

На правах рукописи



Нескородов Станислав Евгеньевич

**Особенности распространения сверхкоротких импульсов и методики
измерений характеристик излучателей в условиях отражений**

1.3.4 Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Усков Григорий Константинович

Официальные оппоненты: **Разиньков Сергей Николаевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия им. профессоров
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж),
кафедра электрооборудования (и оптико-электронных систем) факультета авиационного
оборудования летательных аппаратов, профессор

Мазинов Алим Сеит-Аметович

доктор физико-математических наук, доцент,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Крымский федеральный
университет имени В.И. Вернадского», физико-
технический институт, кафедра радиофизики и
электроники, заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и информатики»,
г. Самара

Защита состоится 29 июня 2023 г. в 15 часов 10 минут на заседании диссертационного совета 24.2.288.05 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, главный корпус, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Воронежского государственного университета по адресу:
<http://www.science.vsu.ru/dissinfo&cand=3473>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Степкин В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей распространения сверхкоротких импульсов и разработке методик измерений характеристик излучателей на открытых полигонах и помещениях с отражениями.

Актуальность темы исследования. Традиционные методы измерения параметров излучателей ультравысоких частот (УВЧ) и сверхвысоких частот (СВЧ) диапазонов базируются, как правило, на использовании узкополосных сигналов. При этом необходимо перестраивать несущую сигнала с шагом, обеспечивающим требуемую дискретизацию по частоте. С увеличением полосы пропускания излучателя, время таких измерений линейно растет, кроме того требуется специальная подготовка полигона с целью минимизации отражений для обеспечения точности измерений. Однако, в последние годы появляются измерительные системы, использующие в качестве сигнала сверхкороткие импульсы. Появление такого рода систем стало результатом развития радиолокационных станций ближнего радиуса действия, использующих в качестве зондирующих сигналов импульсы нано- и субнаносекундной длительности. Входящие в их состав полупроводниковые генераторы импульсов способны генерировать сигнал с амплитудой от 10 до 200 вольт и длительностями от 10 до 10000 пс, а используемые приемники, в том числе стробоскопические, способны принимать сверхширокополосные сигналы.

Излучение в импульсном режиме имеет свои особенности, например, отсутствие явно выраженных боковых лепестков диаграммы направленности, которые должны значительно упростить требования, в части подготовки измерительного полигона, при проведении измерений с использованием таких импульсов. Постоянный интерес к описанию излучения структур во временной форме, часто упоминаемый в литературе, требует развития методов верификации предложенных гипотез.

В основе измерений параметров излучателей лежит преобразование Фурье, позволяющее рассматривать сигнал как во временной, так и в спектральной областях. В работах показано, что поле симметричного вибратора в широкой полосе частот, рассчитанное на основе теории длинных линий, во временной области представляет собой три последовательных δ -импульса разной полярности и различной амплитуды. По мере удаления от излучателя изменяется временная задержка между импульсами. По величине этой задержки можно сделать вывод о нахождении наблюдателя в зонах Френеля или Фраунгофера. В работах приведены различные критерии оценки дальней зоны, основанные на длительности возбуждающего импульса. Также предполагается, что при нахождении излучателя вблизи других предметов и поверхностей (например, земли) можно управлять временными задержками отраженных импульсов, меняя геометрию системы, например, высоту расположения излучателя и приемной антенны. Обладая возможностью разделения во времени неотраженных и отраженных импульсов, последние могут быть исключены при обработке результатов измерений с помощью временного окна, что позволяет имитировать свободное пространство.

Измерения с применением сверхкоротких импульсов актуальны и в случае, когда есть необходимость скрыть рабочие частоты излучателя. Возбуждающий импульс, чаще всего однополярный, перекрывает ширину частотного спектра излучателя, скрывая истинный диапазон исследуемой структуры. Также

ограниченность сигнала во времени, и большая скважность позволяют снизить спектральную плотность энергии, затруднив удаленный несанкционированный прием.

В настоящее время существуют единицы испытательных полигонов для проведения измерений характеристик излучателей с помощью сверхкоротких импульсов. Однако, интерес к этому методу измерений и анализу возможных преимуществ нового подхода достаточно устойчив. Ведущие компании мира, специализирующиеся на разработке измерительной техники, предлагают решения, основанные на предварительной калибровке помещения с использованием монохроматических сигналов. Недостатком таких методов являются значительные ограничения на размер исследуемых излучателей – их линейные размеры должны быть сопоставимы с калибровочными антеннами. Другой подход состоит в применении сканеров ближнего поля, однако они не позволяют обеспечить удовлетворительную точность измерений для большинства типов излучателей.

В связи с изложенным, исследование излучателей с помощью широкополосных импульсных сигналов является перспективным направлением. Помимо определения диаграммы направленности и коэффициента усиления на различных частотах, применение широкополосных сигналов может повысить точность измерений за счёт компенсации сигналов, рассеянных окружающими предметами (например, элементами вспомогательного оборудования), а в некоторых случаях, способствовать получению дополнительной информации об испытуемом излучателе. Таким образом, исследования аналогового импульсного радиоканала и разработка радиофизических методов обработки сверхширокополосного импульсного сигнала являются актуальными.

Объектом исследования является аналоговый радиоканал, включающий излучатель, среду распространения сигнала и приемную антенну, а **предметом исследования** – характеристики радиоканала при наличии отражений от различных объектов и их компенсация при обработке регистрируемого сигнала.

Целью диссертации является совершенствование и расширение области применения методов измерения характеристик излучения во временной области с помощью сверхширокополосных импульсных сигналов при наличии непоглощающей подстилающей поверхности и иных объектов.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо было решить следующие **задачи**:

- исследовать параметры возбуждающих импульсов и определить критерии, при которых отклик радиоканала на заданный импульс имеет вид, аналогичный его импульсной характеристике;
- разработать метод априорной оценки длительности импульсной характеристики системы;
- исследовать особенности формирования и распространения электромагнитных волн при импульсном возбуждении излучателей;
- разработать метод измерения характеристик излучателей с фильтрацией отражений от непоглощающих подстилающих поверхностей и иных объектов.

Методы исследования. При решении задач, поставленных в диссертации, использовались: методы компьютерного моделирования электродинамических систем, численные методы расчета и анализа, методы и алгоритмы теории распространения радиоволн, методы цифровой обработки сигналов, а также экспериментальные методы радиофизики.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- введено условие максимальной длительности возбуждающего импульса, при котором отклик радиоканала соответствует её импульсной характеристике. Их применение при измерении характеристик излучателя позволяеткратно уменьшить размеры испытательного полигона;

- для априорной оценки длительности импульсной характеристики радиоканала предложена аналитическая модель излучения, основанная на замене поля импульсного тока полем сосредоточенного заряда. Рассмотрен пример синтеза формы проволочного излучателя по заданному полю. На основе моделирования излучателя в широкой полосе частот разработан его экспериментальный образец.

- предложена методика определения характеристик распространения сверхкороткого импульса в свободном пространстве, на основе замены зоны интерференции поля излучения непрерывного сигнала, зоной временного разделения прямого и отраженного, от окружающих объектов, импульсов.

- предложен метод фильтрации во временной области на основе оценки длительности импульсной характеристики канала распространения, при возбуждении излучателей сверхкороткими импульсами, позволяющий получить корректные диаграммы направленности в условиях отражений от окружающих предметов и поверхностей.

Достоверность результатов диссертации подтверждается строгостью доказательств утверждений и наложенных ограничений, обоснованностью и корректностью применения математического аппарата, результатами экспериментальных исследований на программных моделях, совпадением новых результатов с известными в частных случаях. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением аттестованной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных данных современными численными методами.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- предлагаемый метод измерения импульсной характеристики позволяет отказаться от решения некорректной физической задачи при обработке принятого сигнала. При этом исчезает необходимость дополнительного анализа сигнала генератора при измерении параметров канала радиосвязи, что сокращает перечень требуемой аппаратуры и упрощает измерительную установку;

- временная модель излучения позволяет априорно оценить длительность импульсной характеристики излучателя. Метод, основанный на замене поля импульсного тока полем сосредоточенного заряда, позволяет рассчитывать электромагнитное поле, используя уравнения движения частицы. Синтез излучателя, по заданному в широкой полосе частот полю, также сводится к решению уравнения движения сосредоточенного заряда;

- предлагаемый метод измерения параметров излучателя позволяет одновременно рассматривать всю требуемую полосу частот. Требования к полигону измерений могут быть значительно снижены за счет исключения поглощающих покрытий. Дополнительно, присутствие множества спектральных компонент обеспечивает техническое маскирование рабочей полосы частот измеряемой структуры.

Результаты работы могут быть использованы для измерения параметров антенн в ОВЧ, УВЧ и СВЧ диапазонах.

Основные результаты и положения, представляемые на защиту:

- выполнение установленного условия по максимальной длительности возбуждающего сверхширокополосного импульса исключает необходимость дополнительной математической обработки на приемном устройстве для регистрации импульсной характеристики системы;

- использование предложенной модели излучения, основанной на замене короткого импульса тока перемещающимся сосредоточенным зарядом, позволяет провести оценку длительности импульсной характеристики излучателя или синтезировать его геометрию по заданному импульсному полю в широкой полосе частот;

- при небольшой длине радиотрассы достаточно использовать временное разделение неотраженного (прямого) и отраженного от подстилающей поверхности сигнала, что позволяет имитировать его распространение в свободном пространстве;

- результаты экспериментальных и теоретических исследований излучения сверхкоротких импульсных сигналов, указывают на возможность корректного измерения коэффициента направленного действия и построения диаграмм направленности излучателей в условиях наличия отражений от различных объектов и подстилающей поверхности в зоне измерений.

Личный вклад автора состоит в разработке и проведении теоретических и экспериментальных исследований, а также анализе полученных результатов. Результаты, представленные в диссертации, получены при непосредственном участии автора на этапах постановки задач и разработки экспериментальных и теоретических методов для их решения, обработки полученных данных и написании публикаций.

Апробация работы. Основные материалы по всем разделам диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами (г. Саратов, 2016); Международной научно-технической конференции «Антенны и распространение радиоволн» (г. Санкт-Петербург, 2019); XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI Международные научно-технические конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2015-2021 гг.); Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (г. Самара, 2020); Международной научно-технической конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 2020); Научном форуме «Телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2021» (г. Самара, 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК – 5, из них 2 – в изданиях, индексируемых в Scopus, получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 98 наименований. Общий объем диссертации составляет 100 страниц, включая 48 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и решаемые задачи исследования. Показана научная новизна работы и приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию условий, при выполнении которых на приемнике будет регистрироваться сигнал, совпадающий с импульсной характеристикой системы.

В разделе 1.1 приводится расчет отклика линейной цепи на импульс в зависимости от его длительности. Рассмотрены возбуждающие сигналы двух видов: прямоугольный импульс и сигнал, описываемый следующим выражением:

$$x(t) = \frac{A}{\pi} \left(\frac{t}{\tau}\right)^n \left[M^{m+1} e^{\frac{-Mt}{\tau}} - e^{\frac{-t}{\tau}} \right], \quad (1)$$

где n , m , M – параметры, определяющие форму сигнала, τ – длительность импульса по уровню 0,5. При параметрах $n=2$, $m=2,1$, $M=10$ получаемый сигнал имеет наибольшую схожесть с выходным сигналом генератора сверхкоротких импульсов, используемым в работе. Для подтверждения этого вывода, на рис. 1 непрерывной линией изображен сигнал реального генератора, а модель сигнала, рассчитанного по выражению (1) показан пунктирной линией. При воздействии такого сигнала на пассивную полосовую цепь, устанавливалось соответствие отклика цепи ее импульсной характеристике (ИХ) на основе эффективной длительности. Разница в значениях эффективных длительностей отклика цепи $t_e(y(t))$ и ее ИХ $t_e(x(t))$ считалась приемлемой, при условии их отличия не более, чем на 10%. Для фиксации на приемнике ИХ системы, длительность возбуждающего импульса не должна превышать величины ν от длительности ИХ системы. Это условие является необходимым и достаточным. Установлено, что величина ν зависит от формы импульса: для прямоугольного $\nu = 0,12$, для импульса вида (1) $\nu = 0,3$ (рис. 2).

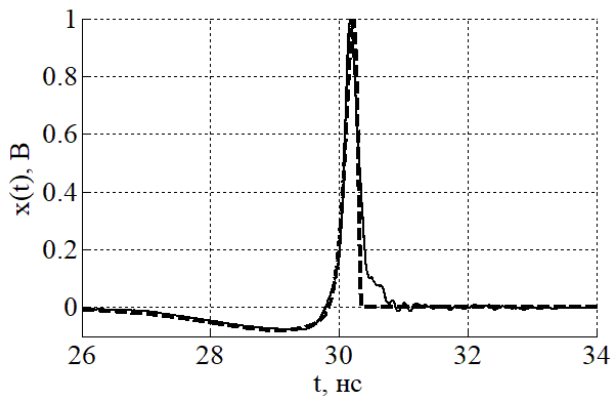


Рис. 1 – Нормированные сигналы: сплошным с генератора сверхкоротких импульсов, штриховым сигнал вида (1).

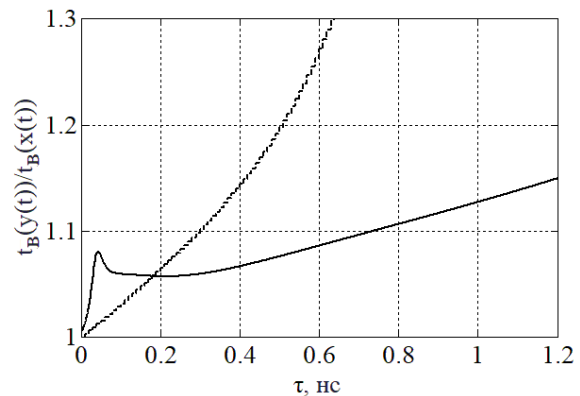


Рис. 2 – Отношение $t_e(y(t))/t_e(x(t))$ от τ для сигнала (1) (сплошная линия) и прямоугольного импульса (пунктирная линия).

Раздел 1.2 посвящен экспериментальной проверке полученных соотношений для различных типов излучателей.

Экспериментальная установка представляла собой две диэлектрические мачты высотой около 4 м, на вершине одной из них была закреплена приемная антенна, подключенная к осциллографу, а на вершину другой поочередно устанавливались симметричный вибратор, рупор и биконический излучатель, подключаемые к генератору сверхкоротких импульсов (СКИ). Вспомогательная аппаратура располагалась у основания мачты. Сигнал с генератора СКИ излучался исследуемым типом излучателя, а отклик с приемной антенны фиксировался осциллографом.

При обработке результатов измерения по осциллограммам принятого отклика и сигнала с генератора СКИ рассчитывалась импульсная характеристика радиоканала «излучатель – среда распространения – приемная антенна». Решение некорректной задачи нахождения импульсной характеристики сводилось к решению корректной, на основе использования метода регуляризации по Тихонову. Сравнение импульсной характеристики канала с откликом системы на СКИ проводилось по их значениям энергии и эффективной длительности.

Переменная времени t в выражении эффективной длительности входит как весовая функция. Для корректного отображения физических процессов и улучшения отношения сигнал/помеха, максимум весовой функции должен приходиться на момент присутствия сигнала. Для выполнения этого условия проведена коррекция весовой функции, для чего построено распределение энергии сигнала по времени (рис. 3). Это дает возможность выбрать длительность окна, в котором сосредоточена основная энергия сигнала, без потери информации о системе. Для расчета эффективной длительности использовано эквивалентное время, принимающее значения от 0 до $T/2$ и от $T/2$ до 0 по линейному закону. Таким образом, максимум весовой функции приходится на середину импульса.

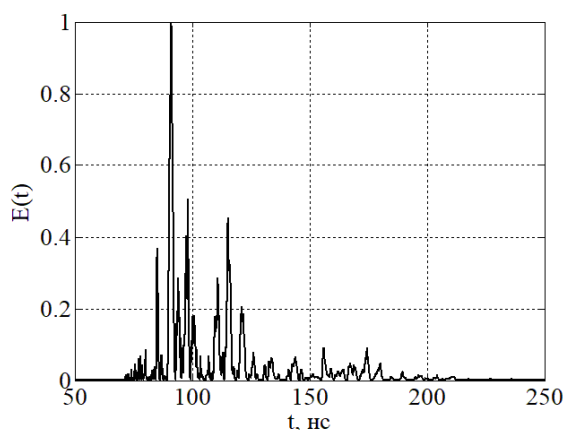


Рис. 3 – Распределение энергии принятого сигнала по времени при излучении симметричного вибратора.

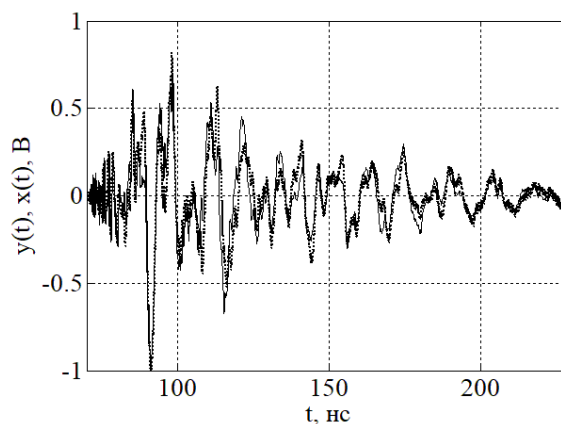


Рис. 4 – Временные формы нормированных ИХ (сплошной) и принятый сигнал (пунктир).

Сравнение временных форм ИХ и принятого сигнала для симметричного вибратора, биконического и рупорного излучателей приведено на рис. 4-6. Количественное сравнение приведено в таблице 1.

Таблица 1.

Излучатель	Симметричный вибратор	Биконический	Рупорный
Энергия E ИХ, нДж	6,34	8,92	1,57
Энергия E сигнала, нДж	6,19	8,78	1,65
ΔE , %	3	2	6
Эфф. длит. ИХ $t_e(x(t))$, нс	55	95	22
Эфф. длит. сигнала $t_e(y(t))$, нс	53	99	24
Δt_e , %	4	5	7

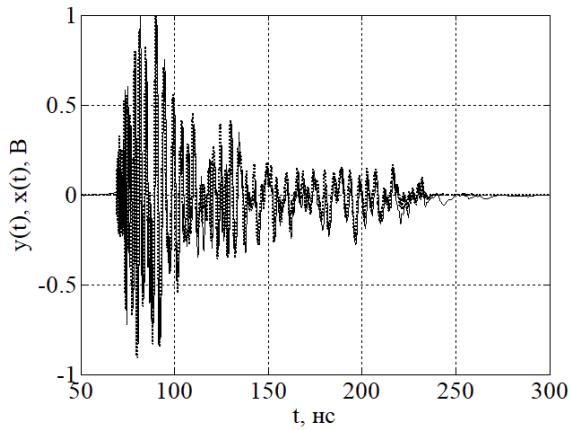


Рис. 5 – Временные формы нормированных ИХ биконического излучателя (сплошной) и принятый сигнал (пунктир).

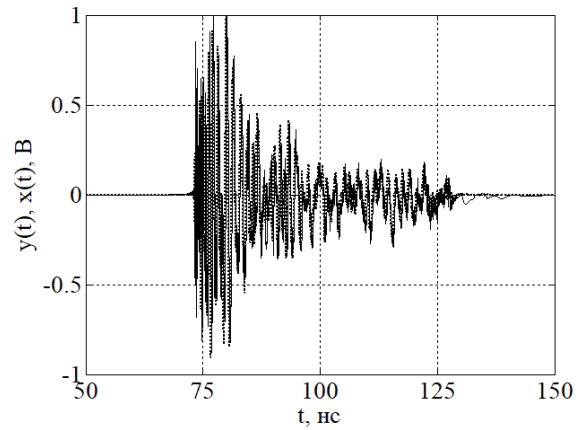


Рис. 6 – Временные формы нормированных ИХ рупорного излучателя (сплошной) и принятый сигнал (пунктир).

Таким образом, для всех типов излучателей, отличие значений энергии импульсной характеристики и значений энергии принятого сигнала составило не более 6 %, а отличие эффективной длительности импульсной характеристики от эффективной длительности зарегистрированного осциллографом сигнала составило не более 7 %. Если считать порогом расхождения величину, равную 10 %, как указано в разделе 1.1, то зарегистрированные осциллографом характеристики сигналов эквивалентны импульсным характеристикам системы для всех типов рассматриваемых излучателей.

В разделе 1.3 экспериментально подтверждена теоретическая зависимость КПД системы от длительности импульса, описанная в разделе 1.1. Приведен алгоритм измерения КПД для различных длительностей возбуждающего импульса. Зафиксировано изменение формы сигнала при невыполнении условия, накладываемого на длительность возбуждающего импульса.

Таким образом, регистрация импульсной характеристики канала на приемном устройстве возможна при соблюдении ограничения на длительность возбуждающего сверхкороткого импульса. Для конкретной системы длительность возбуждающего импульса не должна превышать величины ν от длительности импульсной характеристики системы.

Вторая глава диссертации посвящена анализу и синтезу излучателей с помощью модели сосредоточенного заряда.

В разделе 2.1 приведены основные аналитические выражения при рассмотрении излучения с использованием модели сосредоточенного заряда. В предположении движения заряда q по траектории, определяемой вектором $\vec{r}(t)$, проведенного из точки наблюдения в точку расположения заряда, напряженность электрического поля $\vec{E}(t)$ в точке наблюдения, в общем случае, определяется выражением:

$$E(t) = \frac{q}{4\pi\epsilon} \left[\frac{\vec{e}(t)}{r^2(t)} + \frac{r(t)}{c} \frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{e}(t)}{r^2(t)} \right) + \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{e}(t)}{dt^2} \right],$$

где $\vec{e}(t) = \frac{\vec{r}(t)}{r(t)}$ — единичный вектор, c — скорость света в вакууме, ε —

диэлектрическая проницаемость среды (для вакуума $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$).

При нахождении точки наблюдения в дальней зоне, можно пренебречь первыми двумя членами в выражении $E(t)$, убывающими как R^{-2} , и остается только последний член, убывающий как R^{-1} , определяющий поле излучения в дальней зоне. Для тонкого несимметричного вибратора длиной l , моменты возбуждения и поглощения заряда питающей линией для стороннего наблюдателя эквиваленты началу и окончанию движения заряда соответственно. Поэтому, траектория движения заряда определится уравнениями:

$$x(\tau) = c\tau \cdot 1(\tau) - 2c \left(\tau - \frac{l}{c} \right) \cdot 1 \left(\tau - \frac{l}{c} \right) + c \left(\tau - \frac{2l}{c} \right) \cdot 1 \left(\tau - \frac{2l}{c} \right);$$

$$y(\tau) = 0;$$

$$z(\tau) = 0,$$

где $1(\tau)$ — единичный перепад, $\tau = t - \frac{R}{c}$, c — скорость света в среде.

Выражение для напряженности поля в дальней зоне будет иметь вид:

$$E_x(t) = -\frac{\mu_0 q}{4\pi R} \left\{ c \cdot \delta \left(t - \frac{R}{c} \right) - 2c \cdot \delta \left(t - \frac{l+R}{c} \right) + c \cdot \delta \left(t - \frac{2l+R}{c} \right) \right\}.$$

Длительность импульсной характеристики излучателя, согласованного с фидером, определится временем движения эквивалентного заряда от точки «запитки» до концов проводника и обратно. При рассогласовании излучателя с фидером, могут наблюдаться различные переходные процессы, которые будут являться неотъемлемой частью импульсной характеристики. Аналогичный подход используется и при расчете поля излучателей других форм, структура которых известна, например рупорных, биконических и др.

В разделе 2.2, в качестве примера, решена задача синтеза проволочного излучателя по заданному полю с использованием модели сосредоточенного заряда. Если излучаемое поле задать в виде:

$$E_x(t) = -\frac{1}{2\pi R \varepsilon_0} ab^2 \cos bct, \quad 0 \leq t \leq \frac{l_0}{c},$$

где a, b — некоторые константы, c — скорость света в вакууме, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$, то, на основе полученного выражения, можно определить и форму излучателя:

$$x = a \cdot (1 - \cos by).$$

Модель синусоидальной формы излучателя, расположенного на подложке, представляющей собой заземленный экран, изображена на рис. 7. Анализ модели проведен методом конечных элементов во временной области.

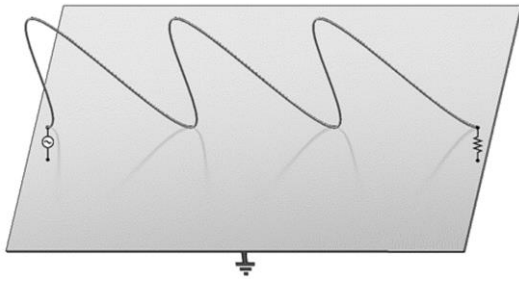


Рис. 7 – Внешний вид модели излучателя.

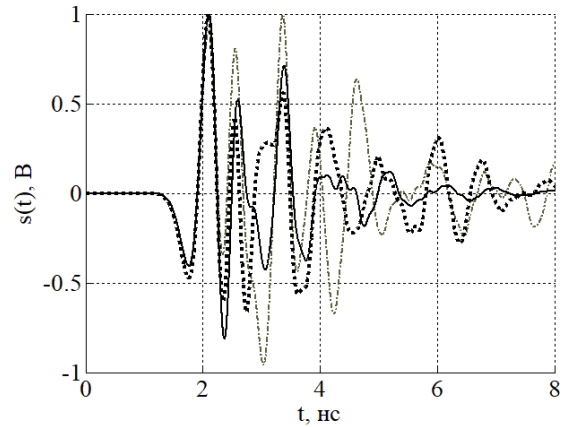


Рис. 8 – Временные формы электрических полей при различных нагрузках на конце излучателя: аттенюатор 20 дБ (сплошной), ХХ (пунктир), КЗ (штриховая).

Для полноценного исследования физических процессов в момент излучения промоделированы случаи с использованием традиционного набора согласованной нагрузки (аттенюатор 20 дБ), холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) в диапазоне частот от 0 до 4 ГГц. Результаты моделирования (рис. 8), показывают, что излучаемое поле в каждом случае примерно повторяет структуру модели. Сосредоточенный заряд, распространяясь по проводнику, либо поглощается на его конце, при наличии нагрузки в виде аттенюатора, либо отражается, при нагрузках ХХ и КЗ. Сдвиг фаз, в момент отражения, равном 4 нс, определяется видом нагрузки. Пунктирная и штриховая кривые находятся в противофазе, что соответствует различному характеру отражения заряда.

В разделе 2.3 описаны методики измерения характеристик макета синтезированного излучателя, изображенного на рис. 9. В качестве излучающего элемента была использована медная проволока диаметром 2 мм, длина которой соответствовала длине излучателя компьютерной модели, и составила 29,25 см. Поскольку, диаметр проволоки намного меньше ее длины, то можно говорить о тонкопроволочном приближении. Расстояние между концами излучателя и высота гребня равнялись 9,42 см и 4,5 см, соответственно.

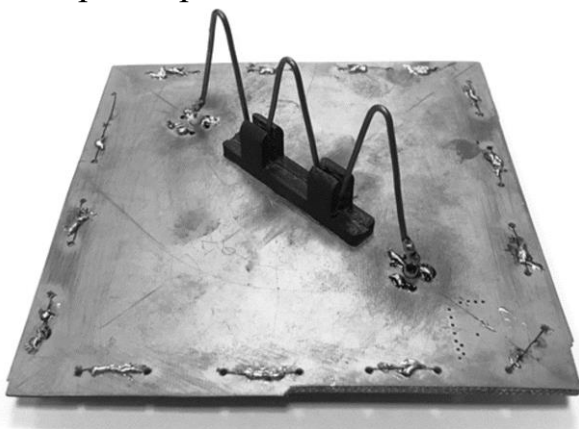


Рис. 9 – Экспериментальный аналог модели.

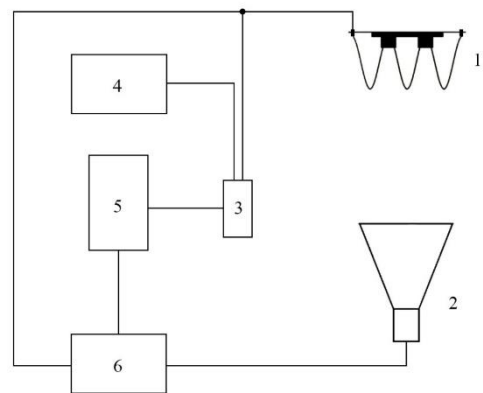


Рис. 10 – Блок-схема экспериментальной установки.

На рис. 10 изображена блок-схема экспериментальной установки. Здесь 1 – излучатель; 2 – приёмная антенна рупорного типа с экспоненциальным

раскрывом, 3 – генератор СКИ, 4 – источник питания, 5 – синхрогенератор, 6 – осциллограф. Принятые антенной 2 сигналы, отображаемые на экране осциллографа (6), представлены на рис. 11. Как и в компьютерном моделировании, здесь сплошные линии иллюстрируют случай с аттенюатором на 20 дБ, штриховые – КЗ, пунктирные – ХХ. Формы сигналов до момента времени 4 нс полностью совпадают во всех трех случаях. В момент времени 4 нс происходит отражение сигнала от нагрузки на конце излучателя. Реализации при нагрузках ХХ и КЗ находятся в противофазе. Реализация с нагрузкой в виде аттенюатора не претерпевает отражения за счет поглощения импульса нагрузкой. Таким образом, результаты, полученные в эксперименте, соответствуют результатам моделирования, что подтверждает возможность расчета поля излучателя методом сосредоточенного заряда.

На рисунке 12 приведены результаты измерений и моделирования для случая использования, в качестве нагрузки, аттенюатора 20 дБ. Совпадение характеристик очевидно, а значительные релаксационные процессы в эксперименте связаны с отсутствием идеального согласования с нагрузкой. Отличие экспериментальных характеристик от характеристик моделирования по эффективной длительности и энергии не превышает 9 %, что позволяет судить о достаточном соответствии полученных результатов.

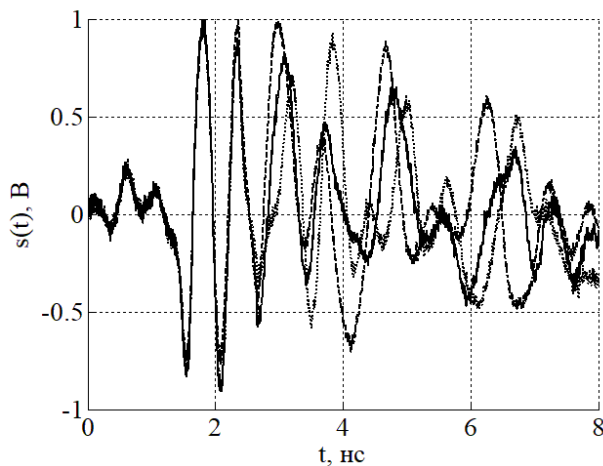


Рис. 11 – Временные формы излученных полей при различных нагрузках на конце излучателя.

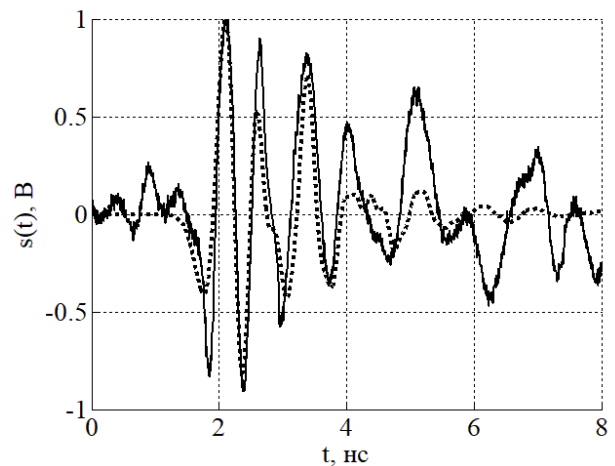


Рис. 12 – Временная форма полученного поля при нагрузке в виде аттенюатора: черным сплошным – измеренная, пунктир – моделирование.

Таким образом, предложенная модель излучения, основанная на движении сосредоточенного заряда, позволила по заданному полю синтезировать излучатель, а последующий анализ полученной структуры подтвердил, что его поле соответствует заданному априорно.

В разделе 2.4 приведены результаты оценки длительности импульсной характеристики на основе модели сосредоточенного заряда для различных типов излучателей.

Для расчета длительности импульсной характеристики излучателей, необходимо знать их геометрические размеры и тип взаимодействия на границах. Длительность ИХ, в конечном итоге, будет связана с временем прохождения по максимальному пути заряда.

В случае, если структура имеет излучающие плоскости, то сосредоточенный заряд преобразуется в поверхностный, а плоскость излучения может быть представлена набором элементарных проволочных элементов.

В этом разделе проведено сравнение длительностей импульсных характеристик, рассчитанных на основе предложенной модели излучения сосредоточенного заряда с длительностями, определяемыми зоной, содержащей максимальную энергию сигнала. Для симметричного вибратора получены значения 13,3 нс и 13,1 нс, для биконического излучателя - 5,5 нс и 5,6 нс, для рупорного излучателя - 7,9 нс и 7,7 нс соответственно. Обобщая полученные результаты, приходим к выводу, что длительности импульсных характеристик, рассчитанной на основе модели сосредоточенного заряда и определяемой по результатам измерений, совпадают с достаточной точностью.

Третья глава посвящена исследованию особенностей распространения СКИ в свободном пространстве и при наличии подстилающей поверхности.

В разделе 3.1 экспериментально показано, что граница дальней зоны при импульсном излучении совпадает с границей дальней зоны для максимальной частоты в спектре излучаемого импульса. Значение границы не зависят от длительности возбуждающего импульса при выполнении условия, описанного в главе 1. Измерения проводились для расстояний между излучателем и приемной антенной от 0,1 м до 10 м. При этом, фиксировалась величина $L_n(r) = Ur$, где U – амплитуда напряжения на нагрузке, а r – расстояние между излучателем и приемной антенной. Длительность возбуждающего импульса варьировалась в интервале от 200 до 600 пс.

На рис. 13 показана зависимость $L_n(r)$ для импульсов с длительностями 600 (*) и 250 (+) пс. Сплошная линия соответствует усредненным значениям. Как видно из графиков, за начало дальней зоны может быть принята величина, равная 4,7 м. С увеличением расстояния между излучателем и приемной антенной точки на графике группируются около прямой, соответствующей критерию L_n , равному 1. Приведенные результаты измерений подтверждают независимость границы дальней зоны от длительности импульса и согласуются с результатами моделирования. Ограничения, на минимальное расстояние между излучателем и приемной антенной, будут совпадать для монохроматического и сверхширокополосного сигналов, так как определяются только верхней частотой рабочего диапазона излучателя.

В разделе 3.2 исследовалось распространение сверхкоротких импульсов вдоль подстилающей поверхности. Показано, что отсутствие характерной для монохроматических сигналов зоны интерференции с наличием максимумов и минимумов поля, обусловлено временным разделением прямого и отраженного от подстилающей поверхности сигналов. На рис. 14 показана зависимость энергии импульса от расстояния между излучателем и приемной антенной для высот подвеса в 1, 2 и 8 м. Видно, что вне зависимости от высоты расположения антенн, энергия сигнала на малых расстояниях между ними убывает как $1/r^2$, что соответствует закону убывания энергии в свободном пространстве. Однако с увеличением расстояния между антеннами прямой и отраженные сигналы начинают интерферировать, причем для низкорасположенных антенн начало интерференции наступает раньше. Значение энергии сигнала уменьшается и его характер затухания перестает соответствовать закону $1/r^2$. Граница нарушения соответствия составляет величину, порядка 50 м для антенн, поднятых на высоту

2 м. Расчетная граница зоны интерференции, для верхней рабочей частоты излучателя, равна 48 м.

Таким образом, удалось сформировать «безэховое» приближение, при котором сигнал на регистрируемом устройстве аналогичен сигналу, распространяемому в свободном пространстве, несмотря на наличие подстилающей поверхности любого типа.

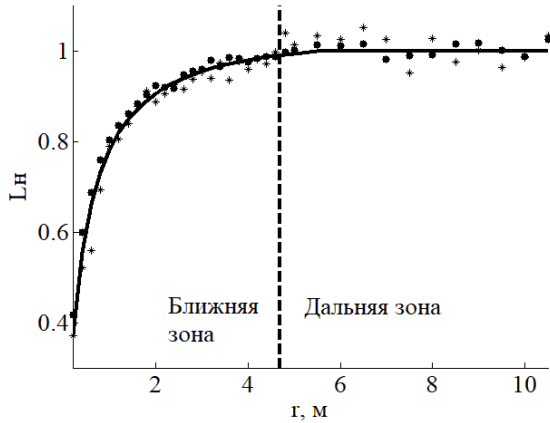


Рис. 13 – Зависимость нормированного критерия $L_n(r)$ от расстояния между излучателем и приемной антенной для длительностей 600 пс (•) и 250 пс (*).

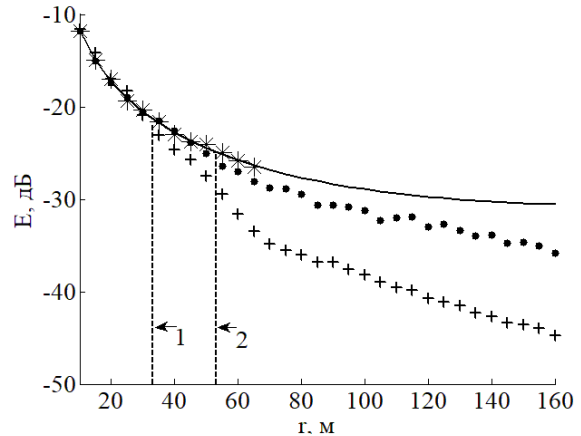


Рис. 14 – Зависимость энергии на приемной антенне от расстояния для различных высот расположения 1 (+), 2 (•), 8 (*) м (сплошная линия – $1/r^2$).

1 – граница зоны измерений для высоты подвеса 1 м;
2 – граница зоны измерений для высоты подвеса 2 м.

В разделе 3.3 приведен пример измерения диаграмм направленности излучателя с использованием сверхкоротких импульсов. В качестве излучающей, использовалась антенна П6-48, с заранее известными характеристиками, измеренными в безэховой камере с монохроматическими сигналами, представленными производителем. Поворотное устройство обеспечивало вращение излучателя в азимутальной плоскости для получения диаграмм направленности с различных направлений.

При обработке результатов измерения на реализации принятого сигнала накладывалось временное прямоугольное окно длительностью 10 нс. С

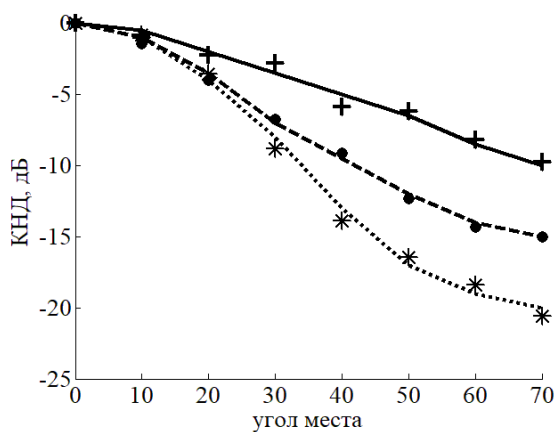


Рис. 15 – Нормированные диаграммы направленности для разных частот

помощью преобразования Фурье рассчитывался частотный спектр каждой реализации и, на основе соотношений спектральных компонент, строились диаграммы направленности для каждой из исследуемых частот. На рис. 15 приведено сравнение полученных нормированных диаграмм направленности в Н-плоскости на частотах 300 (+), 500 (•) и 700 (*) МГц, с паспортными характеристиками излучателя П6-48 (сплошная - 300 МГц, прерывистая – 500 МГц, пунктирная – 700 МГц).

Для всех направлений излучения различие составляет не более 1 дБ, Таким образом, представленные результаты измерений диаграмм направленности излучателя для сверхкоротких импульсов на открытом полигоне совпадают с результатами измерений производителя. При проведении эксперимента, приемная антенна располагалась в дальней зоне и на расстоянии от излучателя, не превышающем зону интерференции для верхней рабочей частоты. При этом полигон не требовал особой подготовки и инфраструктурных затрат.

Четвертая глава посвящена методикам измерений диаграмм направленности излучателей с помощью сверхкоротких импульсов в условиях отражений и алгоритмам обработки сигналов.

В разделе 4.1 обобщены требования к помещению для измерений характеристик излучателей с помощью сверхкоротких импульсов. С одной стороны, приемная антенна должна быть расположена в дальней зоне исследуемого излучателя, с другой, необходимо обеспечить временное разделение между прямым и отраженными от стенок (потолка, пола и иных объектов) импульсами.

В разделе 4.2 описаны экспериментальная установка и процесс измерений. Расстояние между излучателем и приемной антенной 8 м, высота подвеса 2 м. Приведена методика оценки влияния поворотного устройства с использованием всенаправленной осесимметричной сверхширокополосной антенны. Преимуществом данной антенны по сравнению с другими всенаправленными антеннами, например биконической, является малый поперечный размер, характерный для антенн вибраторного типа. При вращении осесимметричной антенны на 360° неравномерность принятого сигнала по энергии не превысила 1 дБ, неравномерность по эффективной длительности не превысила 1 %. На основе этого сделан вывод, что поворотное устройство и аппаратура под ним не вносят заметных искажений при вращении.

В разделе 4.3 приведен алгоритм обработки результатов измерений, блок-схема которой изображена на рис. 16. На рис. 17 представлены импульсные

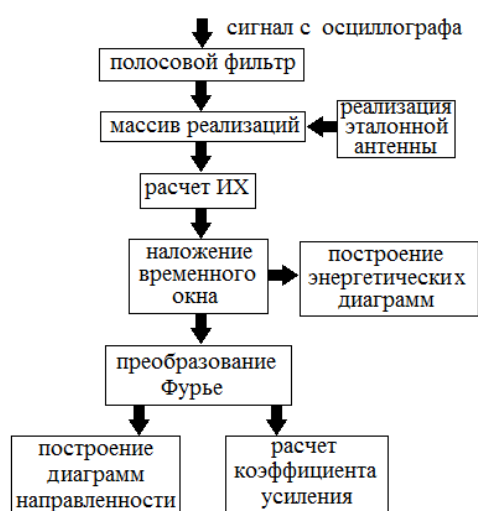


Рис. 16 – Блок-схема обработки результатов измерений.

характеристики для различных углов поворота излучателя. За 0° взято направление, при котором антенны направлены встречно. Как видно из рис. 17, принятый сигнал состоит из импульсов с различным временем прихода. Все импульсы кроме первого принадлежат лучам, отраженным от стен или пола. Измерительная установка позволяет исключить их из рассмотрения в автоматическом режиме с помощью оконной функции и, таким образом, выделить целевой сигнал неискаженным. Априорная оценка импульсной характеристики канала

«антенна – среда - антенна» проведена на основе метода сосредоточенного заряда.

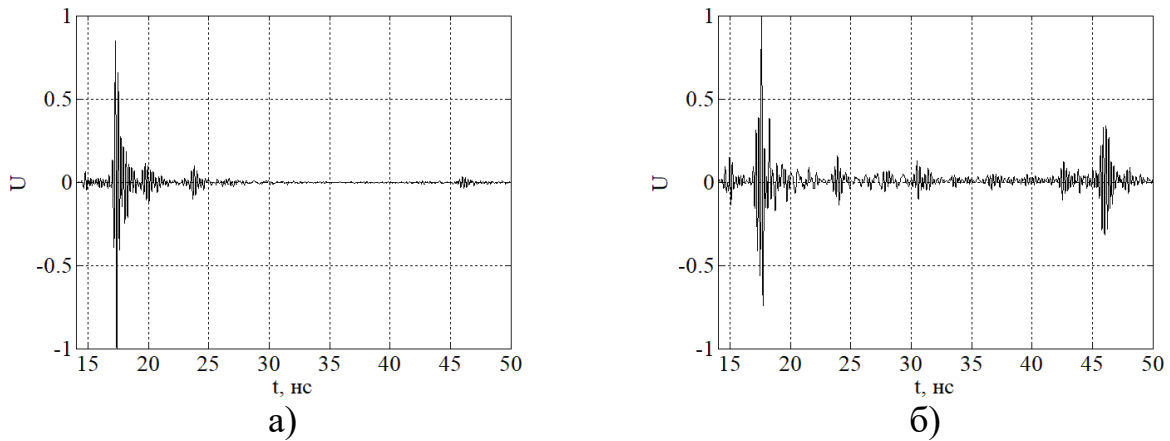


Рисунок 17 – Набор нормированных импульсных характеристик для разных углов поворота исследуемой антенны: а – 0° , б – 180° .

Для устранения ошибок, вызванных отражениями, на каждую реализацию накладывалась оконная функция специальной формы. Часто используемые оконные функции, такие как прямоугольное окно или окно Хэмминга не подходят по различным причинам. Прямоугольное окно имеет резкий перепад, нарушающий непрерывность производной. В этом случае преобразование Фурье может дать неконтролируемые шумовые выбросы, что может повлиять на диаграмму направленности. Окна типа Ханна, Хэмминга и др. хотя и обеспечивают непрерывность производной результирующей функции, но имеют иной недостаток – вводят искажение полезного сигнала за счет собственной неравномерности. Для борьбы с перечисленными недостатками была применена оконная функция, описываемая следующим выражением:

$$F(t) = \begin{cases} e^{-\frac{(t+\tau)^2}{\sigma}}, & -\tau < t \\ 1, & -\tau < t < \tau \\ e^{-\frac{(t-\tau)^2}{\sigma}}, & t < \tau \end{cases},$$

где τ – длительность импульсной характеристики, рассчитанная методом сосредоточенного заряда. Предложенная оконная функция не вносит искажения

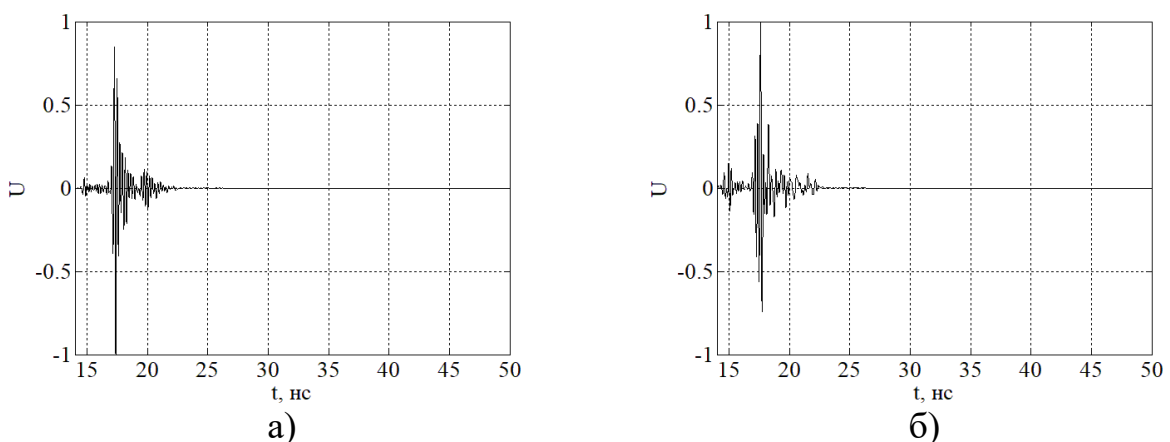


Рисунок 18 – Набор нормированных импульсных модифицированных характеристик для разных углов поворота исследуемой антенны: а – 0° , б – 180° .

в полезный сигнал и исключает отклики отражений, затухание которых определяется параметром σ . Форма сигнала в «безэховом» приближении приведена на рис. 18.

Для построения диаграмм направленности необходимо перейти в частотную область. Для этого к модифицированным импульсным характеристикам для всех направлений применяют преобразование Фурье, а затем строят распределение энергии от направления для выбранной частоты.

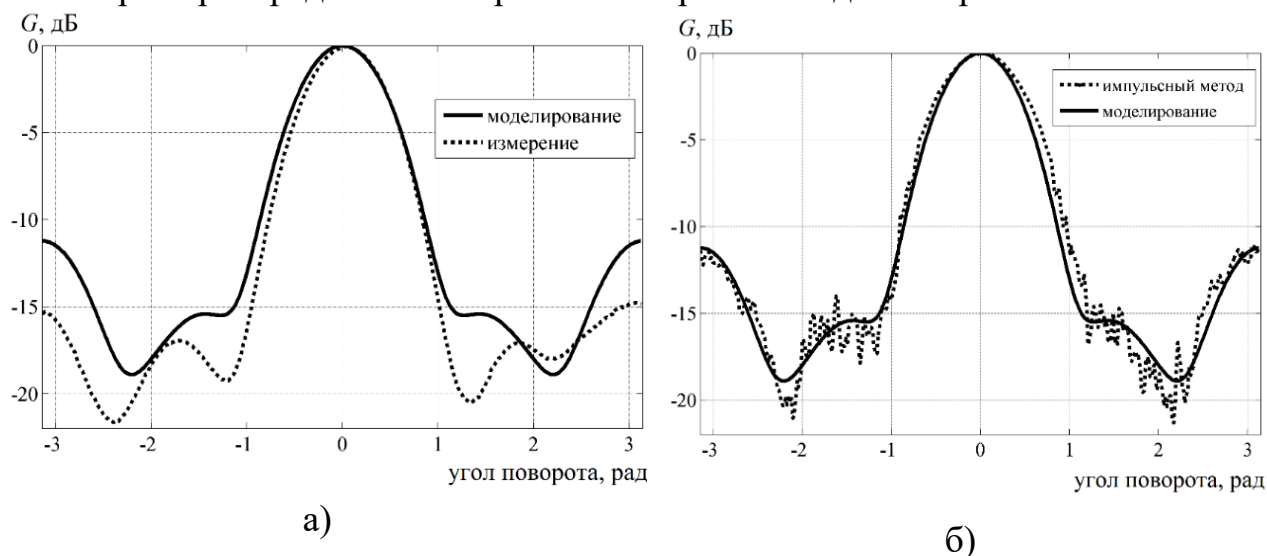


Рисунок 19 – Набор нормированных диаграмм направленности на частоте 2 ГГц: а – при измерении гармоническими сигналами, б – при измерении с помощью СКИ.

В данных условиях, для сравнения с предложенным методом, были проведены измерения диаграммы направленности излучателя для гармонических сигналов. Очевидно, что в схеме, изложенной в разделе 4.2, нарушаются базовые принципы методик измерений гармоническими сигналами: излучатель и антенна находятся слишком близко к поверхностям, которые не поглощают сигналы. Таким образом, в системе установится интерференционная картина поля, которая будет вносить искажения в полученный результат. На рис. 19а приведены диаграммы направленности рупорной антенны для гармонического сигнала на частоте 2 ГГц, полученные в результате компьютерного электродинамического моделирования и измерения по приведенной методике. Несмотря на то, что искажения в основном лепестке незначительны, различия в уровнях бокового излучения достигают 5 дБ.

На рис. 19б приведены аналогичные результаты для измерений с помощью СКИ. Уровень боковых излучений на рис. 19 а и б отличаются более, чем на 4 дБ, причем результаты измерений с помощью СКИ отличаются от результатов моделирования не более чем на 1 дБ.

Таким образом, предложенные алгоритм обработки и методика измерений позволили получить корректные результаты при наличии существенных отражений от окружающих предметов и поверхностей.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Определено необходимое и достаточное условие для соответствия отклика системы ее импульсной характеристике. При этом длительность

возбуждающего импульса по отношению к длительности импульсной характеристики системы определяется величиной v , значение которой зависит от формы импульса. При выполнении этого условия отклик системы, с точностью до постоянного множителя, соответствует ее импульсной характеристике. Экспериментально показано, что при возбуждении системы сверхкороткими импульсами на приемнике регистрируется импульсная характеристика системы.

2. Установлено, что представление излучения с заменой импульса тока эквивалентным сосредоточенным зарядом позволяет получить корректную качественную картину излученного поля, и его основные характеристики. Разработана методика экспресс оценки длительности импульсной характеристики излучателей, основанная на представлении о сосредоточенном заряде и его траектории движения по излучателю, с учетом его формы и размеров.

3. Показано, что граница дальней зоны определяется верхней рабочей частотой антенны не зависимо от типа возбуждающего сигнала. Выявлено отличие распространения импульсного нестационарного поля над земной поверхностью от распространения гармонических сигналов, заключающееся в отсутствии локальных минимумов и максимумов в зоне интерференции радиотрассы, которое достигается временным разделением прямого и отраженного от подстилающей поверхности импульсов.

4. Предложен метод фильтрации отражений сигнала во временной области с помощью временного окна, ширина которого выбирается по результатам априорной оценки длительности импульсной характеристики излучателя методом сосредоточенного заряда. Проведено сравнение результатов измерения с использованием гармонического и импульсного сигналов. Показано, что ошибка измерений в определении уровня боковых лепестков диаграммы направленности для гармонического сигнала достигает 5 дБ. В то же время, ошибка измерений по предложенной методике, с использованием сверхкоротких импульсов, составляет около 1 дБ.

Публикации по теме диссертации

Публикации, опубликованные в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Бобрешов А.М. Ударное возбуждение широкополосных пассивных линейных каскадов сверхкороткими импульсами / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // Радиотехника. – 2016. – № 12. – С. 64-67.

2. Экспериментальное измерение импульсных характеристик сверхширокополосных излучателей / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, К.В. Смусева [и др.]. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2020. – № 12. doi: 10.30898/1684-1719.2020.12.13.

3. Бобрешов А.М. Всенаправленная широкополосная вибраторная антенна / А.М. Бобрешов, Г.К. Усков, Д.П. Кондратьев, С.Е. Нескородов.// Антенны. – 2019. – Т. 262, № 8. – С. 5-11.

Публикации, индексируемые базами Web Of Science и Scopus:

1. Bobreshov A. Experimental measurement of impulse response UWB emitters / A. Bobreshov, G. Uskov, S. Neskoro dov [and etc.]. // 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). – Moscow, 2020. – pp. 266-268. doi: 10.1109/RMC50626.2020.9312291.

2. Бобрешов А.М. Особенности измерения характеристик антенн во временной области с помощью сверхкоротких импульсов / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2022 – Т. 65, № 1. – С. 16-22.

Публикации, опубликованные в сборниках всероссийских и международных конференций:

1. Экспериментальная оценка импульсных характеристик сверхширокополосных излучателей / А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, С.Е. Нескородов [и др.]. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Сборник научных трудов. – Севастополь, 2020. – Т. 2. – С. 372.

2. Экспериментальное измерение импульсных характеристик сверхширокополосных излучателей / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, К.В. Смусева [и др.]. // VII Всероссийская Микроволновая конференция. – Москва, 2020. –С. 343-346.

3. Бобрешов А.М. Генератор сверхкоротких импульсов с одновременной накачкой заряда SRD и накоплением магнитной энергии / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // Радиолокация, навигация, связь: XX Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2014. – Т. 3. – С. 1877-1882.

4. Бобрешов А.М. Генератор радиоимпульсов наносекундной длительности / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // Радиолокация, навигация, связь: XXI Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2015. – С. 903-907.

5. Бобрешов А.М. Формирование широкополосного радиоимпульса методом ударного возбуждения широкополосной антенны / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // Радиолокация, навигация, связь: XXII Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 19-21 апр. 2016 г. — Воронеж. – 2016. — Т.2. – С. 979-983.

6. Бобрешов А.М. Построение энергетических диаграмм направленности антенн при излучении сверхширокополосных сигналов / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Материалы Всероссийской научной школы-семинара. – Саратов, 2016. – С. 124-127.

7. Бобрешов А.М. Расчет излучения несимметричного вибратора во временной области / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, К.В. Смусева, Г.К. Усков. // Материалы конференции «Антенны и распространение радиоволн 2019». – Санкт-Петербург, 2019. – С.101-155.

8. Бобрешов А.М. Расчет излучения несимметричного вибратора методом сосредоточенного заряда / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, К.В. Смусева, Г.К. Усков. // Радиолокация, навигация, связь: XXVI Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2020 – Т. 4.– С. 175-179.

9. Бобрешов А.М. Составная вибраторная сверхширокополосная антенна / А.М. Бобрешов, Д.П. Кондратьев, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции. – Воронеж, 2018. – С. 251-255.

10. Бобрешов А.М. Широкополосная комбинированная антенна / А.М. Бобрешов, Д.П. Кондратьев, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXV Международной научно-

технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. – Москва, 2019. – С. 104-108.

11. Бобрешов А.М. Исследование вибраторной антенны с емкостной вставкой / А.М. Бобрешов, Д.П. Кондратьев, **С.Е. Нескородов**, Г.К. Усков. // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова. – Воронеж, 2021. – С. 228-232.

12. Бобрешов А.М. Измерение характеристик антенн импульсными сигналами / А.М. Бобрешов, **С.Е. Нескородов**, Г.К. Усков. // XXIV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Сборник трудов. – Воронеж, 2018. – Т. 4. – С. 43-47.

13. Бобрешов А.М. Измерение характеристик излучателя в условиях переотражений / А.М. Бобрешов, **С.Е. Нескородов**, К.В. Смусева, Г.К. Усков. // В книге: V Научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2021». Материалы XIX Международной научно-технической конференции. – Самара, 2021. – С. 223-224.

Патенты:

1. Патент на полезную модель № 197922 U1 Российская Федерация, МПК Н1Q 9/18. Штыревая антенна с емкостными нагрузками : № 2020104094 : заявл. 30.01.2020 : опубл. 05.06.2020 / Г.В. Подшивалова, А.Ю. Пикалов, **С.Е. Нескородов**; заявитель Акционерное общество «Концерн «Созвездие» (АО «Концерн «Созвездие»).