

На правах рукописи



Лю Шухуа

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ И
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ АНТЕНН**

2.2.14 - Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель – **Андреев Юрий Анатольевич**,
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры физики ТУСУР

Официальные оппоненты – **Горбачев Анатолий Петрович**,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры радиоприемных и радиопередающих
устройств ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический университет»

Паньков Василий Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
и.о. заведующего кафедрой радиотехники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт электрофизики
Уральского отделения Российской академии
наук, г. Екатеринбург.

Защита состоится «17» марта 2026 г. в 11 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского
государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по
адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/4ncq6wfx>

Автореферат разослан _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор физико-математических наук



А. Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Если изучать генезис антенной техники, то становится понятным, что прародителями СШП антенн являются самые первые антенны, которые использовал в своих исследованиях Генрих Герц в 1886–1889 гг. Генрих Герц использовал в своих опытах катушку Румкорфа в качестве генератора импульсов высокого напряжения и симметричный вибратор с емкостными нагрузками в качестве передатчика. Он же предложил для излучателя зеркальную антенну. Оливер Лодж, английский пионер радиододела, изобрел биконические антенны. Похожая схема: импульсный генератор и проволочные приемные и передающие антенны были характерны для раннего этапа развития радио, который прекратился после изобретения Ли де Форестом трехэлектродной лампы в 1907 году и ламповых генераторов незатухающих колебаний австрийцем Александром Майснером и англичанином Генри Роундом в 1912 году.

В настоящее время огромный интерес к СШП технологиям и СШП антеннам очевиден. Достаточно взять любой выпуск журнала IEEE Transactions on antennas and propagation, чтобы увидеть публикации по СШП антеннам и компонентам. Начало текущего большого интереса к СШП технологиям было положено в конце 80х, начале 90х годов прошлого века. Тогда развитие СШП технологий шло за счет появления мощных источников СШП излучения. В качестве излучателей в таких источниках использовались различные варианты известных со времен Герца диполей и ТЕМ антенны. ТЕМ антенны или ТЕМ рупора являются развитием рупорных антенн, изобретенных пионером радио Джагадишем Чандра Боце (Jagadish Chandra Bose) в 1895-1897 гг. Лидерами этого направления были американские исследователи под руководством Карла Баума (Carl Baum). Постепенно к созданию мощных источников СШП излучения подключились исследователи из различных стран. В нашей стране (КНР) лидерами в данном направлении долгое время была группа Менга Фанбао (Meng Fanbao) из Меньяна. В настоящее время большую активность в исследовании СШП технологий проводит группа профессора Се Янжао (Xie Yanzhao) из Сианьского джиаотонг университета (XJTU).

Импульсная техника развивается вместе с развитием антенной техники. Появляются новые оригинальные конструкции антенн, предназначенные для использования в мощных источниках СШП излучения. В 1993 году американские исследователи К. Баум (Carl Baum) и Э. Фарр (Everett Farr) предложили конструкцию IRA (impulse radiating antenna). В 1996 году появляется первая публикация по комбинированной антенне. Разработкой и исследованием первого поколения комбинированных антенн занимался Юрий Иннокентьевич Буянов (ТГУ РФФ, г. Томск). Он же предложил идеи развития данной антенны (антенны второго поколения) - комбинированной антенны с расширенной полосой пропускания.

С началом работ по мощным источникам СШП излучения стало понятно, что разработанные в рамках традиционной (узкополосной) радиофизики термины и понятия в области антенной техники не всегда применимы как характеристики СШП антенн. Были нужны свои СШП характеристики. Эта работа была начата Карлом Баумом и Эвереттом Фарром (Everett Farr) в 90-е годы прошлого века и продолжается уже одним Эвереттом Фарром до настоящего времени. Кроме вышеперечисленных исследователей, можно отметить также американского исследователя доктора Ханса Шанца (Hans Schantz) и русских исследователей из ТГУ (г. Томск) доктора Юрия Буянова, профессора Виктора Беличенко и профессора Владимира Кошелева. Среди китайских исследователей несомненно необходимо назвать профессора Се Янжао и его группу. Активная работа данных исследователей и их групп продолжается в настоящее время.

Так как диссертация во многом посвящена именно определению понятий, характеристик свойственных для СШП антенн, то тема исследования безусловно является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Экспериментальные исследования характеристик антенн (в том числе и СШП антенн) традиционно проводятся в дальней зоне излучения. Математически дальняя зона для гармонического возбуждения антенны определяется формулой Фраунгофера $r_d \gg 2D^2/\lambda$, где r_d – расстояние от фазового центра антенны, D – максимальный габаритный размер антенны, а λ – длина волны. Как определить границу дальней зоны в случае импульсного возбуждения антенны? Можно пользоваться гармоническим приближением для верхней граничной частоты в спектре излучения СШП импульса и добавить требование $r_d \gg \lambda_n$, где λ_n – нижняя граничная частота. Однако появляются определения дальней зоны излучения специфичные именно для короткоимпульсного СШП. В том числе критерий $rE_p \approx \text{const}$, где E_p – пиковая напряженность электрического поля на расстоянии r от излучателя.

Главной характеристикой СШП антенн является их согласование с фидерным трактом. Комбинированные антенны Буянова имеют широкую полосу согласования за счет размещения в ближней зоне излучателя электрического типа излучателя магнитного типа. Тем не менее в мощных источниках СШП излучения передающую комбинированную антенну приходится адаптировать под имеющийся высоковольтный биполярный (чаще всего) импульс напряжения. Традиционно данная адаптация была связана только с масштабированием размеров комбинированных антенн, практически не изменяя их конструкцию.

Известна методика нахождения центра излучения (ЦИ) СШП антенны для фиксированного направления из анализа кривой $rE_p(r)$, где E_p – пиковое значение напряженности поля, а r – расстояние от приемной антенны до передающей. Однако, данная методика достаточно трудоемка и требует высокой точности поступательного перемещения антенн (приемной или

передающей) строго вдоль выбранного направления. Кроме того, методика накладывает строгие ограничения на приемную антенну. Так как требуется находить значения E_p в точках, вдоль прямой (от ближней до дальней зоны излучения), то для измерений нужен точечный датчик поля или антенна с минимальной эффективной поверхностью (длиной). В результате (при выполнении вышеуказанных условий) методика позволяет найти ЦИ, если заранее известна ось, на которой он расположен, если таких данных нет, можно получить недостоверный результат.

Цели и задачи исследований.

Исследование пространственно-временных и энергетических характеристик сверхширокополосных излучателей на базе элементарных и комбинированных антенн в режиме излучения сверхкоротких импульсов. Для достижения поставленных целей требуется решение следующих задач:

1. Выполнить численные расчёты пространственно-временного распределения электромагнитного поля излучения монополя и комбинированной СШП антенн применительно к ближней, промежуточной и дальней зонам.
2. Выявить настроечный (оптимизационный) параметр для верхней границы полосы согласования комбинированной СШП антенны.
3. Определить пространственное положение оси, вблизи которой находится центр излучения комбинированной СШП антенны.
4. Сформировать массив первичных данных для расчета положения центра излучения комбинированной СШП антенны в коде, основанном на методе конечных разностей во временной области (FDTD).
5. Провести взаимную верификацию результатов численного расчёта (п. 1) и данных эксперимента (п. 3).

Методы исследований

Работа совмещала численный и физический эксперимент. В численном эксперименте использовался код 4NEC2 для исследования характеристик комбинированных СШП антенн в частотной области. Данный свободно распространяющийся код использует ядро коммерческого кода NEC2 и использует метод моментов в численном решении уравнений поля для каждой точки пространства. Компьютерные программы, созданные на основе конечно-разностного метода, использовались в исследованиях зон излучения СШП антенн и характеристик излученного поля. В физическом эксперименте исследовались характеристики комбинированных антенн. В частотной области исследований использовались векторные анализаторы параметров цепей Agilent 87619ET и Agilent PNA N5227A компании Agilent Technologies (в настоящее время Keysight Technologies). Во временной области исследований использовались цифровые осциллографы реального времени TDS 6604 компании Tektronix и LeCroy Wave Master 830Zi-A компании LeCroy (в настоящее время Teledyne LeCroy).

На защиту выносятся следующие положения

1. Разработанный подход, основанный на идентичности временных форм E и H компонент импульсных электромагнитных полей передающих СШП антенн позволяет определять границу дальней зоны излучения с требуемой точностью, определяемой среднеквадратичным отклонением δ .

2. Разработанный механизм управления полосой согласования мощных комбинированных СШП антенн с фидерным трактом, позволяет настраивать полосу согласования в пределах от 4.9:1 до 8.7:1 по уровню КСВН ≤ 3 без изменения габаритных размеров и уменьшения электрической прочности.

3. Предложенная методика определения положения центров излучения комбинированной СШП антенны при ее возбуждении биполярными импульсами напряжения позволяет отдельно локализовать их для E - и H -плоскостей пространственного распределения поля с погрешностью не более 3% от габарита антенны.

Достоверность результатов

1. Достоверность **первого** защищаемого положения обеспечивалась сравнениями результатов тестовых расчетов с опубликованными расчётами выполненными другими группами исследователей.

2. Достоверность **второго** защищаемого положения обеспечивается расчетами с использованием двух независимых компьютерных программ, использующих различные методы: метод моментов и метод конечных разностей в временной области (FDTD). Кроме того, достоверность данного положения обеспечивается прямыми экспериментальными измерениями. Измерения проводились на векторных анализаторах цепей Agilent 87619ET и Agilent PNA N5227A компании Agilent Technologies, полоса рабочих частот которых существенно превышала область измерений. Измерения проводились по стандартным методикам, предусмотренным инструкциями к данному оборудованию.

3. Достоверность **третьего** защищаемого положения обеспечивается соответствием результатов, полученных в численном и физическом эксперименте. При этом использован FDTD код, созданный в ИРЭ РАН им. Котельникова, зарекомендовавший себя при расчете электродинамических структур. В эксперименте использовался осциллограф LeCroy Wave Master 830Zi-A с полосой частот 30 ГГц. Частота временных отсчетов в данном осциллографе составляет 80 Гсмплов/с, что обеспечивает длительность временного интервала между отсчетами равную 12.5 пс. Высокая частота семплирования, в свою очередь, обеспечивает разрешение по временным задержкам (опережениям) излученных СШП импульсов до 1 пс. А это в свою очередь обеспечивает пространственную локализацию центров излучения комбинированных антенн с точностью до 0.3 мм.

Научная новизна

1. Предложен критерий определения дальней зоны излучения СШП антенны, отличающийся от известного произвольным выбором точки наблюдения.

2. Впервые предложен метод настройки комбинированной СШП антенны, обеспечивающий как расширение, так и сужение ее полосы согласования.

3. Впервые предложена методика определения положения центров излучения комбинированных СШП антенн при возбуждении их биполярными импульсами напряжения наносекундной длительности.

Научная ценность

1-е положение. Предложено условие асимптотической изоморфности для временных форм компонент электрического E и магнитного H СШП полей при нахождении границы дальней зоны излучения, которое корректно соотносится с критерием $rE_p \approx \text{const}$, где r – расстояние до точки наблюдения, E_p – пиковая напряженность излученного антенной электрического поля.

3-е положение. Предложена теоретически обоснованная методика по измерению положения центров излучения СШП антенн в режиме излучения ими наносекундных импульсов.

Практическая значимость

1. Разработанный критерий определения дальней зоны излучения СШП антенн позволяет определять границу зоны в численных экспериментах для произвольной формы возбуждающего антенну импульса.

2. Разработан настроечный элемент, позволяющий как сужать, так и расширять полосу согласования СШП комбинированной антенны.

3. Разработанный настроечный элемент позволяет адаптировать антенну для использования в различных источниках СШП излучения с различными формами импульсов напряжения на выходе возбуждающего антенну генератора или даже использовать одну антенну в различных источниках мощного СШП излучения без дополнительной настройки.

4. Разработанная методика нахождения центра излучения комбинированной антенны позволяет упростить использование ее в качестве облучателя в зеркальной антенне.

5. Разработанная методика нахождения центра излучения комбинированной СШП антенны позволяет увеличить точность измерения ширины диаграммы направленности антенны.

Внедрение результатов работы

Разработанный критерий определения дальней зоны СШП антенны в режиме излучения импульсов наносекундной длительности внедрен в вычислительные исследования ближнего поля Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).;

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1-ая, 2-ая и 3-я Международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2006, 2008, 2010);

2-ой Международной конференции «Акустические и радиолокационные методы измерения и обработки информации» (Суздаль, 2007);

4-ой Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития» (Томск, 2007);

15-ом и 16-ом Международных симпозиумах по сильноточной электронике (Томск, 2008, 2010);

4-ой Всероссийской научно-практической конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2010).

2nd International conference on machine learning and computer application ICMLCA (Shenyang, China, 2021).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 13 печатных работ, из них 3 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, для публикации основных результатов диссертации; 4 статьи в журнале из перечня ВАК по смежной отрасли наук. Одна работа входит в Q1 Scopus и Web of Science.

Структура и объём диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. В работе содержится 120 листов машинописного текста, 97 рисунков. Список литературы содержит 90 наименований.

Личный вклад автора

Автору принадлежит ключевая роль в основных результатах работы. Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично или при непосредственном его участии. Экспериментальные исследования комбинированных антенн выполнялись автором вместе с Ю.А. Андреевым.

Обработка и анализ расчетных и экспериментальных данных, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с соавторами публикаций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и задачи исследования, сформулированы защищаемые положения, указана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. В исторической ретроспективе (от Г. Герца до наших дней) рассматриваются антенны, применяемые для излучения короткоимпульсных сигналов и источники мощных СШП-импульсов. Показано, что антенны, предложенные пионерами радио Генрихом Герцем, Оливером Лоджем, Джагадишем Босе до сих пор находят применение в мощных источниках СШП излучения. Рассматриваются ТЕМ антенны и IRA антенны, а также мощные источники СШП излучения использующие данные антенны в качестве излучателей. Показана особая роль

комбинированной антенны Юрия Иннокентьевича Буянова, как наиболее востребованной в мощных источниках СШП излучения в настоящее время в мире. В конце главы на основе проведенного анализа формулируются задачи исследования.

Вторая глава содержит методический материал. Изложена информация по программным продуктам (4NEC2 и FDTD) использовавшимся в работе. Код 4NEC2 является оболочкой, работающей на ядре NEC2. Код NEC2 в свою очередь много лет является стандартом в расчетах антенн. Для кода FDTD проводилось сравнение результатов расчета характеристик антенн с ранее опубликованными. Приведены краткие характеристики векторных анализаторов цепей и конкретных моделей (Agilent 87619ET и Agilent N5227A) использовавшихся для исследования характеристик СШП-антенн в частотной области. Приведены краткие характеристики цифровых осциллографов реального времени и конкретных моделей (Tektronix TDS 6604 и LeCroy Wave Master 830Zi) использовавшихся для исследования характеристик СШП-антенн во временной области.

Показано, что контрольно-измерительное оборудование, программные продукты позволяют в полной мере исследовать интересные нас характеристики СШП антенн.

В третьей главе проводится анализ зон излучения СШП излучателей. На основе анализа распределения потоков энергии и временных форм компонентов излученного электромагнитного поля вокруг канонических излучателей показаны особенности образования ближней и дальней зон излучения в случае гармонического и импульсного возбуждения антенны.

Известно, что у антенн малых размеров, возбуждаемых гармоническими колебаниями, в зависимости от расстояния r различают зоны: ближнюю ($kr \ll 1$), промежуточную ($kr \approx 1$) и дальнюю ($kr \gg 1$), где $k = 2\pi/\lambda$, а λ – длина волны излучения. Кроме того, в ближней зоне антенны для синусоидальных колебаний разность фаз между электрической и магнитной компонентами поля равна $\pi/2$, а в дальней зоне она равна нулю. Для определения границ зон СШП излучения широко используется критерий $rE_p \approx \text{const}$, где E_p – пиковая напряженность электрического поля на расстоянии r от излучателя.

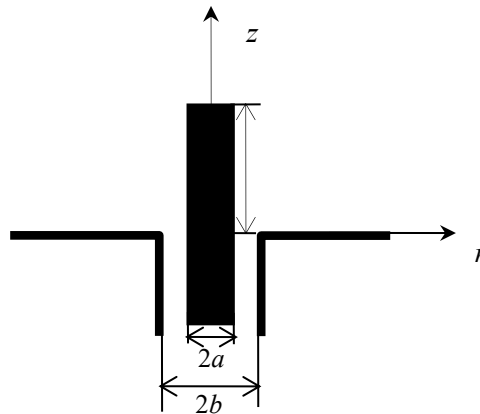


Рисунок 1 - Геометрия задачи

Геометрия модели аксиально-симметричного излучателя (монополя) приведена на Рисунке 1. В исследовании использовалась программа на основе FDTD. Параметры модели: $a = 1$ мм, $b = 2.5$ мм, $L = 10$ мм. При моделировании использовались гауссов импульс $V(t) = V_0 \exp(-0.5(t/\tau_c)^2)$ (монополярный импульс), дифференцированный гауссов импульс $V(t) = -V_0(t/\tau_c) \exp(-0.5(t/\tau_c)^2 - 0.5)$ (биполярный импульс) и гармонический сигнал $V(t) = V_0 a(t) \sin(\omega t)$. Здесь V_0 – амплитуда импульса, $a(t)$ – профильная функция, изменяющаяся в пределах от нуля до единицы, τ_c – характеристическая длительность гауссова импульса. При этом длительность гауссова импульса по основанию $\tau_p = 8\tau_c$. Шаг сетки выбирался с учетом выполнения условия Куранта

$$c\Delta t \leq \sqrt{\frac{\Delta r^2 \Delta z^2}{\Delta r^2 + \Delta z^2}},$$

где c – скорость света в свободном пространстве. Во всех расчетах величина шага сетки равнялась 0.25 мм. Выбор монополярного и биполярного возбуждающих импульсов был сделан исходя из широкой практики применения таких импульсов в мощных источниках СШП излучения.

Для оценки границ зон СШП излучения будем использовать условия максимального (ближняя зона) и минимального (дальняя зона) различия временных зависимостей компонент электромагнитного поля E_z и H_ϕ (Рисунок 2). Для количественной оценки различия между компонентами поля используется среднеквадратическое отклонение, вычисляемое по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{zi} - H_{\phi i})^2}{\sum_{i=1}^N H_{\phi i}^2}},$$

где N длина ряда, представляющего исследуемую функцию во временной области с шагом дискретизации 0.833 пс. Зависимость σ от расстояния для возбуждающих монополярного импульса длительностью 0.167 нс и биполярного импульса длительностью 0.333 нс приведены на Рисунок 3 (кривая 2) и Рисунок 4 (кривая 1), соответственно.

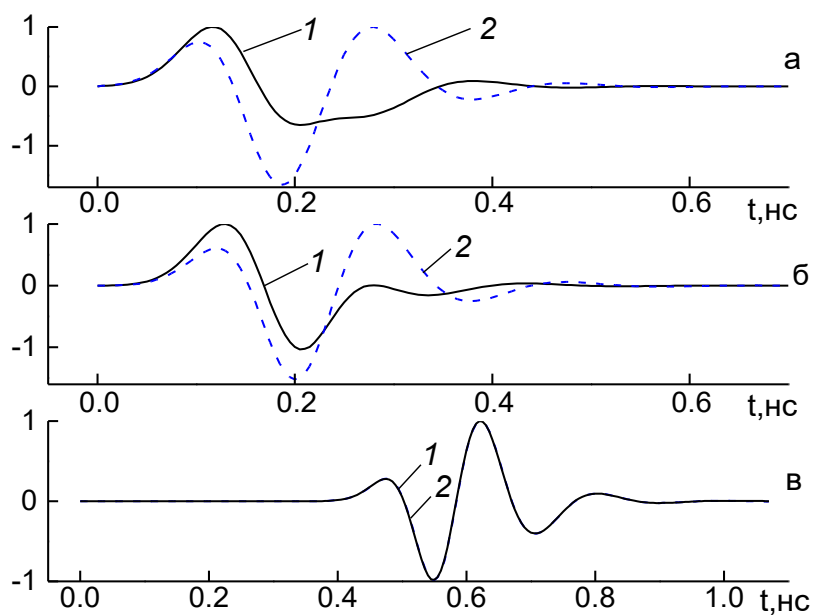


Рисунок 2 – Временные зависимости компонент поля E_z (кривые 1) и H_ϕ (кривые 2) для возбуждающего биполярного импульса длительностью 0.333 нс на расстояниях $r = 2$ мм (а), 6 мм (б), 120 мм (в)

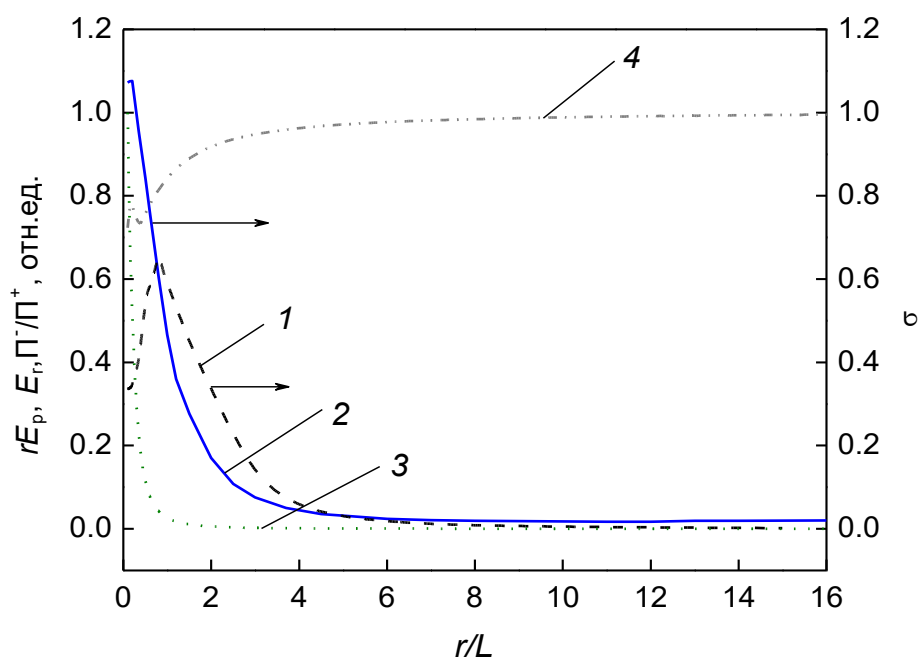


Рисунок 3 – Зависимости Π/Π^+ (1), σ (2), E_r (3) и rE_r (4) от расстояния для монополярного импульса длительностью 0.167 нс

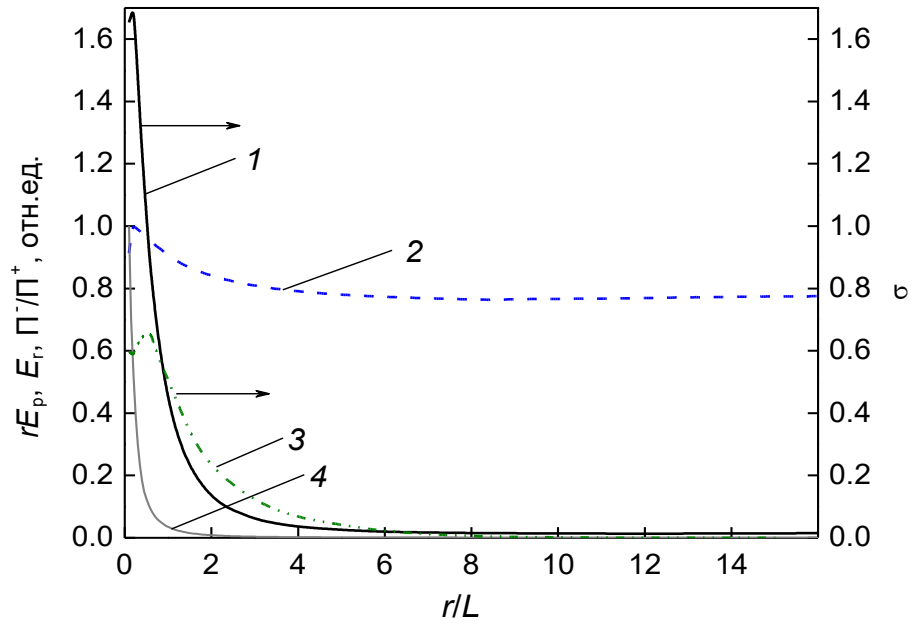


Рисунок 4 – Зависимости σ (1), rE_p (2), Π^-/Π^+ (3) и E_r (4) от расстояния для биполярного импульса длительностью 0.333 нс

На Рисунках 3, 4 также приведены зависимости отношения радиальной компоненты вектора Пойнтинга в обратном и прямом направлениях Π^-/Π^+ , напряженности радиальной компоненты электрического поля E_r и эффективного потенциала rE_p от расстояния в главном направлении диаграммы направленности (ДН).

Данные исследования проводились для различных длительностей монополярных и биполярных возбуждающих импульсов. В соответствии с критерием $\sigma = \sigma_{\max}$ граница ближней зоны соответствует $r/L \approx 0.2$ и практически не зависит от длительности импульса. Расчеты показали, граница ближней зоны ($\sigma = \sigma_{\max}$) при возбуждении излучателя биполярными импульсами находится на тех же расстояниях ($r/L \approx 0.2$), что и для монополярных, длительность которых была в два раза меньше биполярных.

Для определения границы дальней зоны при возбуждении излучателя монополярными и биполярными импульсами одновременно использовались критерии $rE_p \approx \text{const}$ и $\sigma \approx 0$. Зависимость положения границы дальней зоны от отношения длины излучателя к пространственной протяженности возбуждающих биполярных (кривая 1) и монополярных (кривая 2) импульсов показана на Рисунке 5. Отметим, что при малых длительностях импульсов границы дальней зоны совпадают для монополярного импульса и в два раза большего по длительности биполярного импульса. С увеличением длительности импульсов совпадение границ дальней зоны реализуется при отношении длительности биполярного импульса к монополярному меньше двух. Для монополярного импульса расчеты показали, что критерий дальней зоны ($E_p R = \text{const}$) выполняется на расстоянии $R = 2\tau_u c$. При $R = 2\tau_u c$ величина $E_p R$ уменьшается примерно на 1%, а σ составляет примерно 3% относительно дальней зоны.

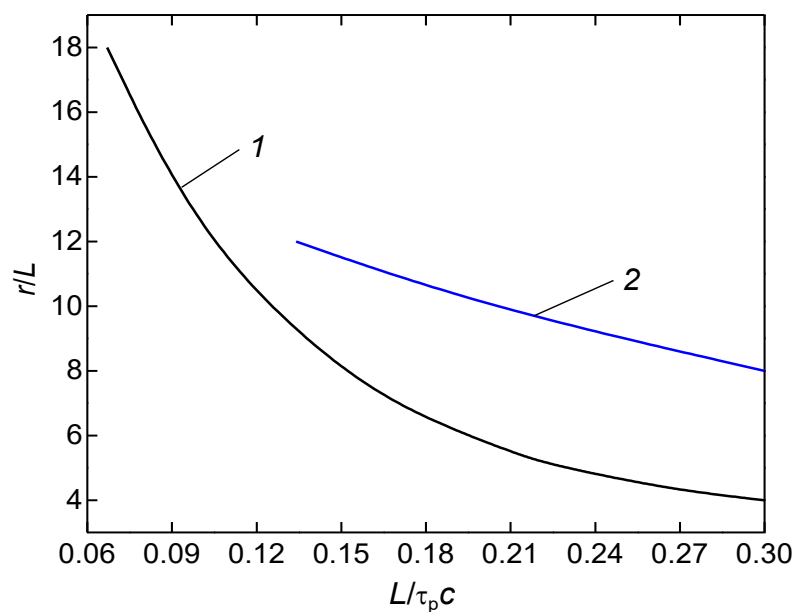
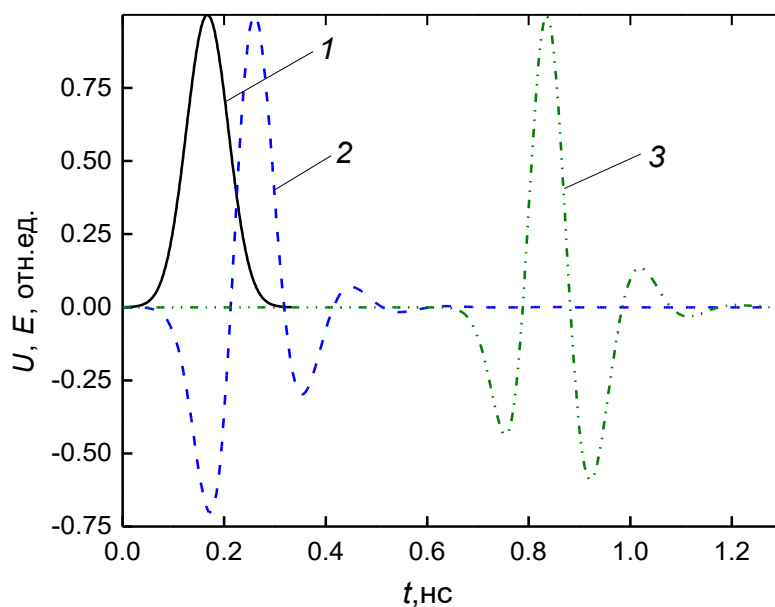


Рисунок 5 – Зависимость границы дальней зоны от отношения длины излучателя к пространственной протяженности биполярных (1) и монополярных (2) импульсов

На Рисунке 6 приведены нормированные временные зависимости для возбуждающего гауссова импульса длительностью $\tau_u = 0.333$ нс (кривая 1), а также соответствующие этому импульсу напряженности электрического поля в области границы ближней зоны (кривая 2) и в дальней зоне (кривая 3) для главного направления диаграммы $\theta = 90^\circ$.



Рисунке 6 - Импульсы напряжения (1) и напряженности поля для $r = 10$ мм (2) и $r = 200$ мм (3)

В четвертой главе численно и натурно исследована возможность настройки верхней граничной полосы согласования комбинированных антенн. Геометрия комбинированной антенны представлена на Рисунке 7а. Данные антенны можно рассматривать как комбинацию излучателя электрического типа, выполненного в виде ТЕМ-рупора с одним активным и двумя пассивными магнитными диполями. Антенный вход представляет собой переход с коаксиальной линии на две полосковые линии. Нижняя полосковая линия запитывает ТЕМ-рупор, а верхняя, запитывает активный магнитный диполь. Полная длина линий равна h (Рисунок 7а). На первом этапе исследования была выбрана антенна со следующими размерами: продольный $L = 31.5$ см, высота $H = 30$ см и ширина антенны $W = 30$ см. Длина $h = 4$ см. Данная антенна оптимизирована для излучения биполярных импульсов напряжения длительностью 2 нс. Назовем данную антенну А2.

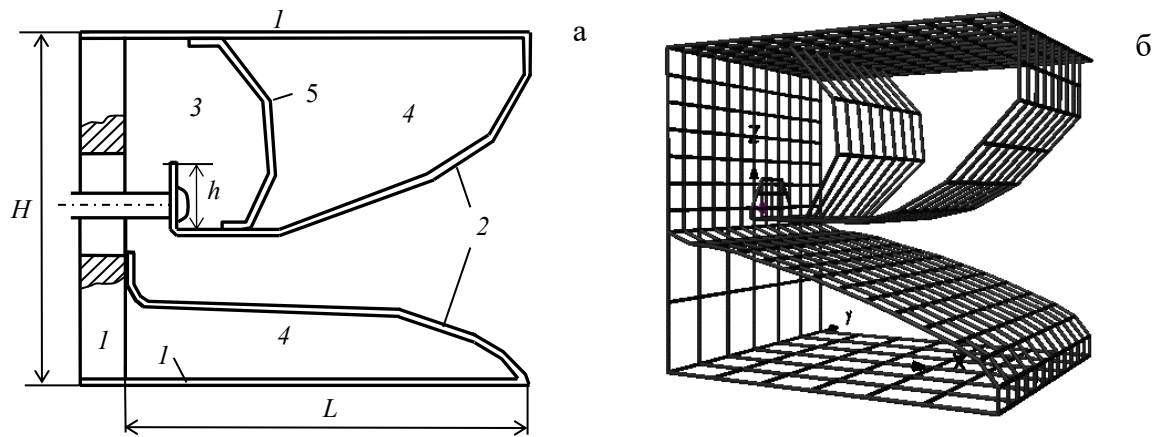


Рисунок 7 – Конструкция (а) и проволочная модель (б) комбинированной СШП-антенны А2: 1 – корпус, 2 – ТЕМ-рупор, 3 – активный магнитный диполь, 4 – пассивный магнитный диполь, 5 - дополнительный электрод

В качестве объектов исследования были выбраны низковольтные варианты комбинированных антенн, которые отличались от высоковольтных только использованием входного радиочастотного разъема N-типа (Рисунок 8).

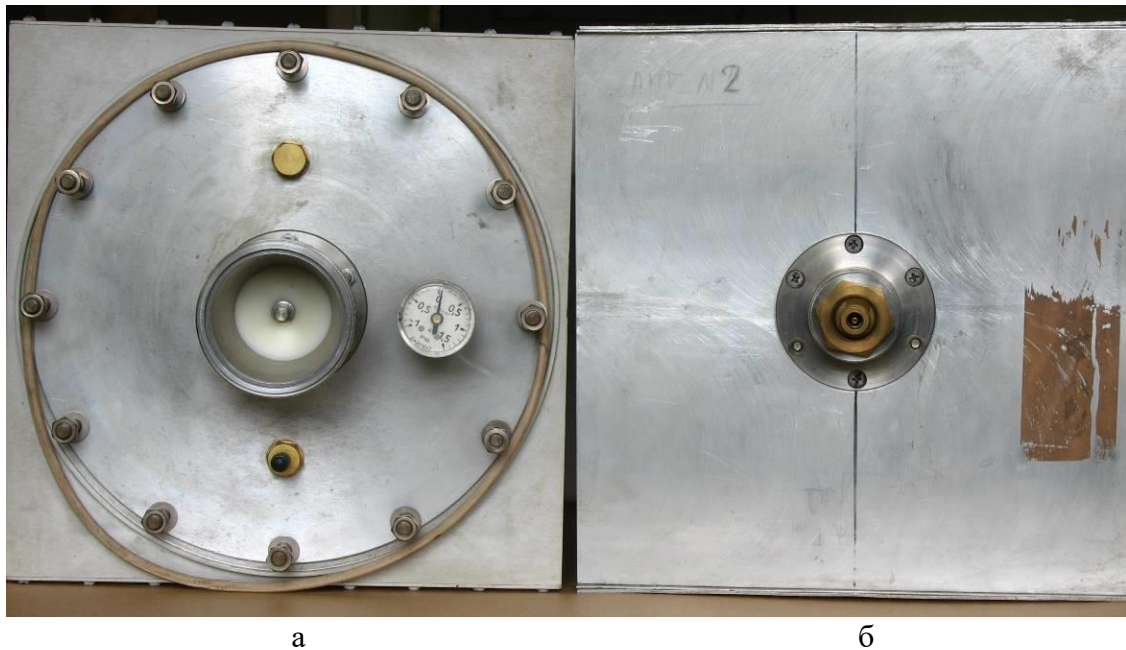


Рисунок 8 – Отличия входной части мощной комбинированной антенны (а) и антенны А2 (б)

В качестве параметра, определяющего согласование антенны с фидерным трактом, использовался КСВН. Были проведены как численные исследования согласования комбинированной антенны с фидерным трактом, так и физические эксперименты. Для проведения численных исследований использовалась программа 4NEC2. Проволочная численная модель антенны А2 (Рисунок 7б) имела те же размеры и была выполнена из алюминиевых цилиндрических проволочек радиусом 1 мм. В физических экспериментах для измерения КСВН комбинированных антенн использовался измеритель комплексных коэффициентов передачи Agilent 87619ЕТ с полосой рабочих частот 0.05-13.5 ГГц.

Исследовалось влияние размеров коаксиально полоскового перехода h на согласование антенны с фидером. Зависимости КСВН от частоты проволочной модели и прототипа комбинированной антенны для значений $h = 4, 2, 6$ см приведены на Рисунке 9а, б и в, соответственно. Как видно из приведенных графиков, имеет место качественное соответствие результатов численного расчета и физического эксперимента в области нижних и средних частот. В области высоких частот данные, полученные для проволочной модели, оказываются сдвинутыми в сторону нижних частот по сравнению с данными физического эксперимента. Это связано, вероятно, как с ограничениями кода 4NEC2, так и с различием в возбуждении реальной антенны и проволочной модели.

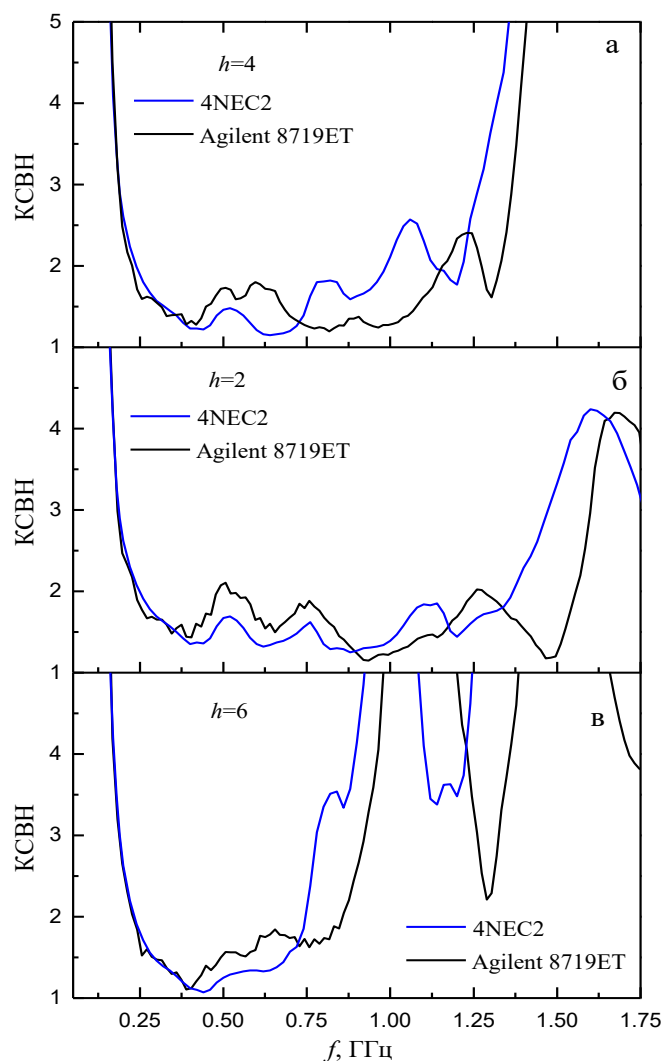


Рисунок 9 – Зависимость КСВН комбинированных антенн от частоты

Из приведенных графиков (Рисунок 9) видно, что был найден настроечный элемент верхней граничной частоты полосы согласования А2. Для реальной А2 полоса частот, соответствующая $\text{КСВН} \leq 2$, составляет 5:1 и 7.3:1 по уровню $\text{КСВН} \leq 3$. Данную полосу можно существенно расширить, уменьшив размер h до 2 см (см. Рисунок 9б). В этом случае полосы согласования антенны по уровню $\text{КСВН} \leq 2$ и 3 равняются 6.5:1 (за исключением небольших участков) и 8.7:1 соответственно. Ширину полосы согласования можно уменьшить, увеличив размер h . При $h = 6$ см (Рисунок 9в) соответствующие полосы согласования равны 3.6:1 и 4.9:1.

Аналогичные исследования были выполнены и для комбинированной антенны А1, оптимизированной для излучения биполярных импульсов напряжения длительностью 1 нс. Геометрия антенны аналогична представленной на Рисунке 1. Продольный размер антенны $L = 16$ см, высота $H = 15$ см и ширина антенны – 15 см. Входом А1 являлся стандартный радиочастотный разъем N-типа, установленный в середине задней стенки. Данная антенна также являлась низковольтным аналогом мощной комбинированной антенны.

С помощью созданной проволочной модели А1 были исследованы ее КСВН и ДН в полосе частот 0.3...1.8 ГГц. ДН антенны и модели хорошо совпадают в данном диапазоне частот и только на краях имеются заметные различия. На Рисунке 10 приведены зависимости КСВН комбинированной антенны и проволочной модели от частоты. Как видно из приведенных графиков, имеет место качественное соответствие результатов численного расчета и эксперимента. Наибольшие отличия результатов наблюдаются в области низких и высоких частот (Рисунок 10), что согласуется с результатами измерений ДН на фиксированных частотах.

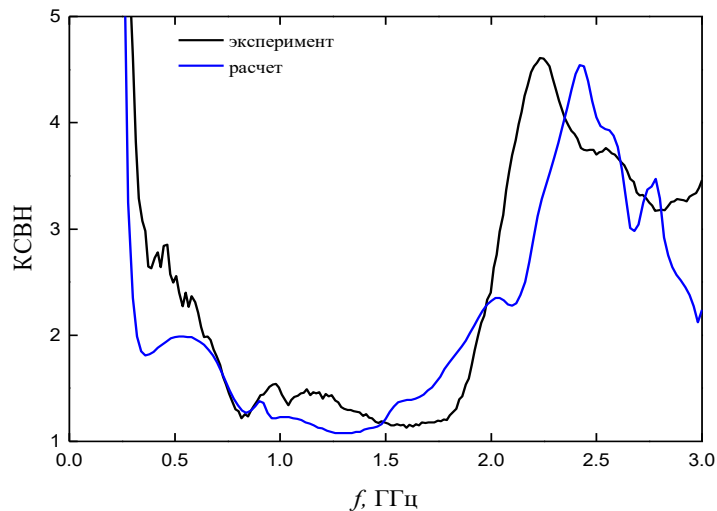


Рисунок 10 – КСВН антенны А1 и ее проволочной модели

Использование кода FDTD позволило существенно повысить точность численных расчетов. Расчеты в FDTD не только качественно, но и количественно повторяют (за исключением области 2-2.5 ГГц) полученный в эксперименте КСВН А1 (Рисунок 11). Кроме того, код позволяет рассчитывать характеристики антенн во временной области, что невозможно с использованием кода 4NEC2. Об этих исследованиях будет рассказано в главе 5.

Проверка метода расширения полосы согласования была исследована в коде FDTD для модификации А1М с уменьшенным на 5 мм h (Рисунок 12). Изменение высоты h не сказывается на согласовании антенны с фидером в области низких частот (Рисунок 12). Имеет место незначительное увеличение (до уровня КСВН = 1.7) в области средних частот и существенное улучшение согласования в области высоких частот. Так верхняя граничная частота, соответствующая уровню КСВН = 2 изменилась в расчете с $f_h = 1.95$ ГГц до $f_h = 2.17$ ГГц, т.е увеличилась на 11%.

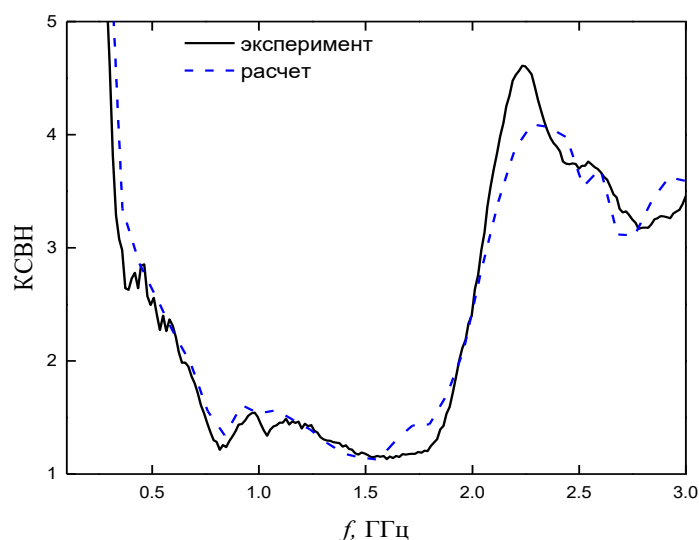


Рисунок 11 – KСВН антенны A1 и модели в коде FDTD

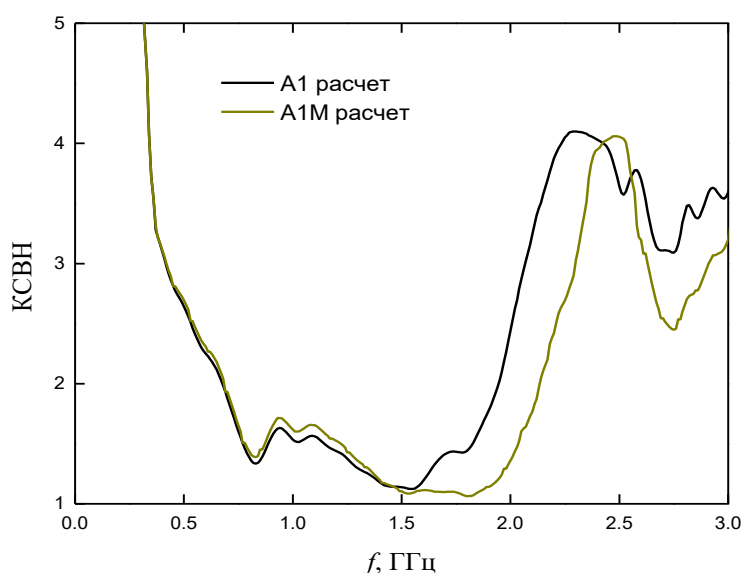


Рисунок 12 – Расчетные KСВН базовой A1 и модернизированной A1M в коде FDTD

Кроме того, в четвертой главе рассказывается о использовании комбинированных антенн в мощных источниках СШП излучения и применении предложенного механизма настройки согласования мощных излучающих антенн для данных источников.

В пятой главе представлена методика нахождения центра излучения (ЦИ) комбинированной антенны в режиме импульсного излучения. Под ЦИ будем понимать аналог фазового центра антенны для случая импульсного СШП излучения. ЦИ антенны – это точка в излучающей системе, относительно которой в данный момент времени поверхности на которых фиксируется появление излученного СШП импульса в дальней зоне являются сферами. Для реальных СШП антенн ЦИ для всех возможных φ и δ (φ - азимутальный угол, а δ - угол места), не существует. В этом случае можно пытаться найти часть сферической поверхности одновременного прихода

излученных СШП импульсов в наиболее широком диапазоне углов и соответствующую ему точку – *частичный центр излучения*. Максимальный интерес представляет нахождение частичного центра излучения для главного лепестка ДН.

В качестве объекта исследования были выбраны А1 и А2 (те же, что и в Главе 4). Геометрия комбинированной антенны представлена на Рисунке 13. Рисунок 13 повторяет Рисунок 7а, но на нем нанесена система координат, связанная с антенной (значению $y = 0$, соответствует плоскость, проходящая горизонтально через ось симметрии антенного входа). Антенны исследовались в режиме излучения. В ходе экспериментов А1 возбуждалась биполярными импульсами длительностью 1 нс, а А2 биполярными импульсами длительностью 2 нс. Для регистрации излученных импульсов использовалась приемная антенна в виде половины ТЕМ рупора. Для регистрации импульсов с выхода приемной антенны использовался осциллограф LeCroy Wave Master 830Zi-A с полосой частот 30 ГГц. Излучение А1 и А2 линейно поляризовано. В исследованиях нас интересовала только E_θ компонента электрического поля, где θ – зенитный угол.

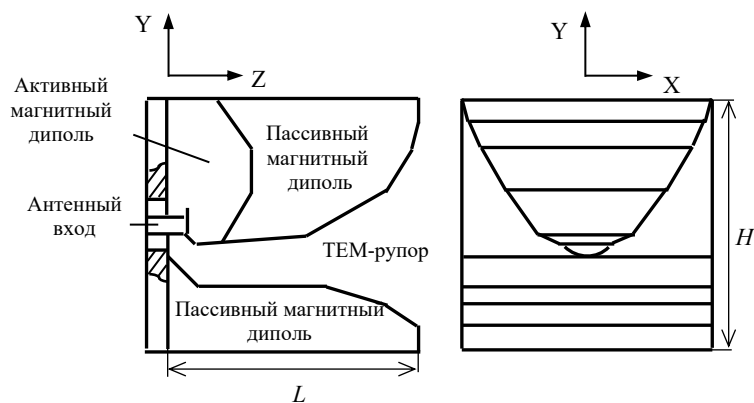


Рисунок 13 – Геометрия комбинированной антенны

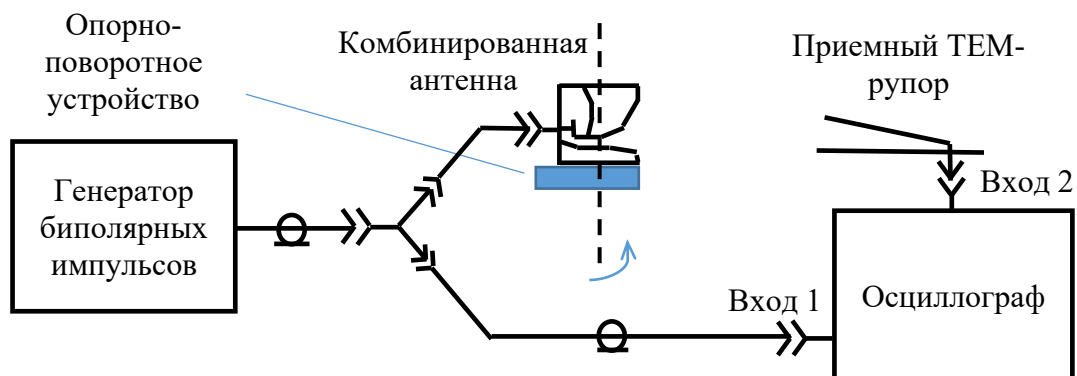


Рисунок 14 – Схема эксперимента

Для экспериментального определения положения ЦИ СШП антенны в режиме импульсного возбуждения предложена схема (Рисунок 14). Антенны вращались в горизонтальной плоскости. Биполярный импульс от генератора

через симметричный тройник подавался на передающую антенну и на запуск осциллографа (Вход 1, Рисунок 14). Таким образом, временная шкала в ходе измерений была фиксирована. Для уменьшения влияния временного джиттера сигнала генератора и зарегистрированного с приемной антенны (Вход 2, рисунок 14), осциллограф работал в режиме усреднения по 100 импульсам. Частота повторения импульсов генератора составляла 1.5 кГц.

ЦИ антенн находился для двух перпендикулярных плоскостей: горизонтальной (H -плоскость) и вертикальной (E -плоскость). Комбинированные антенны обладают вертикальной плоскостью симметричная, поэтому логично полагать, что ЦИ находится в этой плоскости. Будем искать ЦИ антенн для H -плоскости, выбирая в качестве оси вращения прямую, параллельную оси Y (см. Рисунок 13) и лежащую в вертикальной плоскости симметрии антенны ($x = 0$ см).

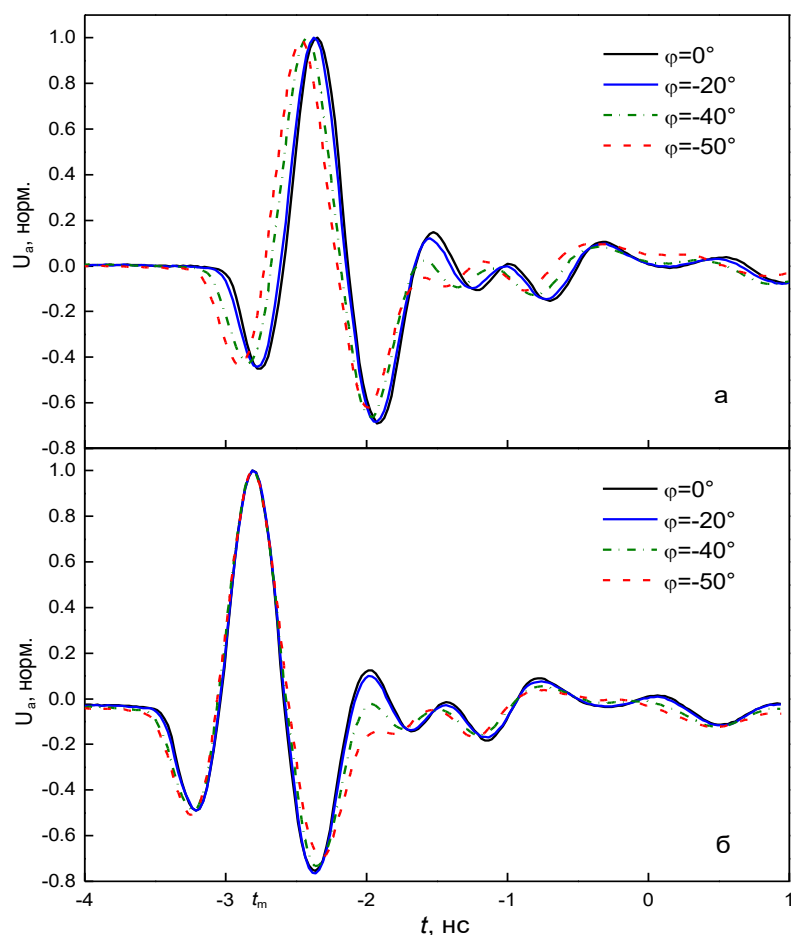


Рисунок 15 – Нормированные осциллограммы излученных А1 импульсов для различных азимутальных углов. А1 вращалась относительно оси, проходящей через (а) апертуру $z = 16$ см и (б) $z = 6$ см

Рассмотрим нормированные осциллограммы излученных А1 импульсов в H -плоскости, при ее вращении относительно оси расположенной в плоскости апертуры антенны ($z = 16$ см, Рисунок 13).

Как видно из Рисунка 15а, при повороте А1 (как в область отрицательных азимутальных углов φ (Рисунок 15а), так и в область положительных углов) излученный импульс регистрируется антенной тем

раньше, чем больше угол поворота φ . Следовательно, ЦИ А1 в H -плоскости смещен на некоторое расстояние Δz от плоскости апертуры к задней стенке антенны. Перемещая ось вращения А1 по направлению к задней стенке и регистрируя излученные импульсы для различных φ , мы сможем найти такое Δz , что смещения по времени положения выделенной временной точки волновой формы излученного импульса будет минимальным для максимально большого диапазона $\pm\varphi$ (рисунок 15б). Под выделенной точкой волновой формы для излученного импульса А1 логично понимать точку, соответствующую максимуму модуля напряжения с выхода приемной антенны $|U_a|_{\max}$ или, что тоже самое, пиковому значению U_{ap} . Заметим, что для приемной ТЕМ антенны $U_a(t)$ ($U_a(t)$ – зависимость от времени напряжения на выходе приемного ТЕМ рупора) пропорционально $E(t)$ и U_{ap} будет пропорционально E_p .

Экспериментальные временные задержки Δt прихода излученных А1 импульсов в H -плоскости для различных углов наблюдения и для различных положений оси вращения представлены на Рисунке 16. Здесь представлены графики задержек для положения оси в плоскости апертуры ($z = 16$ см), $z = 12$ см и со сдвигом к задней плоскости на 10 см ($z = 6$ см). Как следует из Рисунка 16 при оси вращения проходящей через точки с координатами $z = 16$ и $z = 12$ см отклонение угла поворота от значения $\varphi = 0^\circ$ приводит к появлению отрицательных задержек. Если ось вращения антенны находится на расстоянии $z = 6$ см, то в диапазоне углов $\varphi \leq \pm 80^\circ$ временные задержки $\Delta t \leq \pm 14$ пс и следовательно ЦИ локализован в области оси вращения с максимальным уходом от нее на 4 мм. В экспериментальных исследованиях мы определили две координаты ЦИ А1 в H -плоскости: $z = 6$ см и $x = 0$ см. Координата по оси Y находилась в численных расчетах.

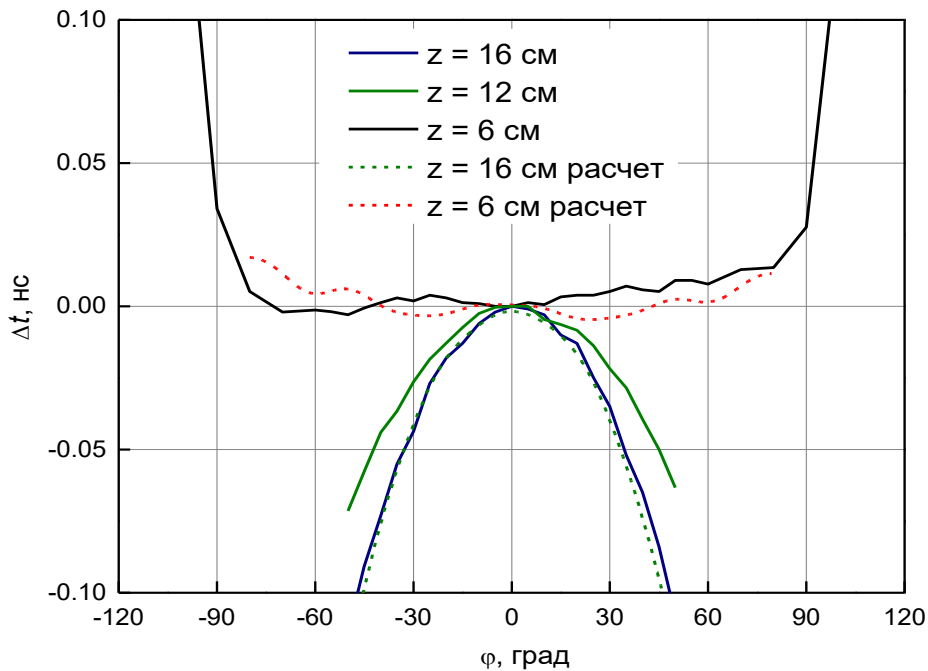


Рисунок 16 – Временные задержки прихода излученных А1 импульсов для H -плоскости относительно времени прихода в прямом направлении ($\varphi = 0$)

В расчетах модельную антенну возбуждали биполярным импульсом напряжения, соответствующим по форме экспериментальному. Напряженность электрического поля E находилась на расстоянии 2 м от точки отсчета координатной системы. Расчеты проводились на дугах в E - и H -плоскостях для диапазона углов $\pm 100^\circ$. Точка отсчета координатной системы обеспечивающая минимальные временные задержки Δt в максимальном диапазоне углов рассматривается как ЦИ. Величину E_p определяли из прямого расчета, но из-за дискретного представления пространства и времени в численной схеме расчетный график получается изрезанным и он был сглажен БПФ фильтром.

На Рисунке 16 представлены расчетные зависимости временных задержек для выбранных точек отсчета ($x = 0$ см, $y = 0$ см, $z = 16$ см) и ($x = 0$ см, $y = 0$ см, $z = 6$ см). Расчетные графики практически совпадают с экспериментальными. Расчет позволяет уточнить положение ЦИ А1 по оси Y . Он сдвинут к верхнему лепестку ТЕМ-рупора. Координаты ЦИ ($x = 0$ см, $y = -0.5$ см, $z = 6$ см). Данный ЦИ обозначен областью 1 на Рисунке 17.

Аналогичные измерения и расчеты были выполнены для E -плоскости. В расчете было получено положение ЦИ А1 для СШП импульсов, излученных в E -плоскости: ($x = 0$ см, $y = -1$ см, $z = 16$ см). Из измерений следует, что для E -плоскости в диапазон углов места $\delta \leq \pm 90^\circ$ временные задержки (опережения) $\Delta t \leq \pm 17$ пс и следовательно центр излучения локализован в области вокруг точки с координатами $z = 16$ см; $y = -1$ см; $x = 0$ см с максимальным уходом от нее на 5 мм. Данный ЦИ обозначен областью 2 на Рисунке 17.

Аналогичные результаты были получены для антенны А2, возбуждаемой биполярными импульсами длительностью 2 нс. В результате исследований мы доказали, что комбинированные антенны в режиме возбуждения биполярными импульсами напряжения имеют два центра излучения (Рисунок 17), что совпадает с выводами других исследователей для рупорных антенн с углом раскрыва более 10° .

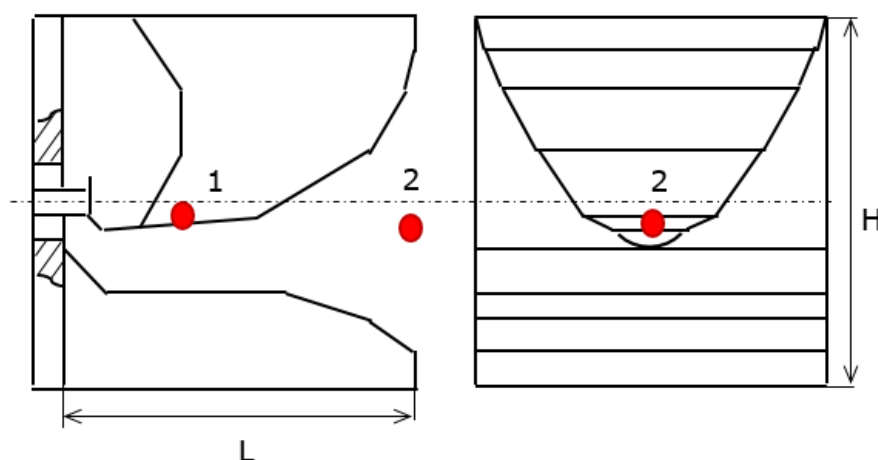


Рисунок 17 – Схематическое изображение первого и второго центров излучения А1

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Численные исследования СШП антенн позволили уточнить понятия зон излучения для антенн, излучающих короткие импульсы. Численное и в физическом эксперименте исследование комбинированных антенн позволило найти механизм настройки полосы согласования и центры излучения данных антенн.

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Показано, что при переходе от возбуждающего комбинированную антенну биполярного импульса длительностью 2 нс к длительности 3 нс и соответственно увеличении размеров антенны в 1.5 раза максимум ДН по пиковой мощности в Е-плоскости смещается от $\delta = 7^\circ$ до $\delta = 3^\circ$. Это несомненно связано с тем, что для увеличенной в размерах антенны ее ТЕМ рупор стал более симметричным в вертикальной плоскости.

2. Показано, что для точного измерения ДН комбинированных антенн работающих в режиме излучения СШП импульсов в условиях ограниченного пространства безэховых камер, необходимо вращать их на поворотном устройстве относительно осей, проходящих через лекальные области определяемые как центры излучения.

3. Показано, что методика нахождения центра излучения комбинированной антенны из анализа $rE_p(r)$ дает в лучшем случае усредненные результаты. Она не позволяет различить различные центры излучения в объеме антенны.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, соответствующие перечню периодических изданий, рекомендуемых ВАК

1. Андреев Ю.А., Корниенко В.Н., Лю Ш. Оптимизация мощной сверхширокополосной комбинированной антенны // РЭ – 2017 – Т. 62. № 9. – С. 882-889. DOI: 10.7868/S0033849417080010.
2. Yury Andreev, Vladimir Kornienko, Shuhua Liu. Method for radiation center position measurements of a combined antenna in the pulsed mode // IEEE Trans. Antennas Propag. – Aug. 2018 – vol. 66, no. 8. – pp. 4269–4276. DOI: 10.1109/TAP.2018.2839888
3. Лю Ш., Андреев Ю.А., Беличенко В.П. О двух центрах излучения в комбинированной сверхширокополосной антенне // Доклады ТУСУР – 2025 – Т. 28. № 7. – С. 33-37. DOI: 10.21293/1818-0442-202428—1-33-38.

Статьи, соответствующие перечню периодических изданий, рекомендуемых ВАК по смежной отрасли наук

1. Кошелев В.И., Петкун А.А., Лю Ш. Численное моделирование сверхширокополосных излучателей с аксиальной симметрией // Известия вузов. Физика. – 2006. – Т. 49. № 9. – С. 63-67.

2. Кошелев В.И., Лю Ш., Петкун А.А. О критериях границ зон сверхширокополосного излучателя с аксиальной симметрией // Известия вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. № 9. – С. 46-50.
3. Кошелев В.И., Лю Ш., Петкун А.А. Влияние диаметра экрана на характеристики короткого электрического излучателя // Известия вузов. Физики. – 2010. – Т. 53. № 9/2. – С. 49-53.
4. Кошелев В.И., Лю Ш., Петкун А.А. Численное моделирование конических ТЕМ антенн с аксиальной симметрией // Известия вузов. Физики. – 2010. – Т. 53. № 9/2. – С. 54-59.

Статьи в прочих научных журналах

1. Koshelev V.I., Andreev Yu.A., Efremov A.M., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N., Liu S. Study on stability and efficiency of high-power ultrawideband radiation source // Journal of Energy and Power Engineering. – 2012. – V. 6. No. 5. – P. 771-776. DOI:10.17265/1934-8975/2012.05.014

Статьи в сборниках трудов конференций

1. Андреев Ю.А., Лю Ш. Согласование комбинированных сверхширокополосных антенн с фидерным трактом // Доклады 4 Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». Томск: Томский университет систем управления и радиоэлектроники. 2007. Часть 1. С. 150-152.
2. Andreev Yu.A., Liu S. Optimization of combined radiator of high-power ultrawideband electromagnetic pulses // Proc. 15 Inter. Symposium on High Current Electronics. 2008. Tomsk: Institute of High Current Electronics SB RAS. P. 387-390.
3. Кошелев В.И., Петкун А.А., Дейчули М.П., Лю Ш. Частотные и временные характеристики конических ТЕМ антенн // Доклады 4 Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». 2010. Москва: Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. С. 336-340.
4. Koshelev V.I., Andreev Yu.A., Efremov A.M., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N., Liu S. Increasing stability and efficiency of high-power ultrawideband radiation source // Proc. 16 Inter. Symposium on High Current Electronics. 2010. Tomsk: Institute of High Current Electronics SB RAS. P. 415-418.
5. Liu Sh., Andreev A.A., Lu Y. Simulation and optimization of an ultra wideband high power composite antenna // 2nd International conference on machine learning and computer application ICMLCA. 2021. Shenyang, China. P. 631-634.