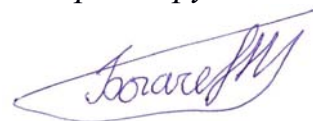


На правах рукописи



Богачев Николай Николаевич

РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ИЗЛУЧЕНИЕ СИГНАЛА
ПЛАЗМЕННОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННОЙ

1.3.9. Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2021

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

Научный руководитель: **Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы**
доктор физико-математических наук, профессор,
и.о. заведующего теоретическим отделом
ИОФ РАН

**Официальные
оппоненты:**

Алиев Юрий Миронович
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории теории
плазменных явлений ФИАН

Раваев Александр Александрович
доктор физико-математических наук, заместитель
директора Научно технического центра
«Плазменных технологий» АО МРТИ РАН

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.223.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН), по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
<https://diss.gpi.ru/all/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.223.02,
к.ф.-м.н.
тел. +7(499)503-8777 доб.1-47



Воляк Т.Б.

Общая характеристика работы

Актуальность темы работы

Плазменные антенны – класс антенн, в котором в качестве волноведущих, излучающих и управляющих элементов используется ионизованная среда (плазма). Основными преимуществами таких антенн перед традиционными металлическими антеннами являются малая радиолокационная заметность, возможность быстрого включения/выключения и электронного изменения параметров. Электрическое управление параметрами и характеристиками плазменной антенны осуществляется путём изменения параметров плазмы (концентрации, частоты столкновений, длины плазменного образования). Вышеперечисленные свойства плазменных антенн актуальны в высокоскоростных и помехоустойчивых телекоммуникационных системах, а также системах радиолокации и связи объектов вооружения и военной техники. В настоящее время плазменные антенны исследуются и разрабатываются научными группами в разных странах мира.

В плазменных технологиях в антенной технике можно выделить несколько направлений: плазменные антенны из газоразрядных трубок; плазменные полупроводниковые антенны; струйные плазменные антенны и др.

Плазменные антенны из газоразрядных трубок – самое обширное направление исследований. В режиме радиомолчания радиотехнической системы, когда такие антенны «выключены», то диэлектрическая трубка с газом почти не отражает, а в режиме работы *малая радиолокационная заметность* (малая эффективность площади рассеяния) обусловлена тем, что плазма отражает радиоволны меньше, чем металлическая антенна аналогичных размеров [1]. *Быстрое включение/выключение* плазменных антенн по сравнению с металлическими аналогами, требующими механического извлечения из радиомаскирующего укрытия, обеспечивается ионизацией и рекомбинацией плазмы за время порядка единиц микросекунд [2]. *Улучшение электромагнитной совместимости* достигается заменой нескольких антенн от

непостоянно работающих радиотехнических систем на одну плазменную с попеременным подключением к ней соответствующих систем.

Объектом исследования диссертационной работы является *плазменная несимметричная вибраторная антенна (ПНВА)*.

Этот тип антенн исследуется с конца XX века, были созданы работающие образцы, частично исследованы их характеристики. Однако ещё остаётся ряд нерешённых фундаментальных вопросов, в частности плохо исследованы нелинейные зависимости характеристик антенн (диаграммы направленности, мощности излучения и др.) от концентрации плазмы [2–4], что необходимо для определения *оптимального режима работы антенны*. Под *оптимальным режимом работы* в данном случае понимается режим, при котором электрические характеристики плазменной антенны (распределение электрического поля на антенне и диаграмма направленности), а также характеристики излучаемого сигнала (временные и спектральные) близки к характеристикам аналогичной металлической антенны. Слабоизученными являются вопросы о связи условий распространения поверхностной электромагнитной волны и характеристик антенны. Также отсутствуют работы, посвященные комплексным исследованиям излучения сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной, характеристикам антенны и особенностям излучаемого антенной сигнала в диапазоне высоких (ВЧ) или сверхвысоких (СВЧ) частот. Эти исследования необходимы для определения возможностей управления (диапазонов изменения параметров и характеристик плазменных антенн), при которых нет сильных искажений передаваемых сигналов и заметного ухудшения характеристик антенн.

Всё вышеперечисленное обуславливает **актуальность темы диссертационной работы**.

Целью работы является определение режимов работы плазменной несимметричной вибраторной антенны (ПНВА) из газоразрядной трубки и параметров (особенностей) излучаемого ею сигнала, а также сравнения ее характеристик с аналогичными для металлической антенны.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проанализированы программные комплексы для моделирования антенно-фидерных устройств и модели плазменной среды. В электромагнитном коде «КАРАТ» созданы две численные модели плазменной антенны.

2. С помощью аналитических методов и численного моделирования обнаружены и исследованы различные режимы работы плазменной несимметричной четвертьволновой вибраторной антенны, а также исследована связь этих режимов с условиями распространения поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре конечного радиуса.

3. С помощью численной PIC-модели плазменной антенны исследовано влияние плазмы на спектральные характеристики излучаемого сигнала в различных режимах работы антенны.

4. Экспериментально исследованы диаграмма направленности и спектральные характеристики излучаемого сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенны. Проведено сравнение полученных характеристик плазменной антенны с характеристиками аналогичной металлической антенны и результатами моделирования.

Новизна. С помощью численного моделирования впервые были обнаружены три разных режима работы плазменной несимметричной вибраторной антенны (режим стоячей поверхностной электромагнитной волны, нелинейный и линейный режимы) и показана зависимость этих режимов от параметров плазмы и их связь с распространением поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре конечного радиуса. Впервые были проведены численные исследования спектральных характеристик сигнала, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной в трёх режимах работы, экспериментально исследованы спектральные характеристики излучаемого немодулированного и модулированного сигналов.

Научная значимость полученных результатов. Показана важная роль поверхностной электромагнитной волны в работе плазменной несимметричной

вibratorной антенны. Выявлены различные режимы работы плазменной антенны: режим стоячей поверхностной электромагнитной волны, нелинейный и линейный режимы. Определен диапазон параметров для оптимального режима работы ПНВА – линейного режима. Экспериментально обнаружено усиление высших гармоник в спектре немодулированного сигнала при излучении плазменной несимметричной vibratorной антенной, что отличает её от аналогичной металлической антенны.

Практическая ценность проведённых исследований состоит в том, что определён оптимальный режим работы ПНВА и соответствующий ему диапазон параметров плазмы; смоделированы и измерены характеристики такой антенны и передаваемого ею сигнала. По результатам проведённых исследований предложены рекомендации по оптимизации и использованию плазменной несимметричной vibratorной антенны. По результатам исследований получен патент на изобретение RU 2544806 C1, 20.03.2015 «Плазменная vibratorная антенна с ионизацией поверхностной волной».

Положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. У плазменной несимметричной vibratorной антенны есть три режима работы, связанные с условиями распространения поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре: режим стоячей поверхностной электромагнитной волны, нелинейный и линейный. Эти режимы определяются по дисперсионному уравнению для электромагнитной волны, распространяющейся по поверхности плазменного цилиндра, и зависят от соотношения ленгмюровской частоты плазмы и частоты входной электромагнитной волны. В линейном режиме работы диаграмма направленности и распределение электрического поля вблизи плазменной антенны близки к характеристикам аналогичной металлической антенны.

2. В спектре немодулированного гармонического колебания, излучаемого плазменной несимметричной vibratorной антенной, составляющие сигнала на второй и третьей гармониках частоты входного колебания имеют амплитуду выше, чем у гармоник в спектре сигнала металлической антенны.

3. Спектральная плотность мощности нелинейных комбинационных частот в спектре узкополосного частотно-модулированного сигнала, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной, ниже на $20,73 \pm 0,19$ дБ, чем в спектре сигнала, излучаемого металлической несимметричной вибраторной антенной. Спектральная плотность мощности на второй гармонике частоты модулирующего колебания в спектре детектированного сигнала, принятого от плазменной антенны, на $8,35 \pm 0,19$ дБ меньше, чем для сигнала от аналогичной металлической антенны.

Достоверность основных положений, выводов и результатов работы подтверждается: адекватностью (с учётом принятых допущений) разработанных численных моделей реальным объектам; соответствием результатов, полученных экспериментально и на основе расчетов с использованием известного математического аппарата, программ и методов компьютерного моделирования; согласованностью ряда полученных результатов с результатами, полученными другими авторами.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационных исследований неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях (11 докладов) [9а, 12а–21а], а также на научных семинарах ИОФ РАН и РТУ МИРЭА.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК [1а–11а], из которых 7 входят в международные базы данных WoS и SCOPUS. Получен 1 патент РФ на изобретение [22а].

Личный вклад автора состоит в участии в постановке задачи, планировании экспериментов и анализе полученных результатов. Численные расчеты, представленные в диссертации, проводились лично автором или при его непосредственном участии. Изложенные в работе результаты экспериментальных исследований получены лично диссертантом.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 102 страницы, включая 43 рисунка и 4 таблицы. Библиографический список содержит 120 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, дана общая характеристика работы и приведено краткое изложение основных разделов диссертации.

В первой главе описаны плазменные технологии в антенно-фидерных устройствах. Приведена классификация плазменных антенн и сделан обзор работ, посвященных плазменным антеннам и плазменным технологиям в антенной технике. Рассмотрены преимущества и недостатки различных конструкций и типов антенн. Подробно рассмотрены типы плазменных антенн из газоразрядных трубок: плазменные линейные антенны (рамочные и вибраторные; плазменные антенны бегущей волны; зеркальные (рефлекторные) антенны; волноводно-щелевые плазменные антенны; плазменные антенные решетки и интеллектуальные («умные») антенны.

Отдельно и достаточно подробно рассмотрены результаты исследований плазменной несимметричной вибраторной антенны (виды конструкций и основные характеристики). В диссертации обосновывается выбор в качестве объекта исследования конструкция плазменной несимметричной вибраторной антенны (ПНВА) с прямым вводом излучения от коаксиального кабеля (рисунок 1).

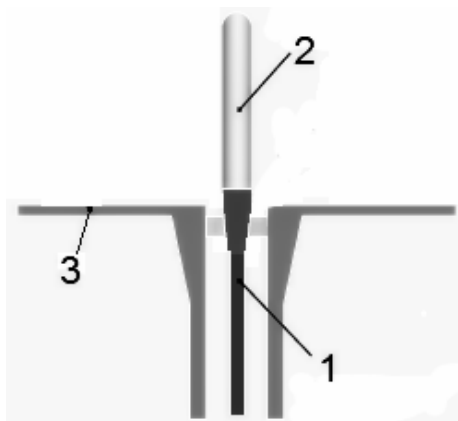


Рисунок 1. Плазменная несимметричная вибраторная антенна с питанием от коаксиального кабеля: 1 – коаксиальный кабель, 2 – газоразрядная трубка с плазмой, 3 – металлический экран.

Конструкция исследуемой ПНВА состоит из коаксиального кабеля 1, газоразрядной трубки с плазмой 2, один конец которой помещен в расширение коаксиального кабеля и зафиксирован с помощью диэлектрической вставки, и металлического экрана в форме диска 3. Внутренний проводник коаксиального волновода проводами соединен с контактами электродов газоразрядной трубки. Внешний проводник соединён непосредственно с металлическим экраном. Достоинствами такой конструкции является её простота, близость к конструкции аналогичной металлической антенны. Такая конструкция также позволяет использовать один источник ВЧ или СВЧ колебаний для создания плазмы и для передачи сигнала. Мощности передающей ВЧ или СВЧ станции в несколько десятков ватт (~ 40 Вт) достаточно, чтобы осуществлять передачу сигналов с помощью плазменной несимметричной вибраторной антенны длиной $l \approx \lambda_0/4$, где λ_0 – длина электромагнитной волны в свободном пространстве. В качестве газоразрядной трубки используется люминесцентная лампа низкого давления со смесью аргона (давление $p_a \approx 130 - 400$ Па $\approx 1-3$ торр) и паров ртути (давление $p_{рт} = 0,13 - 1,3$ Па = $10^{-3} - 10^{-2}$ торр).

Вторая глава посвящена методам исследования характеристик плазменной несимметричной вибраторной антенны, как экспериментальным, так и численным. В начале главы рассмотрены основные численные методы и программные комплексы, используемые для моделирования антенно-фидерных устройств и распространения радиоволн. Далее проведено сравнение результатов моделирования диаграммы направленности (ДН) металлической несимметричной вибраторной антенны (МНВА) в различных программных комплексах (MMANNA, EMPro, KARAT) с результатами экспериментальных измерений. По результатам этого сравнения был выбран электродинамический код KARAT, который не только адекватно моделирует металлические антенны, но также позволяет выполнить моделирование плазменной антенны как с применением модели Друде, так и с помощью метода «частица в ячейке» (PIC метод). В этом электродинамическом коде были созданы две численные модели плазменной несимметричной вибраторной антенны (раздел 2.3). В первой

модели плазма рассматривается как среда с диэлектрической проницаемостью, определяемой по формуле Друде, а во второй модели плазма задаётся с помощью PIC-метода. Раздел 2.4 посвящён описанию методик и лабораторного стенда, использованных при проведении экспериментальных исследований диаграмм направленности и спектров излучения плазменной и металлической несимметричных вибраторных антенн.

В третьей главе приведены результаты аналитических и численных исследований режимов работы и характеристик плазменной несимметричной вибраторной антенны, их связи с режимами распространения поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) на плазменном цилиндре. В разделе 3.1 описывается распространение поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре. Диэлектрическая проницаемость плазмы описывается с помощью формулы Друде:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu_e)} = \begin{cases} 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left(1 - i \frac{\nu_e}{\omega} \right), & \omega \gg \nu_e, \\ 1 - \frac{\omega_p^2}{\nu_e^2} + i \frac{\omega_p^2}{\omega \nu_e}, & \omega \ll \nu_e, \end{cases} \quad (1)$$

где $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m}}$ – плазменная частота, величина ν_e – частота столкновений электронов, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота электромагнитной волны.

В параграфе 3.2 исследуется решение дисперсионного уравнения поверхностной электромагнитной волны, распространяющейся на плазменном цилиндре конечного радиуса, в зависимости от различных параметров концентрации плазмы и частоты электронных столкновений в плазме. Выделено три режима распространения ПЭВ на плазменном цилиндре конечного радиуса, которые определяются соотношением плазменной частоты и частоты входной электромагнитной волны. Первый режим при $\omega_p \approx \sqrt{2} \cdot \omega_0$, когда дисперсионная характеристика подходит к отсечке – режим существования стоячей поверхностной электромагнитной волны на поверхности плазменного цилиндра. Второй режим при $\omega_p \approx 5 \cdot \omega_0$, когда

дисперсионная характеристика имеет криволинейный участок, – нелинейный режим. Третий режим – линейный, когда $\omega_p \geq 10 \cdot \omega_0$, когда и дисперсионная характеристика поверхностной волны линейна и близка к линии kc .

В параграфе 3.3. представлены результаты моделирования в численном коде КАРАТ распределений составляющих напряженности электрического поля в ближней зоне антенны и диаграмм направленности металлической и плазменной антенн при излучении электромагнитной волны на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц ($\omega_0 = 1,1 \cdot 10^{10}$ рад/с). При численном моделировании плазменной антенны использовалась модель Друде – модель плазмы как среды с диэлектрической проницаемостью вида (1), а металлическая антенна представлялась с помощью модели идеального проводника. На рисунке 2. представлены распределения поля $E_r(z)$ для МНВА и ПНВА в трех режимах работы.

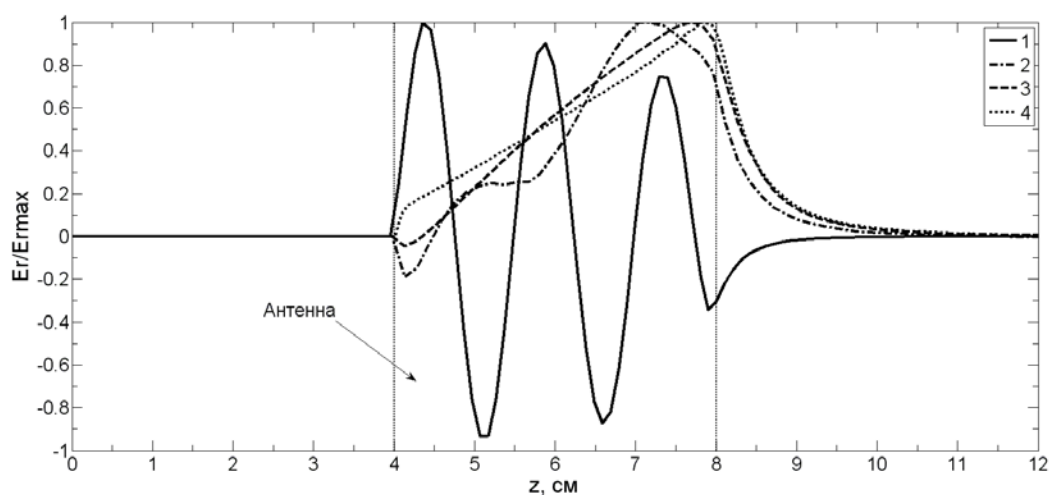


Рисунок 2. Распределения составляющей E_r по z для плазменной антенны с концентрацией плазмы 1 – $n_e = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = \sqrt{2} \cdot \omega_0$), 2 – $n_e = 9,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 5 \cdot \omega_0$), 3 – $n_e = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 10 \cdot \omega_0$) и 4 – металлической антенны.

В первом режиме (режим стоячей поверхностной волны) при концентрации плазмы $n_e = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = \sqrt{2} \cdot \omega_0$) формируется стоячая поверхностная электромагнитная волна с длиной $\lambda \approx 1,5$ см вдоль плазменного столба (кривая 1) без излучения её в окружающее пространство. Второй режим – нелинейный – проявляется при концентрации плазмы $n_e = 9,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 5 \cdot \omega_0$) (кривая 2), когда есть излучение волны в окружающее пространство, но

вид распределения $E_r(z)$ для ПНВА сильно отличается от аналогичного для МНВА. В третьем режиме (линейном) при $n_e = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 10 \cdot \omega_0$) распределение поля $E_r(z)$ и излучение волны в окружающее пространство плазменной антенны близки по характеру к аналогичной металлической антенны (кривые 3 и 4).

На рисунке 3 для тех же значений концентрации плазмы $n_e = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $9,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ представлены структуры поля $E_z(r)$ для разных режимов работы ПНВА и МНВА. В первом режиме (кривая 1) можно наблюдать как $E_z(r)$ быстро затухает в обе стороны от границы плазма-диэлектрик. В вакууме $E_z(r)$ заметно затухает на расстоянии $a = 1 \text{ см}$, что много меньше длины волны, подаваемой на антенну $\lambda_0 \approx 18 \text{ см}$. Это говорит о том, что при $\omega_p = \sqrt{2} \cdot 2\pi f_0$, антенна работает как линия поверхностной волны без излучения в окружающее пространство.

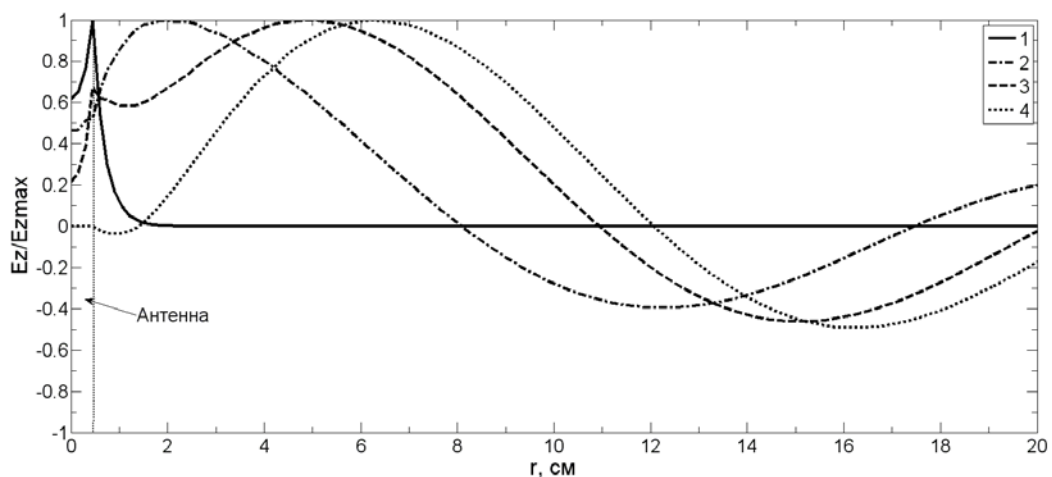


Рисунок 3. Распределения E_z по r для плазменной антенны с концентрацией плазмы 1 — $n_e = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = \sqrt{2} \cdot \omega_0$), 2 — $n_e = 9,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 5 \cdot \omega_0$), 3 — $n_e = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($\omega_p = 10 \cdot \omega_0$) и 4 — для металлической антенны.

Нелинейный режим работы ПНВА характеризуется наличием в распределении $E_z(r)$ (кривая 2) как составляющей поверхностной электромагнитной волны, так и составляющей излучаемой объемной волны. Поверхностная часть волны медленно затухает вглубь плазмы, а излучаемая объемная волна для случая $\omega_p = 5 \cdot 2\pi f_0$ отличается по фазе более чем на 60° от излучения металлической антенны (кривая 4).

В третьем режиме работы ПНВА (кривая 2) поверхностная волна быстро затухает в плазме, а объемная часть отличается от случая МНВА (кривая 4) лишь на 20° по фазе. Разница в фазе $E_z(r)$ для реальных ПНВА и МНВА может быть меньше в связи с конечностью скин-слоя в материалах МНВА.

Для МНВА и трех рассматриваемых различных случаев режимов работы ПНВА (концентрации плазмы $n_e = 8,0 \cdot 10^{10}$; $9,1 \cdot 10^{11}$; $3,6 \cdot 10^{12}$ см^{-3}) были построены также диаграммы направленности в прямоугольной системе координат для значений угла θ , взятых от 0 до 90° (0° совпадает с осью антенны) (рис. 4). Для удобства проведения сравнения ДН плазменной антенны (кривые 1–3) были по амплитуде поля нормированы на ДН металлической антенны (кривая 4 на рис.4).

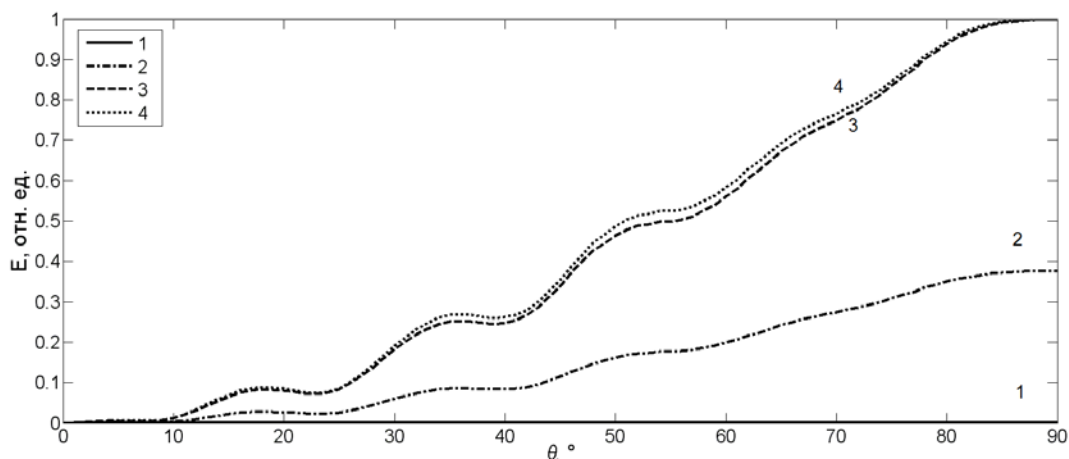


Рисунок 4. Диаграммы направленности антенн: плазменная антенна с концентрацией плазмы 1 – $n_e = 8,0 \cdot 10^{10}$ см^{-3} ($\omega_p = \sqrt{2} \cdot \omega_0$), 2 – $n_e = 9,1 \cdot 10^{11}$ см^{-3} ($\omega_p = 5 \cdot \omega_0$), 3 – $n_e = 3,6 \cdot 10^{12}$ см^{-3} ($\omega_p = 10 \cdot \omega_0$) и 4 – металлическая антенна.

Как видно на рисунке 4, в случае $n_e = 8,0 \cdot 10^{10}$ см^{-3} кривая 1 близка к 0, т.е. при $\omega_p = \sqrt{2} \cdot 2\pi f_0$, как уже отмечалось выше, антенна не излучает. В переходном режиме (кривая 2) $n_e = 9,1 \cdot 10^{11}$ см^{-3} и $\omega_p = 5 \cdot 2\pi f_0$ ДН меньше по амплитуде, чем ДН металлической антенны, что говорит о неоптимальной работе антенны по сравнению с МНВА. ДН для режима излучения $n_e = 3,6 \cdot 10^{12}$ см^{-3} и $\omega_p = 10 \cdot 2\pi f_0$ кривая 3 очень близка к кривой 4, из чего следует, что при $\omega_p \geq 10 \cdot 2\pi f_0$ плазменная антенна по характеристикам близка металлической [2а-4а].

В разделе 3.4 приводятся экспериментальные измерения диаграмм направленности ПНВА и МНВА, проведенные в безэховой камере отдела 21 АО «НИИ «Кулон». В качестве газоразрядной трубки ПНВА использовалась цилиндрическая люминесцентная лампа низкого давления ($p_a = 1-3$ торр и $p_{рт} = 10^{-3} - 10^{-2}$ торр). Электронная концентрация в плазме газового разряда в люминесцентной лампе ПНВА по оценкам находится в диапазоне $n_e \approx 10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что соответствует плазменной частоте $f_p \approx 10^9 - 10^{11}$ Гц). Эти параметры отвечают линейному режиму работы ПНВА для частоты входной электромагнитной волны $f_0 = 445$ МГц.

На рис. 5 представлены нормированные диаграммы направленности в E -плоскости для ПНВА и МНВА в полярных (рис.5а) и декартовых (рис.5б) координатах. На рисунках видно, что максимумы основных лепестков ДН для ПНВА и МНВА близки по положению в пространстве ($50-60^\circ$ и $300-310^\circ$), а уровень бокового лепестка по отношению к основному у ПНВА много меньше, чем у МНВА. Разница в амплитуде основного лепестка диаграммы направленности скорее всего вызвана затратами энергии на ионизацию плазмы и отличиями в соединении ПНВА и МНВА с коаксиальным кабелем [9а].

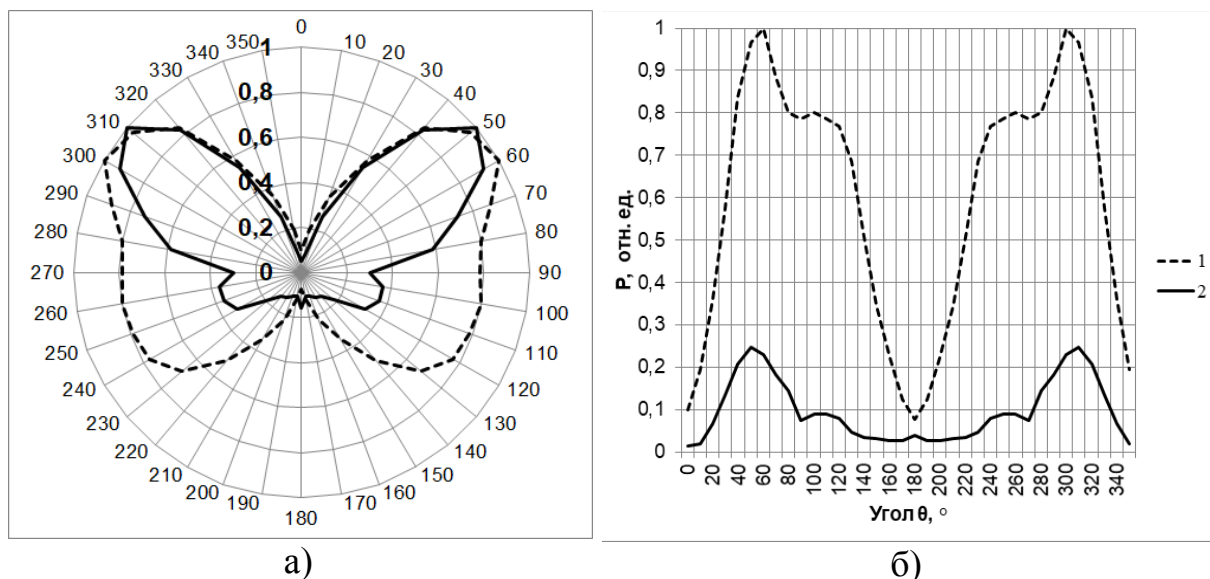


Рисунок 5. Диаграммы направленности: 1 – МНВА с $l = 29$ см, 2 – ПНВА с $l = 29$ см: а) нормированные на максимальное значение для каждой диаграммы, б) нормированные на максимальное значение диаграммы МНВА.

Четвертая глава посвящена экспериментальному и численному исследованию спектральных характеристик излучаемого сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенны. Здесь представлены результаты экспериментальных исследования спектра сигналов, излучаемых как плазменной несимметричной вибраторной антенной, так и аналогичной металлической антенной.

В спектре сигнала излучаемого МНВА, наряду с основной частотой излучаемого сигнала $f_0 = 446$ МГц, есть составляющие на частотах второй $2f_0$ и третьей $3f_0$ гармоник (рисунок 6а). Этот факт связан с тем, что использованный в эксперименте приёмопередатчик Vertex VX-2100 выдаёт не идеальный моногармонический сигнал, а сигнал с кратными гармониками несущей частоты. В спектре излучения ПНВА (рисунок 6б) заметно усиление составляющих на частоте кратных гармоник: второй $2f_0$, третьей $3f_0$ и четвертой $4f_0$, по сравнению с сигналом от МНВА [9а,11а].

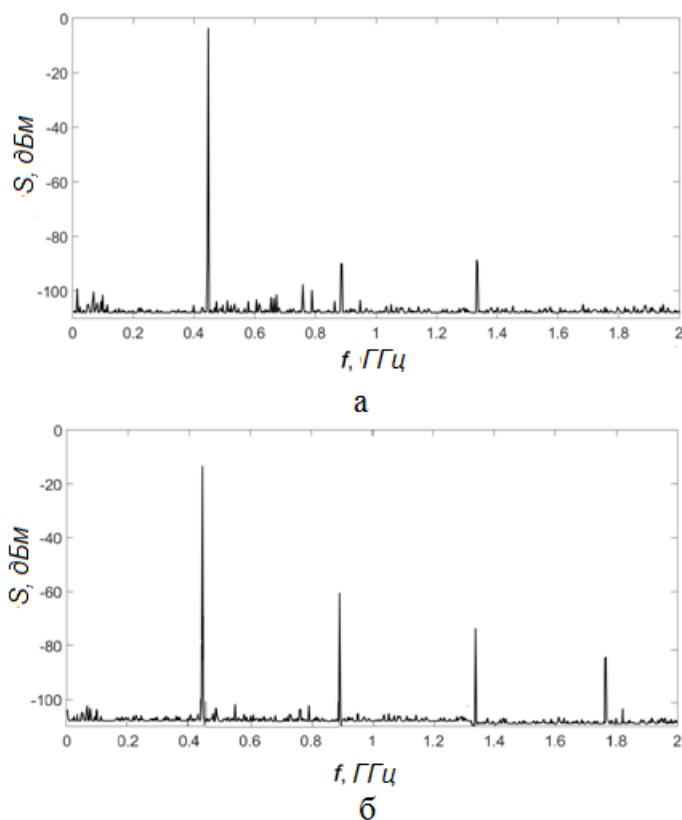


Рисунок. 6. Экспериментальные спектры излучаемого немодулированного гармонического колебания ($f_0 = 446$ МГц) с учетом коэффициента ослабления аттенюатора: а) МНВА, б) ПНВА.

Уровень спектральной плотности мощности в спектре ПНВА на частоте основной гармоники почти на 12 дБ меньше (из-за худшего согласования и потерь на ионизацию газа), чем в спектре МНВА, а для остальных гармоник на 10–30 дБ больше, чем в спектре МНВА.

На рисунке 7 представлены графики спектральной плотности мощности узкополосного частотно-модулированного сигнала, излученного МНВА и ПНВА. Данные спектры измерены вблизи несущей частоты $f_0 = 446$ МГц в полосе шириной 50 кГц. В спектрах видно не только компоненты на частоте несущего колебания f_0 и на частотах $f_0 \pm F$ с отстройкой $F = 5$ кГц (F – частота модулирующего сигнала), а также компоненты на частотах $f_0 \pm 2F, f_0 \pm 3F$ и т.д. Соотношение спектральной плотности мощности информационного сигнала на частотах $f_0 \pm F$ (12,21 дБ) и на несущей частоте f_0 (12,20 дБ) одинаковы для случая ПНВА и МНВА. Мощность нелинейных комбинационных частот $f_0 \pm 2F$ в спектре узкополосного частотно-модулированного сигнала излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной ниже на $20,73 \pm 0,19$ дБ чем в спектре сигнала, излучаемого металлической несимметричной вибраторной антенной, а для $f_0 \pm 3F$ разница составляет более $15,32 \pm 0,19$ дБ.

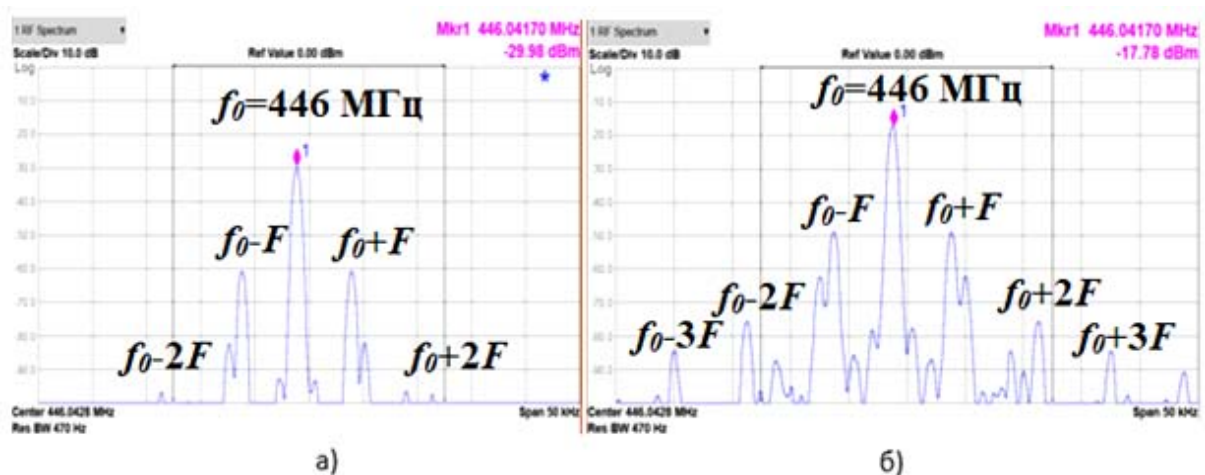


Рисунок 7. Спектральная плотность мощности ЧМ-сигнала:

а) ПНВА и б) МНВА.

С помощью анализатора сигналов РХА N9030В для детектирования сигнала была исследована спектральная плотность мощности низкочастотного модулирующего колебания (рисунок 8). На частоте модулирующего колебания

5 кГц мощность детектированного сигнала для ПНВА и МНВА одинакова и составляет $-62,14 \pm 0,19$ дБм. Компонента на второй гармонике модулирующего колебания у сигнала от плазменной несимметричной вибраторной антенны на $8,35 \pm 0,19$ дБ меньше, чем для случая металлической антенны, что косвенно свидетельствует об улучшении соотношения сигнал-шум при излучении ЧМ-сигнала ПНВА.

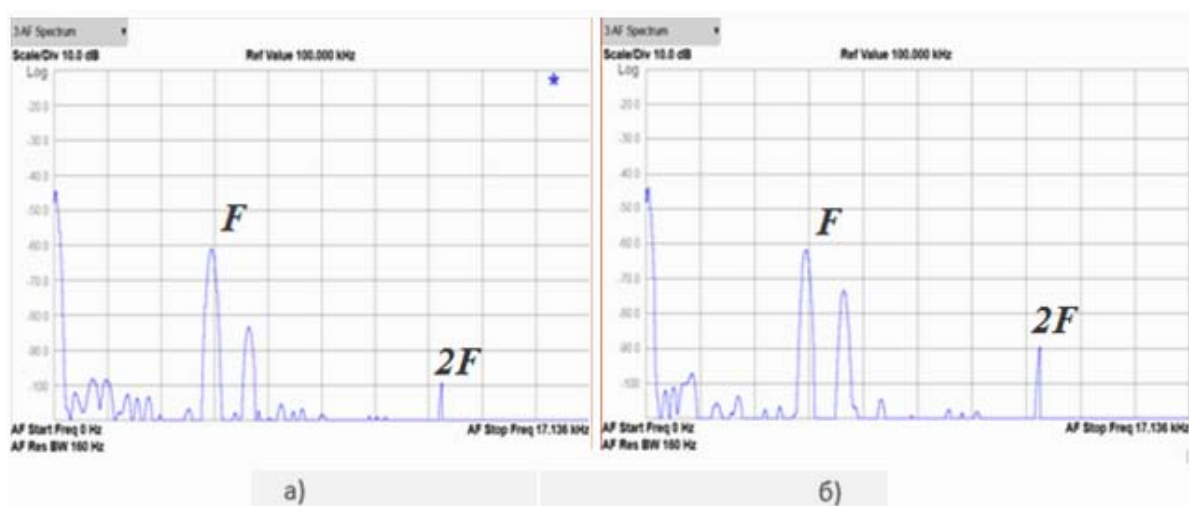


Рисунок 8. Спектр плотности мощности низкочастотного модулирующего колебания, излученного а) ПНВА и б) МНВА.

Таким образом, в рамках проведенного исследования излучения ЧМ-сигнала плазменной и металлической несимметричными вибраторными антеннами было показано, что модулированный сигнал, излучаемый плазменной антенной, не уступает по качеству сигналу от металлической антенны. Мощность нелинейных комбинационных частот в спектре ЧМ-сигнала ПНВА заметно ниже, чем в спектре сигнала, излучаемого МНВА. В спектре детектированного сигнала видно снижение спектральной плотности мощности на второй гармонике частоты модулирующего колебания для сигнала от плазменной антенны в сравнении с сигналом от металлической антенны [10а]. Из анализа экспериментальных данных нельзя сделать однозначного вывода о природе нелинейности ПНВА. Нелинейные искажения спектра сигнала могут быть обусловлены нелинейностью плазмы. Для оценки влияния характеристик плазмы на излучаемый сигнал при взаимодействии

электромагнитной волны с плазмой в параграфе 4.2 было проведено численное моделирование в коде КАРАТ с использованием PIC модели плазменной среды для трёх режимов работы ПНВА [7а,8а].

На рисунке 9 представлены модельные спектры компонент электрического поля E_z и E_r в ближней зоне ПНВА в трех режимах работы антенны, определенных по дисперсионной кривой: поверхностной электромагнитной волны, нелинейном и линейном.

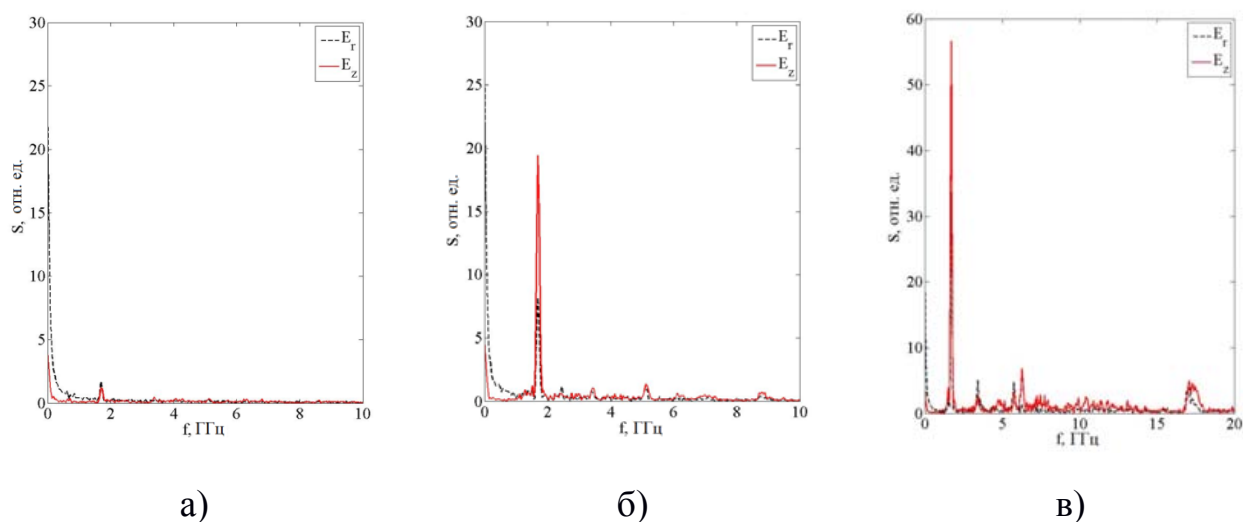


Рисунок 9. Модельные спектры E_z и E_r компонент сигнала в ближней волновой зоне ПНВА в различных режимах: а) поверхностной волны, б) нелинейном и в) линейном.

При подаче идеального моногармонического сигнала с частотой $f_0 = 1,7$ ГГц на антенну во всех режимах ее работы наблюдается наличие в спектре излучаемого сигнала гармоника на частоте $2 \cdot f_0$. Параметры плазмы в режиме поверхностной электромагнитной волны: плазменная частота $f_p = 2 \cdot f_0 = 3,4$ ГГц ($\omega_p = 2 \cdot \omega_0 = 2,14 \cdot 10^{10}$ рад/с), концентрация плазмы $n_e = 1,4 \cdot 10^{11}$ см⁻³. В ближней волновой зоне антенны (рисунок 9а) в спектре E_z и E_r есть низкочастотная шумовая составляющая, гармоника несущей частоты f_0 и гармоника ленгмюровской частоты f_p (вторая гармоника несущей частоты сигнала). Наибольшая амплитуда в спектрах компонент E_z и E_r в ближней зоне на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц. Для случая E_z амплитуда на основной гармонике в 5 раз больше, чем амплитуда постоянной составляющей и в 10 — чем на второй гармонике.

Для компоненты E_r амплитуда на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц в 1,5 раза больше, чем амплитуда постоянной составляющей и в 15 раз больше, чем амплитуда на частоте $f_p = f_0$. Следует отметить, что амплитуда компоненты E_r для основной гармоники и постоянной составляющей больше, чем амплитуда компоненты E_z . Для несимметричных вибраторных антенн E_r составляющая в направлении основного лепестка ДН (в данном случае вдоль оси r) при удалении от антенны достаточно быстро затухает, что хорошо согласуется с результатами моделирования (описание плазмы как среды с диэлектрической проницаемостью по модели Друде), описанными в параграфах 3.2 и 3.3.

Спектры компонент E_z и E_r в нелинейном режиме (плазменная частота $f_p = 5 \cdot f_0 = 8,5$ ГГц или $\omega_p = 5 \cdot \omega_0 = 5,35 \cdot 10^{10}$ рад/с, концентрация плазмы $n_e = 9 \cdot 10^{11}$ см⁻³) приведены на рисунке 9б. В спектре E_z и E_r амплитуда на несущей частоте f_0 больше амплитуды второй гармоники в 20 раз. Данный случай заметно отличается от режима поверхностной волны, так как видно увеличение сигнала на частоте излучаемой электромагнитной волны в ближней зоне.

Для линейного режима (плазменная частота $f_p = 10 \cdot f_0 = 17$ ГГц или $\omega_p = 10 \cdot \omega_0 = 1,1 \cdot 10^{11}$ рад/с, концентрация плазмы $n_e = 3,5 \cdot 10^{12}$ см⁻³) спектры компонент E_z и E_r представлены на рисунке 9в. В спектре E_z и E_r амплитуда на несущей частоте f_0 больше амплитуды второй гармоники почти в 100 раз [5а,7а,8а]. Один из возможных механизмов, объясняющих появление кратных гармоник в спектре излучения ПНВА, связан с колебаниями электронов в сильных электромагнитных полях СВЧ-диапазона частота (энергия осцилляций электрона в таких полях больше, чем потенциал ионизации атомов газа) [5]. Это явление может приводить к изменению распределения тока в антенне по её длине. Вторым возможным механизмом — процесс ионизации атомов, который сопровождается эффективной генерацией высоких гармоник электромагнитного поля [6].

Заключение

В диссертационной работе было проведено исследование режимов работы и излучения сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенны,

выполненной из газоразрядной трубки. Также исследовались характеристики излучаемого антенной сигнала и определялись параметры оптимального режима работы антенны. В рамках выполненных исследований были получены следующие **основные результаты**:

1. С помощью аналитических методов и численного моделирования по теории Друде выделены три режима работы плазменной несимметричной вибраторной антенны, определяемые по дисперсионному уравнению. Эти режимы зависят от соотношения частоты плазменной волны ω_p и частоты входной электромагнитной волны ω_0 . Режим стоячей поверхностной волны реализуется при $\omega_p \approx \sqrt{2} \cdot \omega_0$, нелинейный – при $\omega_p \approx 5 \cdot \omega_0$, линейный режим – при $\omega_p \geq 10 \cdot \omega_0$. При оптимальном режиме работы ПНВА (линейном) характеристики излучения ПНВА близки к МНВА.

2. В результате экспериментальных измерений диаграмм направленности ПНВА и МНВА получено совпадение направления основных и боковых лепестков ДН и различие в амплитудах ДН (у МНВА амплитуда больше чем у ПНВА).

3. Экспериментально обнаружено, что в линейном режиме в излучении ПНВА присутствуют спектральные составляющие на кратных гармониках входного сигнала с амплитудами отличными от излучения МНВА.

4. С помощью численной PIC-модели плазменной антенны обнаружены нелинейные искажения сигнала в трёх режимах работы, что подтверждается результатами эксперимента.

5. В результате исследования излучения ПНВА узкополосного частотно-модулированного сигнала показано, что в его спектре амплитуды нелинейных комбинационных частот ниже на $20,73 \pm 0,19$ дБ, чем в спектре сигнала, излучаемого металлической несимметричной вибраторной антенной. В спектре детектированного сигнала, излучаемого плазменной антенной, спектральная плотность мощности на второй гармонике частоты модулирующего колебания меньше на $8,35 \pm 0,19$ дБ, чем для сигнала металлической антенны.

Публикации автора по теме диссертации

Список публикаций в журналах из перечня ВАК:

- 1a. **Bogachev N.N.**, Bogdankevich I.L., Gusein-zade N.G., Tarakanov V.P. Computer simulation of a plasma vibrator antenna// Acta Polytechnica. – 2013. – Т. 53. – № 2. – С. 110-112. DOI: <https://doi.org/10.14311/1723>
- 2a. **Богачев Н.Н.**, Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г. Моделирование режимов работы плазменной антенны// Прикладная физика. – 2014. – № 4. – С. 30-34.
- 3a. **Bogachev N.N.**, Bogdankevich I.L., Gusein-Zade N.G., Sergeychev K.F. Operation modes and characteristics of a plasma dipole antenna// Acta Polytechnica. 2015. Т. 55. № 1. С. 34-38. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2015.55.0034>
- 4a. **Богачев Н.Н.**, Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Рухадзе А.А. Поверхностная волна и линейный режим работы плазменной антенны// Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 10. С. 860-866. DOI: 10.7868/S0367292115100030
- 5a. **Богачев Н.Н.**, Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г. Режимы работы плазменной антенны: теория и моделирование//Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 9-3. С. 65-69.
- 6a. **Богачев Н.Н.**, Сергейчев К.Ф. Влияние геометрических размеров и граничных условий на диаграмму направленности и КСВН четвертьволновой несимметричной вибраторной антенны// Инженерная физика. 2016. № 8. С. 74-83.
- 7a. **Богачев Н.Н.**, Андреев С.Е., Гончаров П.Ю. Сигнал плазменной вибраторной антенны в разных режимах работы//Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 9-3. – С. 60-64.
- 8a. **Bogachev N.N.** Simulation of a plasma antenna by PIC method// Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Т. 661. – № 1. – С. 012054.
- 9a. **Bogachev N.N.**, Bogdankevich I.L., Gusein-Zade N.G. Operation modes and signal spectra of plasma asymmetrical dipole antenna// 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – IEEE, 2016 – P. 1-4. DOI:10.1109/EuCAP.2016.7481512.
- 10a. **Богачев Н.**, Андреев С., Дёмин В., Гусейн-заде Н., Кириллов А., Калинин О., Филиппов А. Плазменная несимметричная вибраторная антенна: измерение характеристик сигналов// Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2018. – № 1 (172). – С. 88-91.
- 11a. **Богачев Н.Н.**, Гусейн-заде Н.Г., Нефедов В.И. Диаграмма направленности и спектр излучения плазменной несимметричной вибраторной антенны//Физика плазмы. – 2019. – Т. 45. – № 4. – С. 365-368.

Публикации в сборниках трудов и тезисов конференций

- 12a. Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л., Минаев И.М. Моделирование плазменной и металлической вибраторных антенн// Сборник трудов I-ой международной научно-практической конференция «Актуальные проблемы и перспективы

- развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» «Радиоинфоком - 2013», часть 2, Москва, март 2013, с. 270-274.
- 13а. Богачев Н.Н. Численные модели плазменного и металлического несимметричных четвертьволновых вибраторов с экранами конечных размеров// Сборник трудов V Всероссийской молодежной конференции «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики», Москва, ФИАН, 10-15 ноября 2013 г, с. 166.
- 14а. Богачев Н.Н. Моделирование плазменной и металлической вибраторных антенн FEM и FDTD методами// Доклады 1-ой Всероссийской Микроволновой конференции, Москва, 27-29 ноября 2013 г., с. 180-184
- 15а. Андреев С.Е., Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Нефедов В.И. Сигнал и оптимизация плазменной несимметричной вибраторной антенны// В сборнике: Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2017. Сборник научных трудов III Международной конференции. 2017. С. 157.
- 16а. Богачев Н.Н., Андреев С.Е., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Нефёдов В.И. Излучение сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной. В книге: Современные проблемы физики и технологий. тезисы докладов VI Международной молодежной научной школы-конференции, посвященной 75-летию НИЯУ МИФИ и 95-летию академика Н.Г. Басова. 2017. С. 157-158.
- 17а. Богачев Н.Н., Андреев С.Е., Дёмин В.А., Гусейн-заде Н.Г., Кириллов А.В., Калинин О.Н., Филиппов А.Н. Частотно-модулированный сигнал, излучаемый плазменной несимметричной вибраторной антенной// В сборнике: Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем. Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции. Московский технологический университет (МИРЭА). 2017. С. 458-463.
- 18а. Богачев Н.Н., Гусейн-заде Н.Г., Нефедов В.И. Диаграмма направленности и спектр излучения плазменной несимметричной вибраторной антенны// В книге: Современные средства диагностики плазмы и их применение. сборник тезисов докладов X Конференции. 2016. С. 25-28.
- 19а. Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Тараканов В.П. Численное моделирование приемной плазменной вибраторной антенны//Тезисы XXXIX Международной звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Москва, февраль 2012,с. 269
- 20а. Bogachev N.N., Bogdankevich I.L., Gusein-zade N.G., Tarakanov V.P. Computer simulation of a plasma vibrator antenna//25th Symposium on Plasma Physics and Technology, June 2012, Prague, Czech Republic, p. 99
- 21а. Bogachev N.N., Bogdankevich I. L., Gusein-zade N. G., Sergeichev K.F. Operation modes and characteristics of a plasma dipole antenna//27th Symposium on Plasma Physics and Technology, June 2014, Plasma physics and technology, V 1, No 2, Prague, CTU, 2014, p. 83-84.

Патент на изобретение

- 22а. Богачев Н.Н., Гусейн-заде Н.Г., Карфидов Д.М., Минаев И.М., Тараканова Е.Н., Сергейчев К.Ф., Трефилов А.Ю. Плазменная вибраторная антенна с

ионизацией поверхностной волной// Патент на изобретение RU 2544806 С1, 20.03.2015. Заявка № 2014106756/08 от 24.02.2014.

Список литературы

1. Андреев Н.Н., Володин К.С., ЭПР плазменных антенн//Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2009. – № 6. – С. 51-52.
2. Истомин Е. Н., Карфидов Д. М., Минаев И. М., Рухадзе А.А. и др. Плазменный несимметричный вибратор с возбуждением поверхностной волной //Физика плазмы. – 2006. – Т. 32. – №. 5. – С. 423-435.
3. Rayner J. P., Whichello A.P., Cheetham A.D. Physical characteristics of plasma antennas //IEEE Transactions on plasma science.–2004– Т. 32. – №. 1. – С. 269-281.
4. Belyaev V. A. et al. Nonlinear behavior of plasma antenna vibrator //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2014. – Т. 42. – №. 6. – С. 1552-1559.
5. Горбунов Л. М. Введение в электродинамику плазмы: Учебное пособие. – М.: Изд-во Ун-та дружбы народов, 1990. – 127 с.
6. Кузелев М. В., Омаров О. А., Рухадзе А. А. Микроволновой и оптический пробой газов и генерация гармоник поля//Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2012. – №. 1, С. 3-11.