерес, а также имеет важное прикладное значение для интерпретации результатов многочисленных экспериментов с использованием антенн в плазменных средах, находящихся во внешнем магнитном поле. Очевидно, что размещение антенн вблизи плазменных неоднородностей заметно изменяет электродинамические характеристики излучателей (распределение тока, входной импеданс, энергетические характеристики излучения) по сравнению со случаем работы в свободном пространстве или однородной плазме. В частности, наличие таких «околоантенных» образований может существенно влиять на структуру поля электромагнитного источника как в его ближней, так и дальней (волновой) зоне. Размещение антенны на границе раздела двух различных сред — магнитоактивной плазмы и изотропной среды (в частности, свободного пространства) — представляет наибольший интерес при исследовании указанных вопросов, поскольку при этом на работе антенны может одновременно сказываться влияние обеих сред. Очевидно, что в данном случае определение электродинамических характеристик излучателя возможно лишь в результате строгого решения самосогласованной задачи теории антенн.

Следует отметить, что задача о распределении тока металлических антенн достаточно подробно рассмотрена в научной литературе применительно к излучателям, расположенным в однородной магнитоактивной плазме. В то же время электродинамические характеристики антенн, работающих в присутствии открытых волноводов с гиротропным плазменным заполнением, остаются малоизученными. Указанное обстоятельство обусловлено тем, что анализ работы антенн при наличии таких систем сопровождается рядом принципиальных трудностей, связанных как с характеристиками магнитоактивной плазмы (особенно в резонансных условиях, допускающих существование квазиэлектростатических волн), так и с направляющими свойствами плазменных неоднородностей. Это приводит к тому, что классическая теория тонких металлических антенн становится в данном случае непригодной, и для решения задач такого типа необходимо использовать более сложные подходы, требующие учета волн дискретной и непрерывной частей пространственного спектра рассматриваемой системы.

Отмеченные обстоятельства делают исследование влияния открытых замагниченных плазменных направляющих систем на характеристики антенн, расположенных на границе таких структур, весьма актуальной задачей.

## **Цели диссертационной работы**

Основной целью диссертации является исследование электродинамических характеристик рамочной и дипольной металлических антенн, расположенных, соответственно, на поверхности замагниченного плазменного столба и плоской границе раздела магнитоактивной плазмы и изотропной среды. В соответствии с этой целью в настоящей работе решались следующие конкретные задачи:

1. Отыскание распределения тока и входного импеданса круговой рамочной антенны, расположенной на поверхности продольно замагниченного плазменного столба в фоновой изотропной среде.

2. Исследование энергетических характеристик излучения данной антенны на основе найденных распределений тока, включая анализ эффективности возбуждения ею волн, принадлежащих различным частям пространственного спектра.

3. Отыскание распределения тока и входного импеданса ленточной антенны, расположенной на плоской границе раздела магнитоактивной плазмы и изотропной среды.

## **Научная новизна результатов работы**

В научном плане выполненные исследования позволяют находить в рамках строгого электродинамического подхода распределение тока антенн, работающих на границе открытых замагниченных плазменных направляющих структур, что расширяет возможности адекватного анализа работы таких антенн и решения актуальных прикладных задач электродинамики. Полученные результаты дают основу для более глубокого понимания особенностей работы антенных устройств в указанных условиях. В частности, развитый в диссертации подход к решению ключевых модельных задач теории антенн, работающих при наличии замагниченных плазменных структур, представляет собой обобщение результатов теории тонких металлических антенн, расположенных в однородных анизотропных и гиротропных средах, на случай наличия открытой направляющей структуры с магнитоактивным плазменным заполнением.

Результаты диссертации могут представлять интерес для следующих научно-исследовательских учреждений: ИПФ РАН, ИКИ РАН, ИРЭ РАН, МФТИ, МГУ, НИРФИ, ФГУП НПП «Полет».

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Распределение тока и входной импеданс рамочной антенны, расположенной на поверхности продольно замагниченного плазменного столба в фоновой изотропной среде и представляющей собой бесконечно тонкую, идеально проводящую узкую ленту, свернутую в кольцо, определяются вкладами собственных мод и волн непрерывного

пространственного спектра, возбуждаемых в такой системе, и являются сложными интегральными характеристиками параметров антенны, плазменного столба и окружающей его среды. Поведение данных характеристик имеет принципиальные различия в случаях, когда плазма внутри столба является резонансной или нерезонансной. При этом наличие такого плазменного столба может приводить к значительному изменению распределения тока и импеданса антенны по сравнению со случаями ее размещения в фоновой изотропной среде или однородной магнитоактивной плазме, параметры которой совпадают с параметрами плазмы внутри столба.

2. В резонансной области частот магнитоактивной плазмы распределение тока рамочной антенны, расположенной на поверхности продольно замагниченного плазменного столба, при выполнении упрощающих условий, фактически отвечающих переходу к квазиэлектростатическому приближению, определяется комплексной постоянной распространения  $h = k_0(\varepsilon_a - i|\varepsilon\eta|^{1/2})^{1/2}/\sqrt{2}$ , где  $\varepsilon$  и  $\eta$  — диагональные компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости плазмы внутри столба,  $\varepsilon_a$  — относительная диэлектрическая проницаемость фоновой среды,  $k_0$  — волновое число в свободном пространстве. В таком приближении импеданс антенны формально совпадает с входным импедансом закороченной двухпроводной линии. Условия приближенного суммирования ряда для тока, позволяющие получить из строгой теории соответствующие формулы, являются условиями применимости обобщенного метода длинных линий для описания распределения тока и импеданса данной антенны.

3. В резонансной области частот магнитоактивной плазмы мощность излучения рамочной антенны, расположенной на поверхности продольно замагниченного плазменного столба, при условии  $|\varepsilon\eta|^{1/2} \gg \varepsilon_a$  практически полностью определяется вкладом собственных мод столба, включающих бесконечное число распространяющихся квазиэлектростатических мод, хотя относительный вклад последних в парциальную мощность, идущую в собственные моды, не обязательно является преобладающим. В нерезонансной области частот распределение мощности излучения такой антенны по пространственному спектру возбуждаемых волн определяется интегральными свойствами рассматриваемой направляющей системы в целом.

4. Распределение тока вдоль линейной ленточной антенны, представляющей собой бесконечно тонкую, идеально проводящую узкую ленту, расположенную на плоской границе раздела изотропной среды и резонансной магнитоактивной плазмы перпендикулярно внешнему магнитному полю, при выполнении соотношения  $|\varepsilon\eta|^{1/2} \gg \varepsilon_a$  и условий, определяющих границы применимости обобщенного метода длинных линий, совпадает с распределением тока эквивалентной длинной линии, имеющей

волновой импеданс  $Z = Z_0 k_0 (\pi h)^{-1} \ln(4/k_0 d)$  и комплексную постоянную распространения  $h = k_0 |\varepsilon \eta|^{1/4} (1 - i)/2$ , где  $Z_0$  — волновой импеданс свободного пространства,  $d$  — полуширина антенного провода.

### **Апробация работы и публикации**

Материалы диссертации докладывались на 14-й Научной конференции ННГУ по радиофизике (Нижний Новгород, 2010 г.), 16-й Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2011 г.), Международной конференции «Days on Diffraction'2011» (Санкт-Петербург, 2011 г.), 6-й Европейской конференции по антеннам и распространению волн (Прага, Чешская Республика, 2012 г.), 14-й Международной конференции по математическим методам в электромагнитной теории (Харьков, Украина, 2012 г.), 32-м и 34-м Международных симпозиумах «Progress in Electromagnetics Research» (Москва, 2012 г.; Стокгольм, Швеция, 2013 г.), Международном симпозиуме по электромагнитной теории (Хиросима, Япония, 2013 г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, в том числе 4 статьях в международных и российских научных журналах из списка ВАК [1–4], 8 работах в трудах международных и российских конференций [5–12], 3 тезисах докладов научных конференций [13–15].

### **Личный вклад автора**

Диссертант принимала непосредственное участие в постановке задач, построении теоретических моделей, проведении аналитических и численных расчетов, а также обсуждении и интерпретации результатов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и изложена на 124 страницах, включая 27 рисунков и 2 таблицы. Список цитированной литературы содержит 102 наименования и занимает 9 страниц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **Введении** освещено современное состояние исследований по теме диссертации и обоснована ее актуальность, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна полученных результатов, кратко изложено содержание диссертации.

**Первая глава** посвящена выводу интегральных уравнений для угловых гармоник тока рамочной антенны, расположенной на поверхности продольно замагниченного плазменного столба в фоновой изотропной среде (см. рис. 1). Предполагается, что антенна представляет собой бесконечно тонкую, идеально проводящую узкую ленту, свернутую в кольцо и возбуждаемую стороной ЭДС.

В разделе 1.1 дана постановка самосогласованной задачи о распределении тока в кольцевой антенне, представлены основные соотношения, описывающие магнитоактивную плазму внутри столба и окружающую его изотропную среду. Плотность поверхностного тока  $\varphi_0 I(\varphi, z)$ , возбуждаемого на антенне сторонней ЭДС, представлена в виде ряда Фурье по азимутальной координате  $\varphi$ , коэффициенты  $\mathcal{I}_m(z)$  которого являются неизвестными функциями. Здесь же записаны граничные условия для тангенциальных компонент электрического поля на поверхности антенны.

В следующем разделе 1.2 получены выражения для компонент электромагнитного поля, отвечающего току антенны  $I(\varphi, z)$ , внутри и вне плазменного столба. При этом поле антенны представлено в виде разложения в интеграл Фурье по продольному волновому числу. Записано дисперсионное уравнение, позволяющее определить постоянные распространения собственных (локализованных) мод, направляемых плазменным столбом.

В разделе 1.3 возбуждаемое антенной электромагнитное поле записано в виде разложения по системе собственных волн плазменного столба со смешанным (дискретно-непрерывным) спектром.

В § 1.3.1 исследуются особенности подынтегрального выражения в представлении поля антенны в виде разложения в интеграл Фурье по продольному волновому числу. Показано, что данное выражение, наряду с полюсами на комплексной плоскости переменной интегрирования, отвечающими собственным модам (волнам дискретного спектра), имеет также точки ветвления. При вычислении поля антенны наличие данных точек приводит к появлению интегралов по берегам разрезов, соответствующих вкладу волн непрерывного пространственного спектра в возбуждаемое поле. Далее из общего интегрального представления выделены в явном виде вклады, отвечающие собственным модам плазменного столба и волнам непрерывной части спектра.

В следующем § 1.3.2 получены удобные для дальнейших расчетов представления, описывающие вклад в поле антенны волн непрерывной части пространственного спектра.

В § 1.3.3 анализируется вклад направляемых плазменным столбом собственных мод, т.е. волн дискретной части спектра, в поле антенны.

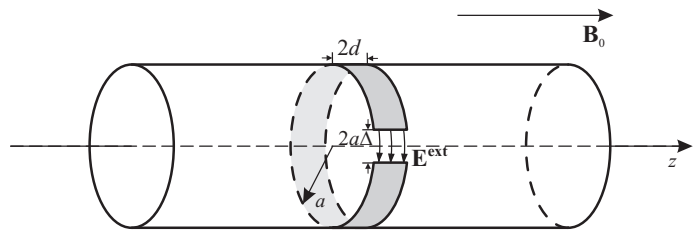


Рис. 1. Рамочная антенна, расположенная на поверхности плазменного столба

Коэффициенты возбуждения собственных мод вычислены с помощью метода, основанного на использовании «транспонированной» леммы Лоренца и обобщающего известную теорию возбуждения экранированных и открытых волноводов в изотропной среде на случай открытых направляющих систем с гиротропным заполнением. Записаны выражения для компонент полей отдельных собственных мод. Далее получены соотношения, описывающие вклад в поле антенны волн дискретной части пространственного спектра.

В разделе 1.4 на основе полученных представлений поля, а также граничных условий для его тангенциальных компонент  $E_{\varphi,z}$  на поверхности антенны выведены интегральные уравнения для неизвестных азимутальных гармоник  $\mathcal{I}_m(z)$  поверхностной плотности тока.

В следующем разделе 1.5 даны общие соотношения для энергетических характеристик излучения рассматриваемой антенны, которые позволяют для известного распределения тока найти ее полную излучаемую мощность и сопротивление излучения, а также относительные доли мощности, идущей в волны дискретной и непрерывной частей пространственного спектра.

В заключительном разделе 1.6 первой главы сформулированы основные выводы, вытекающие из проведенного в ней рассмотрения.

Во **второй главе** задача о распределении тока и импедансе рамочной антенны, расположенной на поверхности продольно замагниченного плазменного столба, решается применительно к случаю нерезонансной плазмы в столбе.

В разделе 2.1 исследуются свойства ядер полученных в Гл. 1 интегральных уравнений. Показано, что данные ядра допускают представление в виде сумм сингулярных и регулярных слагаемых. Получены выражения для каждого из этих слагаемых.

В § 2.1.1 проведен анализ сингулярных частей ядер интегральных уравнений. Показано, что в случае столба, заполненного нерезонансной магнитоактивной плазмой, сингулярные части ядер имеют такие же особенности, как и в случае антенны, расположенной в однородной магнитоактивной плазменной среде. Однако коэффициенты при функциях, описывающих соответствующие особенности, могут быть найдены в рассматриваемом случае, вообще говоря, лишь с помощью численных методов.

Свойства регулярных частей ядер интегральных уравнений исследуются в § 2.1.2. Показано, что данные величины могут быть сравнительно легко определены с помощью численных методов.

В разделе 2.2 с учетом изученных свойств ядер интегральных уравнений получено их решение для азимутальных гармоник тока. Распределение тока антенны представлено в виде ряда, который в общем случае может быть просуммирован численно.



Следующий раздел 2.3 посвящен исследованию входного импеданса и мощности излучения антенны. Приведены формулы, позволяющие по найденному распределению тока рассчитать сопротивление излучения и реактанс антенны, а также полную мощность излучения и относительные доли мощности, идущей в волны дискретного и непрерывного спектра.

В разделе 2.4 обсуждаются дисперсионные свойства и структура полей собственных мод, поддерживаемых замагниченным плазменным столбом в нерезонансном диапазоне частот магнитоактивной плазмы, лежащем между гирочастотой и плазменной частотой электронов. На основании численного исследования дисперсионного уравнения показано, что для фиксированного азимутального индекса плазменный столб, окруженный изотропной средой, может поддерживать в данном частотном диапазоне не более одной поверхностной моды. В качестве примера приведены дисперсионные кривые трех собственных мод с азимутальными индексами  $m = 0, \pm 1$ , а также распределения компонент поля азимутально-симметричной собственной моды.

Результаты численных расчетов, демонстрирующие распределение тока рамочной антенны и поведение ее входного импеданса в указанном диапазоне частот в зависимости от радиуса антенны и плазменного столба, представлены в разделе 2.5. Здесь показано, что наличие плазменного столба приводит в нерезонансном диапазоне частот к значительному изменению распределений амплитуды и фазы тока, а также входного импеданса антенны по сравнению со случаями ее размещения как в фоновой изотропной среде, так и в однородной магнитоактивной плазме, параметры которой совпадают с параметрами плазмы внутри столба (см. рис. 2). При этом поведение электродинамических характеристик антенны существенным образом зависит от поперечных геометрических размеров рассматриваемой системы (ср. рис. 2 а, б и рис. 2 в, г).

В разделе 2.6 исследуется распределение излучаемой антенной мощности по пространственному спектру возбуждаемых волн. На основании численных расчетов парциальных сопротивлений излучения в волны непрерывного спектра и в отдельные собственные моды для различных значений радиуса плазменного столба сделан вывод, что при изменении размеров системы происходит перераспределение энергии по пространственному спектру возбуждаемых волн. При этом с ростом радиуса плазменного столба увеличивается относительный вклад волн дискретной части спектра в сопротивление излучения.

Выводы по второй главе сформулированы в разделе 2.7.

В **третьей главе** решается задача о распределении тока и импедансе рамочной антенны, расположенной на поверхности продольно замагниченного плазменного столба в случае, когда плазма внутри столба

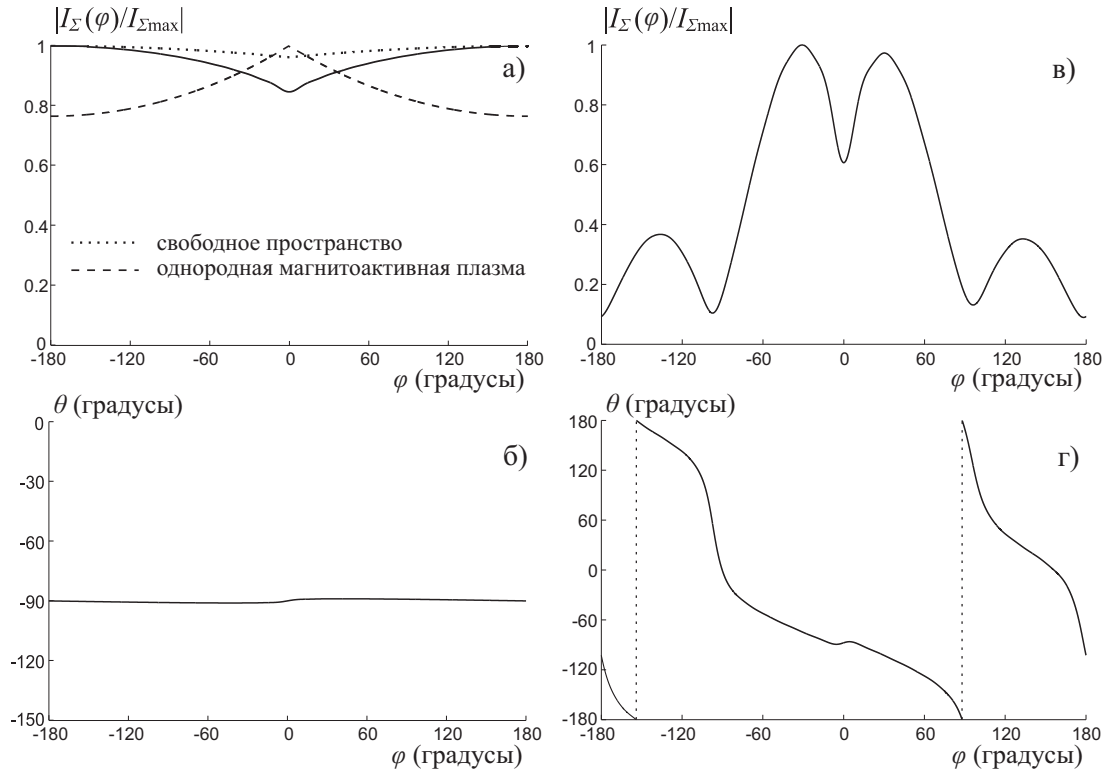


Рис. 2. Зависимости нормированной амплитуды  $|I_{\Sigma}(\varphi)/I_{\Sigma\max}|$  и фазы  $\theta$  тока антенны (сплошные линии) от азимутального угла  $\varphi$  для двух значений радиуса антенны и плазменного столба, расположенного в свободном пространстве:  $a = 0,4$  см (а, б) и  $a = 2,5$  см (в, г); плотность плазмы в столбе  $N = 10^{11}$  см $^{-3}$ , внешнее магнитное поле  $B_0 = 200$  Гс, круговая частота  $\omega = 6,6 \cdot 10^9$  с $^{-1}$

является резонансной и допускает существование квазиэлектростатических волн.

В разделе 3.1 показано, что в случае резонансной плазмы в столбе ядра интегральных уравнений, полученных в Гл. 1, можно, как и в случае столба, заполненного нерезонансной плазмой, представить в виде сумм сингулярных и регулярных слагаемых. Однако теперь в сингулярные части ядер дают вклад не только волны непрерывного спектра, но волны дискретного спектра, включающие бесконечное число распространяющихся собственных квазиэлектростатических мод.

В § 3.1.1 исследуется вклад волн непрерывного спектра в сингулярные части ядер интегральных уравнений. Получены в аналитическом виде представления сингулярных частей ядер, отвечающих вкладам волн непрерывного спектра.

Анализ вклада волн дискретного спектра в сингулярные части ядер интегральных уравнений представлен в § 3.1.2. Для мод со сравнительно большими значениями постоянных распространения получено приближенное дисперсионное уравнение, допускающее аналитическое решение. С учетом

данного обстоятельства найдены в явном виде представления сингулярных частей ядер, отвечающих волнам дискретного спектра.

В следующем § 3.1.3 исследованы регулярные части ядер интегральных уравнений. Приведены выражения для регулярных частей ядер, показано, что данные величины могут быть вычислены с помощью численных методов.

В разделе 3.2 записано решение интегральных уравнений для тока антенны в виде ряда, который в общем случае суммируется лишь численно. Показано, что при некоторых упрощающих условиях данный ряд можно суммировать приближенно, что позволяет получить довольно простое выражение, описывающее распределение тока с комплексной постоянной распространения. Отмечается, что условия, при соблюдении которых выведена приближенная формула для распределения тока, определяют границы применимости обобщенного метода длинных линий для кольцевой антенны, расположенной на поверхности рассматриваемого плазменного столба.

Раздел 3.3 посвящен исследованию входного импеданса и мощности излучения антенны. Показано, что при определенных условиях импеданс антенны формально совпадает с входным импедансом закороченной двухпроводной линии, постоянная распространения тока вдоль которой является комплексной. Здесь же анализируется выражение для входного импеданса в предельных случаях малых и больших радиусов антенны. Приводятся выражения для полной мощности излучения антенны, а также для парциальных сопротивлений излучения в волны дискретной и непрерывной частей пространственного спектра.

В следующем разделе 3.4 исследуются дисперсионные характеристики и структура полей собственных мод, направляемых плазменным столбом в резонансном интервале частот. Применительно к резонансной области свистового диапазона частот обсуждаются поверхности показателей преломления нормальных волн бесстолкновительной магнитоактивной плазмы, а также типы направляемых плазменным столбом мод. Представлены результаты численных расчетов дисперсионных зависимостей и структуры полей собственных мод.

В разделе 3.5 приведены результаты численных расчетов, иллюстрирующие распределение тока антенны (см. рис. 3) и поведение ее входного импеданса в зависимости от радиуса антенны и плазменного столба. Установлено, что наличие столба, заполненного резонансной магнитоактивной плазмой, существенно влияет на электродинамические характеристики антенны по сравнению со случаем ее размещения в фоновой изотропной среде. При этом распределения амплитуды и фазы тока антенны, а также поведение ее входного импеданса оказываются аналогичными соответствующим зависимостям для рамочной антенны,

помещенной в однородную резонансную магнитоактивную плазменную среду, параметры которой совпадают с параметрами плазмы внутри столба.

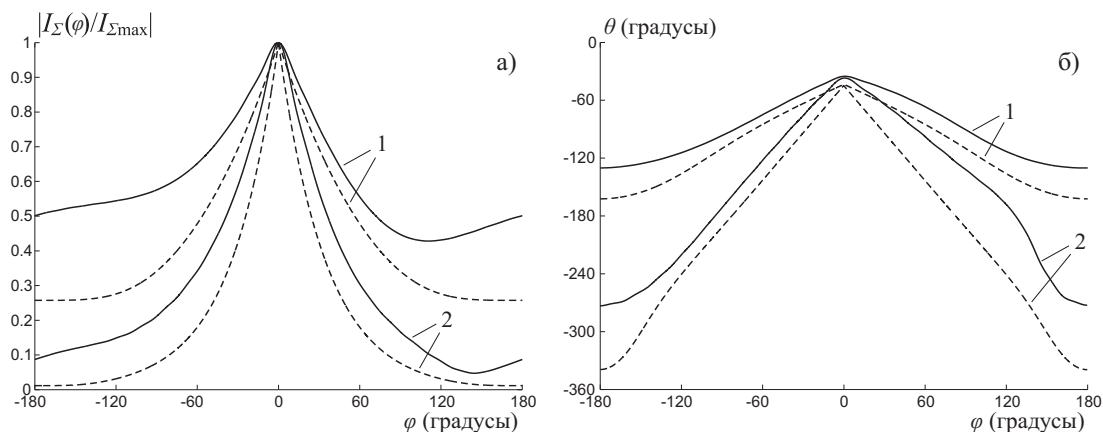


Рис. 3. Зависимости нормированной амплитуды (а) и фазы (б) тока антенны от азимутального угла  $\varphi$ , полученные по строгой формуле (сплошные линии) и в рамках метода длинных линий (штриховые линии) для двух значений радиуса антенны и плазменного столба, расположенного в свободном пространстве:  $a = 2$  см (1) и  $a = 5$  см (2); плотность плазмы в столбе  $N = 10^{13}$  см $^{-3}$ , внешнее магнитное поле  $B_0 = 800$  Гс, круговая частота  $\omega = 1,7 \cdot 10^8$  с $^{-1}$

В следующем разделе 3.6 на основе найденного самосогласованного распределения тока антенны исследуется эффективность возбуждения такой антенной волн, принадлежащих различным частям пространственного спектра. Сделан вывод, что в рассматриваемом случае сопротивление излучения антенны практически полностью определяется собственными модами плазменного столба, в состав которых входит бесконечное число распространяющихся квазиэлектростатических мод.

Основные выводы по главе сформулированы в разделе 3.7.

**Четвертая глава** посвящена решению задачи о распределении тока и импедансе ленточной антенны, возбуждаемой сторонней ЭДС и представляющей собой бесконечно тонкую, идеально проводящую узкую ленту бесконечной протяженности (см. рис. 4). Предполагается, что антенна расположена перпендикулярно внешнему магнитному полю на плоской границе раздела резонансной магнитоактивной плазмы и изотропной среды.

В разделе 4.1 приводится постановка задачи о распределении тока в ленточной антенне. Плотность поверхностного тока  $\mathbf{x}_0 I(x, z)$ , возбуждаемого в антенне сторонней ЭДС, представляется в виде разложения в интеграл Фурье по нормированному (на  $k_0$ ) волновому числу  $n_x$ . Здесь же записаны граничные условия для тангенциальных компонент электрического поля на поверхности антенны.

В следующем разделе 4.2 выведены выражения для компонент электромагнитного поля, возбуждаемого током  $I(x, z)$ , для областей

пространства, заполненных магнитоактивной плазмой и изотропной средой. При этом поле антенны представлено в виде разложения в интеграл Фурье по нормированным (на  $k_0$ ) волновым числам  $n_x$  и  $n_z$ .

В разделе 4.3 получены удобные для дальнейших расчетов интегральные представления тангенциальных компонент поля на границе раздела двух сред. С учетом данных представлений, а также граничных условий для тангенциальных компонент электрического поля на поверхности антенны выведены интегральные уравнения для Фурье-образа  $\mathcal{I}(n_x, z)$  поверхностной плотности тока.

В следующем разделе 4.4 исследуются свойства ядер полученных интегральных уравнений. Показано, что данные ядра допускают представление в виде сумм сингулярных и регулярных слагаемых. Оказывается, что при определенных условиях свойства ядер, как и в случае рамочной антенны на поверхности столба, заполненного резонансной магнитоактивной плазмой, позволяют получить приближенные решения интегральных уравнений для  $\mathcal{I}(n_x, z)$  в аналитическом виде. Решение задачи о распределении тока антенны представлено интегралом по волновому числу  $n_x$ , допускающим в общем случае лишь численное исследование. При некоторых упрощающих условиях, определяющих границы применимости обобщенного метода длинных линий, получены приближенные аналитические выражения для распределения тока и импеданса антенны.

Результаты численных расчетов, иллюстрирующие поведение распределения тока и входного импеданса ленточной антенны в зависимости от параметров, представляющих практический интерес, приведены в разделе 4.5. Здесь же отмечается, что полученное решение для распределения тока антенны бесконечной длины может быть обобщено на случай антенны конечной протяженности в рамках подхода, основанного на использовании разработанного применительно к данному случаю метода длинных линий.

Выводы по главе изложены в разделе 4.6.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертации.

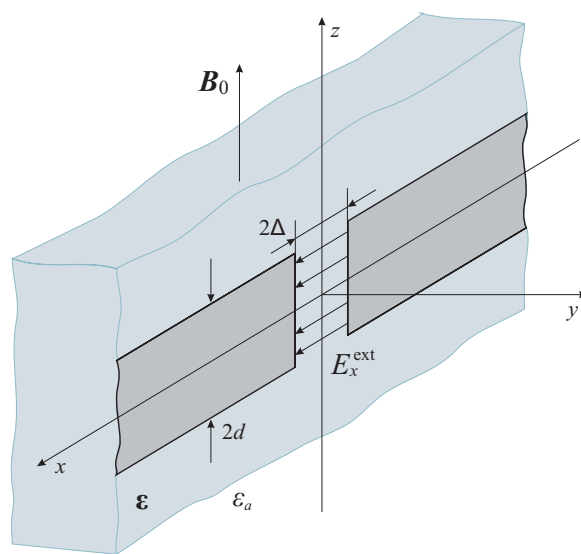


Рис. 4. Ленточная антенна, расположенная на плоской границе раздела магнитоактивной плазмы ( $y < 0$ ) и изотропной среды ( $y > 0$ )

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Получено строгое решение задачи о распределении тока рамочной антенны, представляющей собой бесконечно тонкую, идеально проводящую узкую ленту, свернутую в кольцо и расположенную на поверхности столба, заполненного холодной бесстолкновительной магнитоактивной плазмой и окруженного фоновой изотропной средой. Построенное решение, описывающее распределение тока как вдоль, так и поперек ленты, представляет собой обобщение результатов теории тонких металлических антенн в однородной замагниченной плазме на случай наличия открытого цилиндрического волновода с магнитоактивным плазменным заполнением. Установлено, что распределение тока антенны, расположенной на поверхности такого столба, оказывается сложной интегральной характеристикой, учитывающей вклады волн дискретной и непрерывной частей пространственного спектра данной направляющей системы.

2. Обнаружено, что наличие плазменного столба приводит к существенному изменению распределения тока и входного импеданса рамочной антенны по сравнению со случаями ее размещения в фоновой изотропной среде или однородной магнитоактивной плазме, параметры которой совпадают с параметрами плазмы внутри столба.

3. Показано, что в случае резонансной плазмы в столбе при выполнении упрощающих условий, которые фактически отвечают переходу к квазиэлектростатическому приближению и определяют границы применимости обобщенного метода длинных линий, удается получить сравнительно простое выражение для распределения тока рамочной антенны. В данном приближении распределение тока антенны, расположенной на поверхности такого плазменного столба, определяется комплексной постоянной распространения  $h = k_0(\varepsilon_a - i|\varepsilon\eta|^{1/2})^{1/2}/\sqrt{2}$ , где  $\varepsilon$  и  $\eta$  — диагональные компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости плазмы внутри столба,  $\varepsilon_a$  — относительная диэлектрическая проницаемость фоновой среды,  $k_0$  — волновое число в свободном пространстве.

4. Установлено, что при условиях применимости обобщенного метода длинных линий приближенное выражение для импеданса рамочной антенны, расположенной на поверхности столба, заполненного резонансной магнитоактивной плазмой, формально совпадает с входным импедансом закороченной двухпроводной линии, имеющей комплексную постоянную распространения тока  $h$ .

5. На основе найденного самосогласованного решения для тока рамочной антенны исследовано распределение излучаемой ею мощности по пространственному спектру возбуждаемых волн. Установлено, что в случае,

когда плазма в столбе является нерезонансной, распределение излучаемой мощности по спектру возбуждаемых волн изменяется с увеличением радиуса антенны и плазменного столба таким образом, что для достаточно больших значений радиуса относительная доля мощности, идущей в волны дискретного спектра, возрастает и вносит заметный вклад в полную мощность излучения антенны.

6. Показано, что в резонансной области свистового диапазона частот магнитоактивной плазмы сопротивление излучения рамочной антенны, расположенной на поверхности плазменного столба, практически полностью определяется его собственными модами, в состав которых входит бесконечное число распространяющихся квазиэлектростатических мод.

7. Получено решение задачи о распределении тока и входном импедансе линейной антенны, представляющей собой бесконечно тонкую, идеально проводящую узкую ленту, расположенную на плоской границе раздела резонансной магнитоактивной плазмы и изотропной среды перпендикулярно внешнему магнитному полю. Найденное решение позволяет рассчитать основные электродинамические характеристики антенны, а также их зависимости от параметров излучателя и плазменной среды.

8. При выполнении упрощающих условий, которые устанавливают границы применимости приближенного метода длинных линий, получены сравнительно простые выражения для распределения тока и входного импеданса рассмотренной ленточной антенны. В данном приближении распределение тока, а также входной импеданс данной антенны совпадают с соответствующими величинами некоторой эквивалентной длинной линии. При этом в случае  $|\varepsilon\eta|^{1/2} \gg \varepsilon_a$  постоянная распространения тока является комплексной величиной, равной  $h = k_0|\varepsilon\eta|^{1/4}(1 - i)/2$ .

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Заборонкова Т. М., Зайцева А. С., Кудрин А. В. Распределение тока рамочной антенны, расположенной на поверхности продольно замагниченного плазменного столба // Вестник Нижегородского университета. 2011. № 5(3). С. 321–326.
2. Зайцева А. С., Кудрин А. В. Распределение тока и входной импеданс рамочной антенны, расположенной на поверхности продольно замагниченного плазменного столба // Т-Comm–Телекоммуникации и транспорт. 2011. № 11. С. 39–42.
3. Kudrin A. V., Zaitseva A. S., Zaboronkova T. M., Krafft C., Kyriacou G. A. Theory of a strip loop antenna located on the surface of an axially magnetized plasma column // Progress in Electromagnetics Research B. 2013. V. 51. P. 221–246.

4. Kudrin A. V., Zaitseva A. S., Zaboronkova T. M., Zilitinkevich S. S. Current distribution and input impedance of a strip loop antenna located on the surface of a circular column filled with a resonant magnetoplasma // *Progress in Electromagnetics Research B*. 2013. V. 55. P. 241–256.
5. Зайцева А. С., Кудрин А. В. Распределение тока рамочной антенны, расположенной на поверхности замагниченного плазменного столба // *Труды Четырнадцатой Научной конференции по радиофизике. 7 мая 2010 г.* / Ред. А. В. Якимов, С. М. Грач. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2010. С. 14–16.
6. Зайцева А. С. Распределение тока и импеданс рамочной антенны, расположенной на поверхности продольно замагниченного плазменного столба // *Труды Шестнадцатой Нижегородской сессии молодых ученых. Естественные науки. Нижний Новгород, 2011.* С. 26–30.
7. Kudrin A. V., Zaitseva A. S., Zaboronkova T. M., Krafft C. Electrodynamic characteristics of a strip loop antenna located on the surface of a gyrotropic plasma column // *Days on Diffraction'2011* / Ed. O. V. Motygin, A. S. Kirpichnikova, A. P. Kiselev, M. V. Perel. St. Petersburg: St. Petersburg University, 2011. P. 111–116.
8. Zaitseva A. S., Kudrin A. V., Zaboronkova T. M. Electrodynamic characteristics of a loop antenna located on the surface of an axially magnetized plasma column // *Proc. of the 6th European Conference on Antennas and Propagation. Prague, 2012.* P. 3053–3057.
9. Zaitseva A. S., Kudrin A. V., Zaboronkova T. M., Kyriacou G. A. The theory of a loop antenna located on the surface of a circular cylinder filled with a resonant magnetoplasma // *Proc. of the 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Kharkiv, 2012.* P. 553–556.
10. Kudrin A. V., Zaitseva A. S., Zaboronkova T. M. Using the eigenfunction expansion technique for analysis of the electrodynamic characteristics of a loop antenna located on the surface of a magnetized plasma column // *Proc. of the 32nd Progress in Electromagnetics Research Symposium. Moscow, 2012.* P. 1511–1515.
11. Zaitseva A. S., Kudrin A. V., Spagnolo B., Zaboronkova T. M. Analysis of a strip loop antenna located on the surface of an open cylindrical waveguide filled with a resonant magnetoplasma // *Proc. of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory. Hiroshima, 2013.* P. 672–675.
12. Kudrin A. V., Zaboronkova T. M., Zaitseva A. S. An analysis of a strip antenna located at an interface between free space and a magnetoplasma // *Proc. of the 34nd Progress in Electromagnetics Research Symposium. Stockholm, 2013.* P. 946–950.



13. Kudrin A. V., Zaitseva A. S., Zaboronkova T. M., Krafft C. Electrodynamic characteristics of a strip loop antenna located on the surface of a gyrotropic plasma column // International Conference «Days on Diffraction'2011»: Abstracts. St.Petersburg, 2011. P. 66–67.
14. Kudrin A. V., Zaitseva A. S., Zaboronkova T. M. Using the eigenfunction expansion technique for analysis of the electrodynamic characteristics of a loop antenna located on the surface of a magnetized plasma column // 32nd Progress in Electromagnetics Research Symposium: Abstracts. Moscow, 2012. P. 859.
15. Kudrin A. V., Zaboronkova T. M., Zaitseva A. S. An analysis of a strip antenna located at an interface between free space and a magnetoplasma // 34nd Progress in Electromagnetics Research Symposium: Abstracts. Stockholm, 2013. P. 809.

## ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение . . . . .	4
<b>Глава 1. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ТОКА РАМОЧНОЙ АНТЕННЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРОДОЛЬНО ЗАМАГНИЧЕННОГО ПЛАЗМЕННОГО СТОЛБА . . . . .</b>	<b>17</b>
1.1. Постановка задачи и основные соотношения . . . . .	17
1.2. Представление поля антенны в виде разложения в интеграл Фурье по продольному волновому числу . . . . .	21
1.3. Спектральное представление поля антенны . . . . .	26
1.3.1. Разложение поля антенны по собственным волнам плазменного столба . . . . .	26
1.3.2. Вклад в поле антенны волн непрерывной части пространственного спектра . . . . .	28
1.3.3. Вклад в поле антенны волн дискретной части пространственного спектра . . . . .	30
1.4. Вывод интегральных уравнений для тока . . . . .	34
1.5. Общее представление полной мощности излучения антенны . . . . .	35
1.6. Выводы . . . . .	38
<b>Глава 2. РАМОЧНАЯ АНТЕННА НА ПОВЕРХНОСТИ СТОЛБА, ЗАПОЛНЕННОГО НЕРЕЗОНАНСНОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМОЙ . . . . .</b>	<b>39</b>
2.1. Исследование ядер интегральных уравнений для тока антенны . . . . .	39
2.1.1. Анализ сингулярных частей ядер . . . . .	42
2.1.2. Анализ регулярных частей ядер . . . . .	48
2.2. Решение интегральных уравнений для тока . . . . .	51
2.3. Входной импеданс и мощность излучения антенны . . . . .	53
2.4. Дисперсионные характеристики и структура полей собственных мод, направляемых плазменным столбом в нерезонансной области частот . . . . .	54
2.5. Результаты численных расчетов распределения тока и входного импеданса . . . . .	57
2.6. Анализ вкладов волн дискретной и непрерывной частей пространственного спектра в полную мощность излучения антенны . . . . .	64
2.7. Выводы . . . . .	65

<b>Глава 3. РАМОЧНАЯ АНТЕННА НА ПОВЕРХНОСТИ СТОЛБА, ЗАПОЛНЕННОГО РЕЗОНАНСНОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМОЙ . . . . .</b>	<b>67</b>
3.1. Исследование ядер интегральных уравнений для тока антенны	67
3.1.1. Анализ вклада волн непрерывного спектра в сингулярные части ядер . . . . .	68
3.1.2. Анализ вклада волн дискретного спектра в сингулярные части ядер . . . . .	70
3.1.3. Анализ регулярных частей ядер . . . . .	75
3.2. Решение интегральных уравнений для тока . . . . .	78
3.3. Входной импеданс и мощность излучения антенны . . . . .	82
3.4. Дисперсионные характеристики и структура полей собственных мод, направляемых плазменным столбом в резонансной области частот . . . . .	84
3.5. Результаты численных расчетов распределения тока и входного импеданса . . . . .	88
3.6. Анализ вкладов волн дискретной и непрерывной частей пространственного спектра в полную мощность излучения антенны . . . . .	92
3.7. Выводы . . . . .	94
<b>Глава 4. ЛЕНТОЧНАЯ АНТЕННА, РАСПОЛОЖЕННАЯ НА ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЫ И ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ . . . . .</b>	<b>96</b>
4.1. Постановка задачи и основные соотношения . . . . .	96
4.2. Представление поля антенны в виде разложения в интеграл Фурье . . . . .	98
4.3. Вывод интегральных уравнений для тока . . . . .	103
4.4. Решение интегральных уравнений для тока . . . . .	105
4.5. Результаты численных расчетов распределения тока и входного импеданса . . . . .	108
4.6. Выводы . . . . .	112
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>Литература . . . . .</b>	<b>116</b>

Подписано в печать 20.11.2013 г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1. Заказ № 1013. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии ННГУ им. Н. И. Лобачевского.  
603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37.