

На правах рукописи



Балзовский Евгений Владимирович

**ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ И ДИАПАЗОННЫЕ СВОЙСТВА
АНТЕНН ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), г. Томск и
Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор Кошелев Владимир Ильич

Научный консультант:
кандидат физико-математических наук, доцент Буянов Юрий Иннокентьевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Беляев Борис Афанасьевич
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск)

доктор физико-математических наук, профессор Гошин Геннадий Георгиевич
(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск)

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва.

Защита состоится 27 декабря 2013 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.04 при Национальном исследовательском Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, главный корпус, 119 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан “ 27 ” ноября 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Пойзнер Борис Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Использование коротких сверхширокополосных (СШП) импульсов, ширина спектра которых сопоставима с их средней частотой, позволяет на более высоком уровне решать задачи в радиосвязи, радионавигации и радиолокации – включая обнаружение и распознавание объектов. Применение коротких СШП электромагнитных импульсов нано- и субнаносекундной длительности связано с необходимостью извлечения максимума информации, содержащейся в отраженном от объекта поле: особенности временной формы импульсов, поляризационная структура, направление прихода волны для каждого импульса, отраженного от группы объектов или составных частей сложного зондируемого объекта.

Привлечение понятия поляризационной структуры (ПС), под которой понимается поведение конца вектора напряженности электрического поля \vec{E} в течение импульса, для описания СШП импульсов позволяет получить важный информационный признак при распознавании объектов. Измерение ПС состоит в регистрации трех ортогональных компонент \vec{E} в течение импульса, если направление на источник излучения неизвестно, или двух компонент в плоскости фронта волны, если такое направление известно. Для этого необходимы приемные антенны, обладающие следующим набором свойств: а) возможность одновременного измерения временной формы ортогональных компонент \vec{E} падающих СШП импульсов; б) наличие и постоянство фазового центра в полосе частот, занимаемых спектром импульса; в) возможность физического совмещения трех взаимно-перпендикулярных антенн в одной точке, либо возможность совмещения пары взаимно-перпендикулярных антенн в антенную решетку – синфазную или сканирующую.

Известные и широко применяемые антенны, способные регистрировать СШП импульсы, не удовлетворяют в полной мере указанным требованиям.

Состояние вопроса

Для увеличения дальности обнаружения в СШП импульсной радиолокации или глубины проникновения излучения в зондируемую поглощающую среду, необходимо наращивать энергетику излучающей системы и повышать чувствительность приемной системы. Вследствие противоречивости требований к передающей и приемной антеннам, естественным способом является разделение этих антенн в пространстве. Вопросам проектирования передающих антенн, специфике построения высоковольтных импульсных источников посвящено много работ, однако эти наработки не всегда пригодны для антенн, предназначенных для работы только в приемном режиме.

Исследование ПС электромагнитных импульсов основывается на регистрации компонент поля \vec{E} с минимальными искажениями временной

формы, минимальным шумом и максимальной чувствительностью. Приемная антенна как устройство, преобразующее энергию свободных электромагнитных волн в энергию токов в нагрузке антенны, должна удовлетворять критерию неискаженной передачи: постоянство амплитудной и линейность фазовой характеристики, сохранение диаграммы направленности и постоянство фазового центра в допустимых пределах в полосе частот, занимаемых спектром регистрируемых импульсов. В случае коротких импульсов нано- и субнаносекундной длительности параметры антенны должны сохраняться в гигагерцовом диапазоне в полосе не менее двух октав.

Для регистрации СШП импульсов с малыми искажениями временной формы традиционно используется *ТЕМ*-антенна [1*]. Действующая длина такой антенны, определяемая как отношение напряжения на выходе антенны к напряженности электрического поля подающей волны, постоянна в широкой полосе частот [2*]. Однако из-за больших габаритов невозможно расположить *ТЕМ*-антенны с совмещением фазовых центров для измерения ПС импульсов. Также габариты и особенности конструкции не позволяют использовать биконические [3*], диско-конусные [4*] антенны для одновременного измерения более одной компоненты поля \vec{E} в одной точке пространства.

Известны конструкции двухполяризационных антенных решеток [5*], элементами которой являются антенны с профилированным раскрытием (*TSA – tapered slot antenna*), размещенные в двух ортогональных плоскостях. Отношение крайних частот рабочей полосы в таких антеннах достигает шести и более [6*], однако фазовые центры элементов разнесены, что затрудняет регистрацию ПС импульсов при направлениях падения волны, отличных от нормального.

В коротковолновом диапазоне применяются так называемые векторные антенны, регистрирующие три компоненты \vec{E} , состоящие из трех взаимно ортогональных диполей [7*] и бивекторные – регистрирующие шесть компонент поля (векторов \vec{E} и \vec{H}), состоящие из пяти рамочных антенн [8*]. Известно применение векторных антенн для измерения мощности СШП сигналов [9*], но при этом антенна являлась датчиком поля и не регистрировала временную форму \vec{E} .

Для измерения ПС поля электромагнитных импульсов предпочтительно использование коротких дипольных антенн, длина которых не превышает минимальной длины волны в спектре регистрируемых импульсов. Такие антенны имеют устойчивый фазовый центр, слабо зависящие от частоты форму диаграммы направленности и поляризационную характеристику. К недостаткам металлических дипольных антенн можно отнести сильную частотную зависимость входного импеданса. Вопросам расширения полосы пропускания дипольных антенн, способных регистрировать короткие СШП импульсы, в доступной для ознакомления литературе уделено недостаточно внимания. Представляется необходимым раскрыть потенциальные возможности дипольных антенн при измерении координатных составляющих поля \vec{E} .

Цель работы

Выявление факторов уменьшения искажения формы принимаемых СШП импульсов и создание антенн для измерения поляризационной структуры импульсного поля.

Задачи исследований.

- Исследование факторов, влияющих на полосу пропускания приемных дипольных антенн с использованием модифицированного метода наложения бегущих волн. Разработка активных антенн и антенн на основе резистивных диполей для регистрации СШП импульсного излучения с малыми искажениями.
- Исследование факторов, влияющих на точность измерения поляризационной структуры импульсного электромагнитного поля с помощью векторных антенн.
- Разработка методики определения направления на источник импульсного электромагнитного поля при отличной от линейной поляризации падающего поля.
- Разработка векторных антенн, предназначенных для регистрации поляризационной структуры поля СШП импульсов при неизвестном направлении на источник излучения и определения направления на источник электромагнитных импульсов.
- Разработка двухполяризационных антенных решеток, предназначенных для регистрации поляризационной структуры поля СШП импульсов при известном направлении на источник излучения.

Методы проведения исследования

Для теоретического анализа факторов, влияющих на передаточную функцию и распределение тока вдоль приемного диполя использовался метод наложения бегущих волн и его модификация, предложенная в данной работе, позволяющая учесть потери в материале плеч диполя и взаимное влияние близкорасположенных диполей.

При определении направления прихода коротких СШП импульсов использовался метод измерения во временной области, позволяющий по осциллограммам, соответствующим трем ортогональным проекциям вектора напряженности электрического поля, с использованием аппарата линейной алгебры построить нормаль к плоскости фронта волны.

Для обеспечения требуемых характеристик несимметричного диполя в векторных антеннах использовался метод подавления синфазных токов, наведенных на фидере, с применением короткозамкнутого шлейфа.

При построении антенных решеток скрещенных диполей использовался блочный метод построения, позволяющий создавать большие антенные решетки с количеством элементов $2n \times 2m$.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Для расчета передаточной функции резистивного диполя с равномерным распределением сопротивления материала плеч в рамках метода наложения бегущих волн необходимо в выражении для потерь в диполе учесть погонные потери в материале наравне с потерями на излучение.

2. Регистрация сверхширокополосных импульсов с минимальными искажениями достижима использованием диполя и его нагрузки с близкими частотными зависимостями импедансов, а в качестве нагрузки диполя – активного четырехполюсника с коэффициентом передачи, спадающим с частотой.

3. Направление прихода одиночного СШП импульса излучения с отличной от линейной поляризацией определяется по трем измеренным проекциям годографа вектора напряженности электрического поля на оси антенного базиса путем определения нормали к плоскости, от которой среднеквадратичное отклонение точек годографа минимально.

4. При объединении скрещенных диполей в решетку с расстоянием между ними менее длины волны, соответствующей максимальной частоте спектра сверхширокополосного импульса по уровню -20 дБ, регистрация одновременно двух ортогональных компонент вектора напряженности электрического поля в пределах ширины диаграммы направленности антенной решетки по пиковой мощности реализуема с искажениями не более 20%.

Достоверность результатов:

Достоверность первого защищаемого положения подтверждается согласием результатов расчетов и измерений амплитудно-частотных характеристик резистивных диполей с различным погонным сопротивлением материала плеч, а также совпадением временной формы рассчитанных и измеренных импульсов в пределах 20% по среднеквадратичному критерию при погонном сопротивлении материала плеч диполя в диапазоне 7–40 кОм/м. При бóльшем погонном сопротивлении материала плеч сказывается влияние металлических контактных площадок, соединяющих резистивный слой с нагрузкой диполя, которые нельзя учесть в рамках разработанной методики расчета резистивного диполя.

Достоверность подхода, изложенного во втором защищаемом положении подтверждается совпадением формы импульсов напряжения на выходе дипольной активной антенны и *ТЕМ*-антенны с известными параметрами в пределах 15% по среднеквадратичному критерию для нескольких вариантов схемной реализации и различной топологии четырехполюсников, являющихся нагрузкой активной дипольной приемной антенны.

Достоверность третьего защищаемого положения подтверждается совпадением результатов измерения направления прихода волны импульсного электромагнитного поля с поляризацией, отличной от линейной (модуль отношения пиковой напряженности поля кроссполяризованной и основной компоненты равен 0.25) с заданным в эксперименте направлением на источник:

среднеквадратическое отклонение по азимуту составили 4 градуса и 1 градус по углу места.

Достоверность четвертого защищаемого положения подтверждается измерением поляризованной развязки между каналами антенной решетки, регистрирующими ортогональные компоненты импульсного поля, величина которой не менее 25 дБ.

Для обеспечения достоверности измерений амплитудных и временных значений нано- и субнаносекундных импульсов, а также частотных характеристик антенн и трактов использовалась современная измерительная техника: цифровые осциллографы реального времени *TDS7404* и *TDS6604* (*Tektronix*) с полосой пропускания 4 и 6 ГГц; цифровой стробоскопический осциллограф *TMR8112* (*TRIM*) с полосой пропускания 12 ГГц, измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения *8719ET* (*Agilent*) с рабочей полосой частот 13.5 ГГц, прецизионные аттенюаторы, разъемы и коаксиальные кабели с малыми потерями в полосе частот, занимаемой спектром регистрируемых импульсов.

Научная новизна

Предложена модификация метода наложения бегущих волн, позволяющая рассчитывать распределение тока вдоль плеч приемного диполя с равномерным погонным сопротивлением материала плеч диполя при произвольных импедансах концевых нагрузок.

Для расширения полосы пропускания дипольной антенны в сторону низких частот и регистрации СШП импульсов нано- и субнаносекундной длительности с малыми искажениями предложено использовать одновременно: активный четырехполюсник со спадающим с частотой коэффициентом передачи и ёмкостный характер импеданса нагрузки диполя.

Предложена методика определения направления прихода одиночного СШП электромагнитного импульса, основанная на вычислении собственных векторов и собственных чисел трехмерной ковариационной матрицы, элементами которой являются мгновенные значения компонент вектора напряженности электрического поля.

Научная ценность

Моделирование приемных дипольных антенн с резистивными плечами и равномерным распределением сопротивления материала вдоль плеч диполя при использовании предложенной модификации метода наложения бегущих волн показало существование взаимной связи между степенью искажения регистрируемых импульсов и чувствительностью таких антенн.

Использование активного четырехполюсника, встроенного в дипольную антенну, позволило расширить полосу пропускания антенны свыше двух октав и обеспечить регистрацию СШП импульсов нано- и субнаносекундной длительности с малыми искажениями.

Предложенный метод позволяет определять направление прихода одиночных коротких СШП импульсов, если годограф вектора напряженности электрического поля не является линией.

Практическая значимость

1. Для дипольных антенн с резистивными плечами найдено значение погонного сопротивления (20 кОм/м), с превышением которого искажения временной формы регистрируемых СШП импульсов наносекундной длительности не превышают 10%.

2. Обеспечение нагрузки диполя в виде активного четырехполюсника с заранее заданными частотными зависимостями входного импеданса и коэффициента передачи позволило создать активные дипольные приемные антенны (предназначенные для регистрации СШП электромагнитных импульсов нано- и субнаносекундной длительности), отличающиеся следующим сочетанием параметров: искажения временной формы не более 15%, динамический диапазон не менее 90 дБ при пиковой напряженности поля до 100 В/м, сохранение работоспособности после воздействия импульсных полей с напряженностью до 6 кВ/м.

3. Разработанные векторные антенны (представляющие собой три взаимно-перпендикулярных диполя) позволяют определять направление прихода одиночных импульсов, если они разнесены во времени и их поляризация отличается от линейной, чего нельзя достичь другими способами.

4. Исходя из содержания четвертого защищаемого создана 16-элементная двухполяризационная антенная решетка, позволяющая измерять поляризационную структуру импульсов субнаносекундной длительности. Динамический диапазон решетки не менее 100 дБ.

Внедрение результатов работы

1. Разработанные пассивные плоские антенны были использованы при выполнении контракта «Исследование и разработка сверхширокополосных антенн для связи» с Институтом передовых технологий компании «Самсунг» (SAIT), 2003 г., получено два зарубежных патента.

2. Методы, разработанные для создания СШП активных приемных антенн, были использованы при выполнении контракта «Исследование и разработка активных приемных антенн для приема наземного телевидения» с Институтом передовых технологий компании «Самсунг» (SAIT), 2006 г., получен зарубежный патент.

3. На основе диполей с резистивными плечами созданы антенны для измерения напряженности поля СШП электромагнитных импульсов, применяющиеся при научных исследованиях в ИСЭ СО РАН, Томск, в частности, в рамках Программы СО РАН по обеспечению импортозамещающим исследовательским оборудованием учреждений РАН, 2010 г.

4. Разработанная двухполяризационная активная антенна применяется для измерения ПС излучателей СШП импульсов, создаваемых в рамках

действующей Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы импульсной сильноточной электроники».

Апробация работы

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на следующих научных конференциях: *13-th International Pulsed Power Conference (Las Vegas, USA, 2001)*; XII Всероссийской школе-конференции по дифракции и распространению волн (Москва, Россия, 2001); Всероссийской научной конференции «Физика радиоволн» (Томск, Россия, 2002); *6-th Ultra-Wideband, Short-Pulse Conference (Annapolis, USA, 2002)*; Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» (Муром, 2003); Международной конференции «Современные проблемы физики и высокие технологии» (Томск, Россия, 2003); *7-th Ultra-Wideband, Short-Pulse Conference (Magdeburg, Germany, 2004)*; Международной конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, Россия, 2005); Международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, Россия, 2006 и 2010); Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития» (Томск, Россия, 2007); *15-th International Symposium on High Current Electronics* (Томск, Россия, 2008); III и V Всероссийских научно-технических конференциях «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, Россия, 2009, 2011).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 статей, 14 докладов и 3 тезиса докладов в трудах конференций, получено 3 зарубежных патента.

Личный вклад автора

Основные результаты диссертации получены лично автором, либо при его прямом участии. Автором были проведены численные и натурные эксперименты и выполнен анализ полученных результатов, разработаны алгоритмы и программы обработки результатов измерений.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 152 страницы, включая 83 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 110 наименований.

Основное содержание диссертационной работы

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность, определяется тематика и формулируется цель работы, кратко излагаются основные задачи исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. Рассматриваются реализованные к настоящему времени СШП приемные антенны с точки зрения

возможности использования их в качестве элементов антенных решеток для измерения ПС импульсного поля. Проводится анализ передаточной функции дипольной антенны для выявления факторов, влияющих на точность регистрации формы импульсов электромагнитного излучения.

На основе проведенного анализа обсуждается необходимость развития простого подхода для расчета напряжения в нагрузке и распределения тока вдоль плеч приемного диполя с резистивными плечами. В конце главы формулируются задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованию одиночной дипольной антенны. Предложена модификация метода наложения бегущих волн [10*], позволяющая рассчитывать диполи с резистивными плечами непосредственно в приемном режиме при произвольной нагрузке. Суть метода заключается в том, что волны тока, наведенного падающим под углом θ полем на элементарном участке приемного прямолинейного проводника длиной L в результате многократных отражений от торцов диполя, складываются в точке наблюдения z , образуя геометрические прогрессии, суммирование которых приводит к следующему выражению для распределения тока вдоль плеча диполя:

$$I_1(z) = \int_z^L dI_1 + \int_0^z dI_1', \quad \text{где} \quad (1)$$

$$dI_1 = \frac{E(\zeta) \sin(\theta) e^{ik\zeta \cos(\theta)}}{2\rho} \frac{e^{i\gamma(\zeta-z)} + \Gamma_1 e^{i\gamma(\zeta+z)} + \Gamma_L e^{2i\gamma L} (e^{-i\gamma(\zeta+z)} + \Gamma_1 e^{-i\gamma(\zeta-z)})}{1 - \Gamma_1 \Gamma_L e^{2i\gamma L}} d\zeta,$$

$$dI_1' = \frac{E(\zeta) \sin(\theta) e^{ik\zeta \cos(\theta)}}{2\rho} \frac{e^{-i\gamma(\zeta-z)} + \Gamma_1 e^{i\gamma(\zeta+z)} + \Gamma_L e^{2i\gamma L} (e^{-i\gamma(\zeta+z)} + \Gamma_1 e^{i\gamma(\zeta-z)})}{1 - \Gamma_1 \Gamma_L e^{2i\gamma L}} d\zeta,$$

Γ_L и Γ_1 – коэффициенты отражения от импеданса нагрузки и свободного конца плеча диполя, γ – постоянная распространения волны вдоль проводника, ρ – волновое сопротивление проводника.

Модификация метода заключается в том, что для резистивного диполя потери в материале плеч с погонным сопротивлением R' нужно учитывать аналогично погонным потерям на излучение R'_Σ , что приводит к выражению для потерь в проводнике: $\alpha = (2R' + R'_\Sigma)/\rho$. Тогда выражения для постоянной распространения волны тока вдоль проводника и волнового сопротивления проводника с бегущей волной тока, можно записать:

$$\gamma = k \sqrt{1 - i \frac{\alpha}{k}}, \quad \rho = \rho_0 \sqrt{1 - i \frac{\alpha}{k}}.$$

Для расчета γ и ρ используется итерационная процедура с начальным приближением $R'_\Sigma = 0$, что соответствует $\alpha = 0$, $\gamma = k$, $\rho = \rho_0$, где k – волновое число, ρ_0 – волновое сопротивление металлического диполя. С этими

значениями вычисляется распределение тока и R'_Σ , которое используется для определения γ и ρ для следующей итерации. Итерационный процесс быстро сходится: для металлического диполя и малых R' достаточно 4–5 шагов, при больших значениях R' процесс сходится на 3 шаге.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазочастотная характеристика (ФЧХ) диполя при нормальном падении волны приведены на рисунке 1 (длина диполя $2L = 0.2$ м, импеданс нагрузки $Z_H = 600$ Ом). С увеличением погонного сопротивления уменьшается неравномерность АЧХ и ФЧХ, что приводит к уменьшению среднеквадратического отклонения σ временной формы импульса в нагрузке диполя относительно формы падающего поля, и уменьшению чувствительности диполя (рисунок 2).

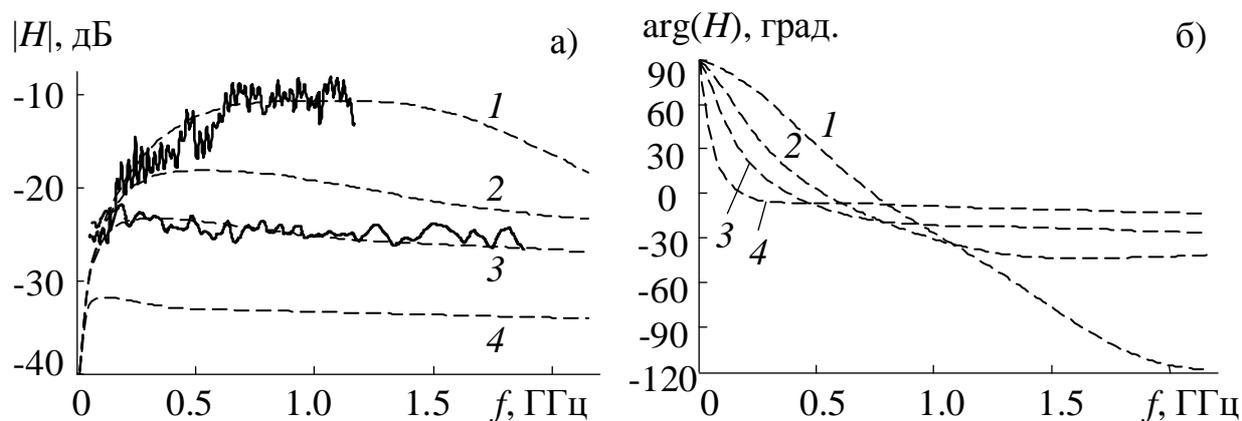


Рисунок 1 – АЧХ (а) и ФЧХ (б) диполя. $R' = 0$ (1); $7 \cdot 10^3$ (2); $2 \cdot 10^4$ (3); $9 \cdot 10^4$ (4) Ом/м. Сплошные кривые – измерения, штриховые – расчет

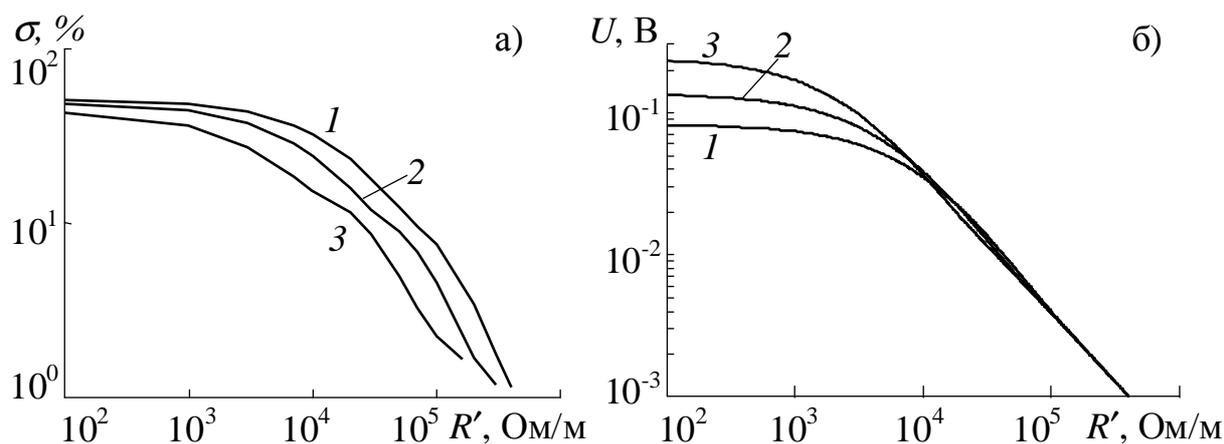


Рисунок 2 – Зависимость искажений формы импульса (а) и пиковое значение сигнала в нагрузке диполя (б) от R' . 1 – $2L = 0.15$ м, 2 – 0.2 м, 3 – 0.3 м

Для уменьшения искажений регистрируемых СШП импульсов и увеличения чувствительности предлагается использовать в качестве нагрузки диполя импеданс активного четырехполюсника. На эквивалентной схеме

диполь может быть представлен источником ЭДС с внутренним импедансом $Z_{\text{д}}$, нагруженным на входной импеданс $Z_{\text{вх}}$ четырехполюсника с коэффициентом передачи K_U . При нормальном падении волны напряжение V на нагрузке четырехполюсника равно: $V = E L_e$, где $L_e = l_{\text{д}} K_U Z_{\text{вх}} / (Z_{\text{д}} + Z_{\text{вх}})$ – эквивалентная действующая длина антенны, которую можно трактовать как передаточную функцию диполя. Для выполнения $V/E = L_e = \text{const}$ есть три основных способа.

1) В случае короткого диполя частотная зависимость L_e определяется частотными зависимостями K_U и $Z_{\text{д}}/Z_{\text{вх}}$. Полагая, что K_U не зависит от параметров диполя, и реализован четырехполюсник с постоянным K_U в широкой полосе частот, то для расширения полосы пропускания коротких антенн прежде всего необходимо, чтобы в заданной полосе частот

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \left(1 + Z_{\text{д}}/Z_{\text{вх}} \right) = \left(Z_{\text{вх}} \frac{\partial Z_{\text{д}}}{\partial \omega} - Z_{\text{д}} \frac{\partial Z_{\text{вх}}}{\partial \omega} \right) / Z_{\text{вх}}^2 \Rightarrow 0, \quad (2)$$

где ω – круговая частота. Это можно обеспечить, если $|Z_{\text{вх}}| \gg |Z_{\text{д}}|$, тогда $L_e = l_{\text{д}} K_U$ и частотная зависимость L_e определяется только частотной зависимостью K_U . На частотах до 1-2 ГГц применение широкополосных ферритовых трансформаторов позволяет получить $Z_{\text{вх}} \approx 600$ Ом. $Z_{\text{д}}$ короткого диполя имеет ёмкостный характер и его величина может достигать сотен Ом, что затрудняет выполнение условия $|Z_{\text{вх}}| \gg |Z_{\text{д}}|$ при использовании пассивного четырехполюсника.

2) Обеспечение одинаковых или близких частотных зависимостей $Z_{\text{д}}$ и $Z_{\text{вх}}$. Тогда даже при $|Z_{\text{вх}}| \leq |Z_{\text{д}}|$ можно обеспечить выполнение условия (2). Поскольку $Z_{\text{д}}$ короткого диполя носит ёмкостный характер, то $Z_{\text{вх}}$ четырехполюсника тоже должен иметь ёмкостный характер, причем как и для диполя должно выполняться условие $\text{Re } Z_{\text{вх}} \ll \text{Im } Z_{\text{вх}}$. Диполь становится рассогласованным с $Z_{\text{вх}}$, но потери могут быть скомпенсированы вносимым усилением.

3) Выбор соответствующей частотной зависимости K_U четырехполюсника для компенсации низкой эффективности диполя на низких частотах.

В работе приводится описание конструкций активных приемных антенн на основе короткого диполя и активного симметричного четырехполюсника, выполненного по схеме с общим истоком. Приводятся результаты измерений АЧХ, ФЧХ и шумовых характеристик. На рисунке 3 приведены измеренные частотные зависимости входного импеданса активного четырехполюсника и рассчитанный импеданс диполя длиной 50 мм. На рисунке 4 приведены временные формы СШП импульсов на выходе активной антенны размером 4.5×4×0.5 см и действующей длиной 1.4 см в сравнении с импульсами, зарегистрированными эталонной ТЕМ-антенной размером 120×50×8 см и действующей длиной 4 см. Искажения формы импульсов не превышают значения $\sigma = 15\%$.

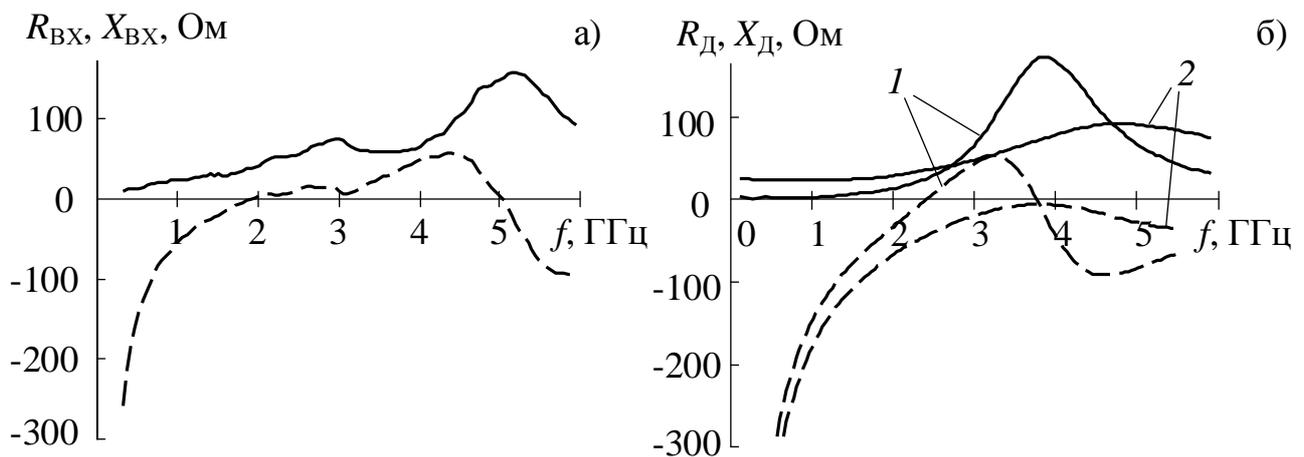


Рисунок 3 – Входное сопротивление канала активного элемента (а); импеданс металлического (1) и резистивного (2) диполей (б). Сплошные кривые – активное сопротивление, штриховые кривые – реактивное

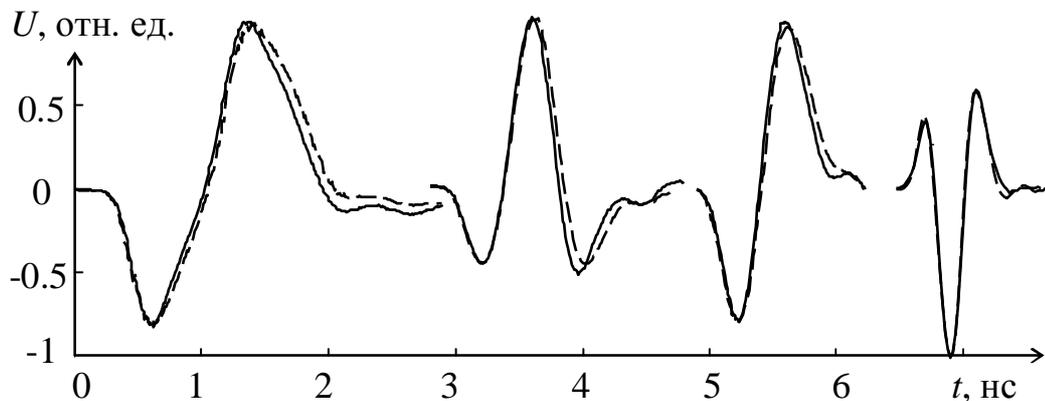


Рисунок 4 – Формы импульсов, зарегистрированных активной антенной (сплошные кривые) и *TEM*-антенной (штриховые кривые)

В третьей главе рассматриваются взаимно перпендикулярные дипольные антенны для регистрации двух или трех ортогональных компонент вектора напряженности электрического поля импульсного излучения.

Предложенная модификация метода наложения бегущих волн позволяет рассчитать распределение тока вдоль плеч приемного диполя. Используя найденный ток, можно рассчитать переизлученное поле в точках соседних диполей, тем самым учесть взаимное влияние диполей в однократном приближении. Проведены исследования по выявлению влияния отклонения относительного расположения диполей от взаимно перпендикулярного и от смещения центров диполей. Из представленных результатов расчетов (рисунок 5) при допустимом уровне взаимодействия $M_{ВЗ} = -30$ дБ отклонение ξ от перпендикулярного расположения не должно превышать 2° для металлических диполей и 4° для резистивных диполей. Сдвиг центров m как для металлических, так и для резистивных диполей не должен превышать 3% от

длины плеча. Такая точность изготовления ВПА вполне реализуема на практике.

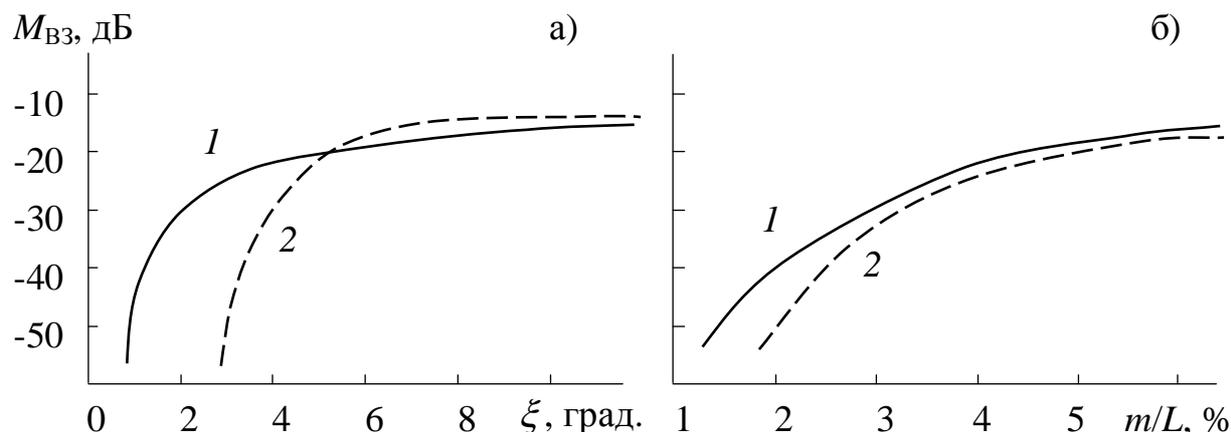


Рисунок 5 – Зависимость меры взаимодействия для металлических (1) и резистивных диполей с $R' = 2 \cdot 10^4$ Ом/м (2) от угла ξ при $m = 0$ (а) и сдвига m при $\xi = 0$ (б)

Приведены конструкции и результаты измерений направленных свойств разработанных пассивных и активных векторных приемных антенн (ВПА), вертикальный канал которых выполнен в виде несимметричного диполя, верхнее плечо 1 (рисунок 6) которого подключено ко входу четырехполосника, а нижнее плечо 2 выполнено в виде металлической полусферы, содержащей в себе электронные компоненты, и короткозамкнутого отрезка коаксиальной линии, служащей запирающим стаканом для токов, наведенных падающим полем на внешней оплетке фидера 3.

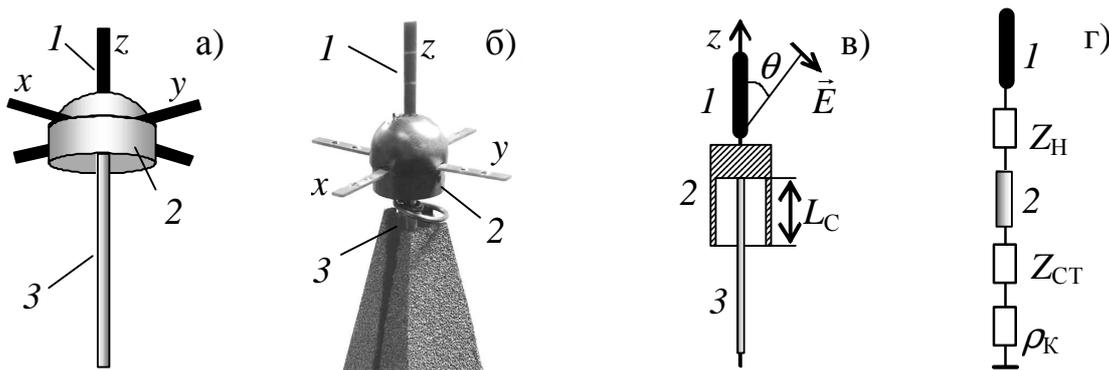


Рисунок 6 – Внешний вид пассивной резистивной ВПА (а); активной ВПА (б); схематическое изображение несимметричного диполя (в); и его эквивалентная схема (г). 1 и 2 – верхнее и нижнее плечи диполя; 3 – внешняя оплетка фидера

Распределение тока в резистивном плече рассчитывается по формуле (1) при $\Gamma_1 = -1$ для разомкнутого конца плеча и

$\Gamma_L = (\rho - Z_H - Z_{2BX}) / (\rho + Z_H + Z_{2BX})$, где Z_{2BX} – импеданс металлического плеча (линии длиной L_2 с постоянной распространения γ_2), нагруженного на последовательно включенные сопротивление запирающего стакана Z_{CT} и волновое сопротивление ρ_K одиночного провода, образованного внешней оплеткой фидера:

$$Z_{2BX} = \rho_2 \frac{Z_{CT} + \rho_K + i\rho_2 \operatorname{tg} \gamma_2 L_2}{\rho_2 + i(Z_{CT} + \rho_K) \operatorname{tg} \gamma_2 L_2}.$$

Расчет распределения тока в нижнем плече проводится аналогично с использованием выражения (1). При определении коэффициентов отражения принимается во внимание, что с одной стороны нижнее плечо нагружено на $Z_H + Z_{1BX}$, где $Z_{1BX} = -i\rho \operatorname{ctg} \gamma L_2$ – импеданс верхнего плеча, а с другой стороны

$$\Gamma_2 = \frac{\rho_2 - (\rho_K + Z_{CT})}{\rho_2 + \rho_K + Z_{CT}}.$$

Сопротивление запирающего стакана определяется как сопротивление короткозамкнутого отрезка длиной L_{CT} коаксиальной линии с внутренним и внешним диаметрами d и D соответственно:

$$Z_{CT} = i60 \ln \frac{D}{d} \operatorname{tg} kL_{CT}.$$

Для уменьшения влияния фидера и приближения характеристик несимметричного диполя к характеристикам симметричных диполей необходимо, чтобы $\Gamma_2 \rightarrow -1$ и $Z_{CT} \gg \rho_K$, поэтому глубина стакана L_{CT} и диаметр D выбираются из условия максимума Z_{CT} на средней частоте в спектре регистрируемых импульсов. Расчеты показали, что длина L_2 металлического плеча должна быть примерно равна $1/4$ длины волны на центральной частоте спектра сигнала.

С использованием разработанных ВПА исследована ПС импульсного излучения уединенного СШП источника, а также поля, отраженного от объектов, выявлены особенности ПС и взаимосвязь с положением зондируемого объекта в пространстве.

На рисунке 7 приведены измеренные годографы \vec{E} излучения комбинированной антенны [11*] с линейной поляризацией в главном направлении при отклонении в H -плоскости на 15, 30, 45 и 60 градусов от направления максимума излучения. Наличие кроссполаризованной компоненты с временной формой, отличной от основной поляризации, приводит к возникновению годографа в виде замкнутой фигуры, форма которой может

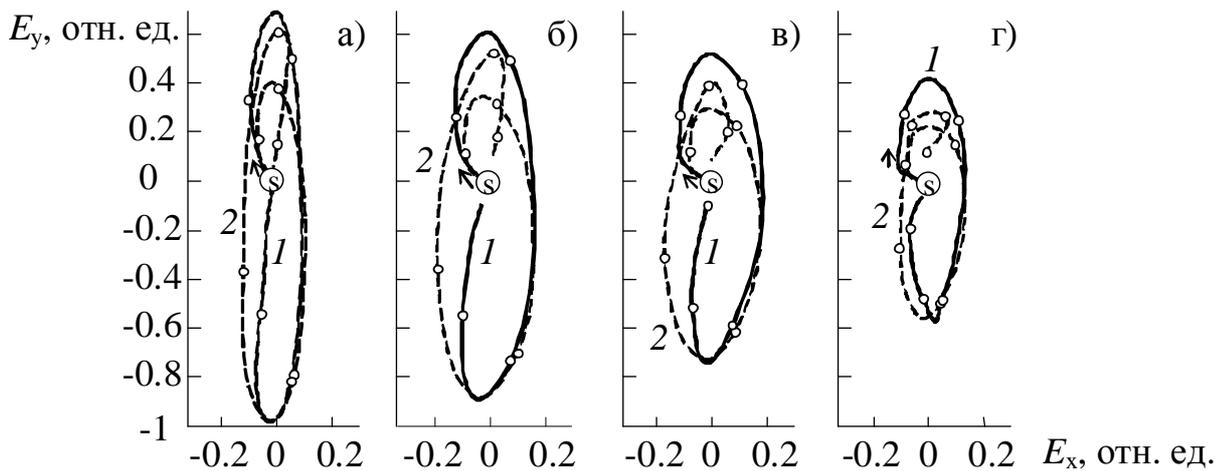


Рисунок 7 – ПС излучения СШП передающей антенны при возбуждении 1 нс монополярным импульсом (1); 2 нс биполярным импульсом напряжения (2) при отклонении на 15 (а); 30 (б); 45 (в) и 60 градусов (г) от максимума ДН

считаться характеристикой конкретного излучателя при известном возбуждающем импульсе напряжения.

На рисунке 8 приведены измеренные годографы излучения, отраженного от удаленного объекта – металлической полосы длиной 1.1 и шириной 0.33 пространственной протяженности импульса (ψ – угол поворота пластины относительно вертикального положения). Объект облучался линейно поляризованным СШП импульсным излучением, наличие кроссполяризованной компоненты в отраженном поле приводит к изменению формы годографа, направления вращения \vec{E} (рисунок 8), что может служить информационным признаком в задачах распознавания.

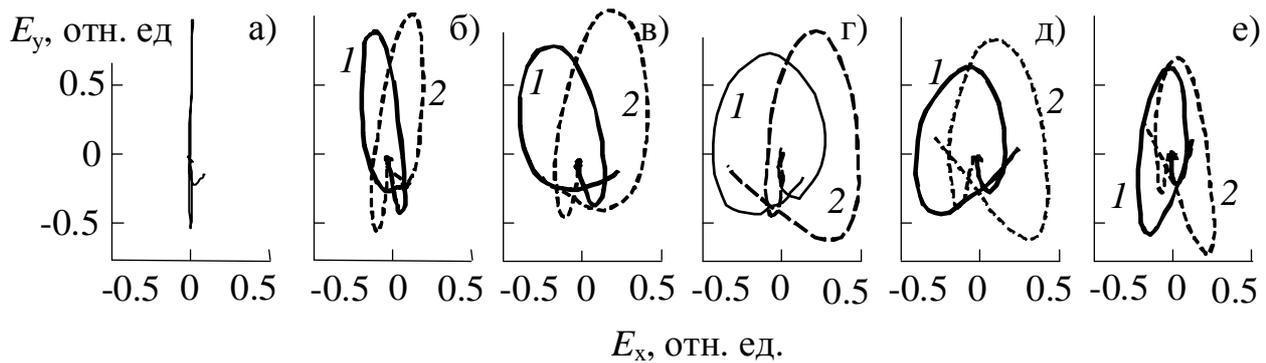


Рисунок 8 – ПС отраженного импульсного поля; $\psi = 0$ (а); $\pm 15^\circ$ (б); $\pm 30^\circ$ (в), $\pm 45^\circ$ (г); $\pm 60^\circ$ (д); $\pm 75^\circ$ (е). 1 – $\psi > 0$; 2 – $\psi < 0$

С помощью векторной антенны, состоящей из трех взаимно перпендикулярных диполей, показана возможность определения направления прихода импульсного СШП излучения с поляризацией, отличной от линейной. Предложено два алгоритма.

Первый состоит из двух частей: а) оценка положения плоскости фронта волны в системе координат, связанной с ВПА, по трем точкам – центр системы координат, точка максимума годографа \vec{E} и точка годографа \vec{E} , которая находится из условия перпендикулярности отрезков, соединяющих эти две точки с центром системы координат; б) уточнение положения плоскости фронта волны (с учетом найденного начального приближения) из условия минимизации среднеквадратичного отклонения всех точек годографа в течении импульса или его части от искомой плоскости. Направление нормали \vec{n} к найденной плоскости совпадает с направлением на источник излучения с точностью до знака (рисунок 9).

Второй алгоритм основан на поиске собственных чисел и собственных векторов ковариационной матрицы, элементы которой определяются выражением:

$$c_{ij} = M(a_i - Ma_i)(a_j - Ma_j),$$

где Ma_i – математическое ожидание; $i, j = 1, 2, 3$; вектора значений $a_1 = E_x$, $a_2 = E_y$ и $a_3 = E_z$ имеют одинаковую размерность, равную количеству временных отсчетов в осциллограммах принятых импульсов. Собственные

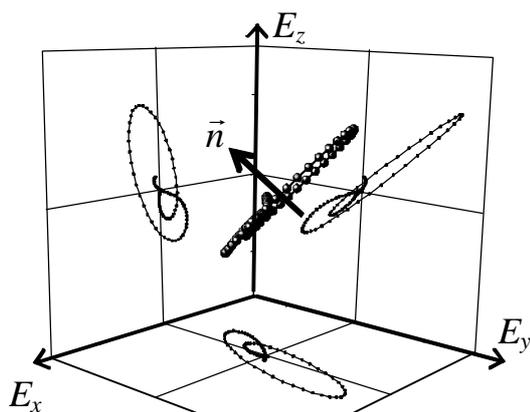


Рисунок 9 – Годограф \vec{E} и его проекции

числа и собственные векторы матрицы (c_{ij}) определяют величины и направления осей эллипсоида, который является поверхностью уровня относительной функции распределения точек годографа \vec{E} . Направление наименьшей из осей эллипсоида с точностью до знака совпадает с направлением прихода СШП импульса.

Приводятся результаты экспериментальных исследований по определению направления прихода импульсного излучения нано- и субнаносекундной длительности.

В четвертой главе показаны особенности антенных решеток при приеме коротких СШП импульсов, представлены конструкции и результаты измерений характеристик двухполяризационных антенных решеток на основе плоских пассивных печатных антенн и на основе активных резистивных диполей.

Предложен подход к построению двухполяризационных синфазных антенных решеток на основе скрещенных активных диполей, предназначенных для регистрации взаимно перпендикулярных компонент вектора напряженности электрического поля СШП импульсов. Отличительной особенностью является сложение сигналов с одноименных плеч диполей и выделение на выходе антенной решетки противофазных составляющих.

Применен модульный принцип, позволяющий создавать большие ($2n \times 2m$) приемные антенные решетки для применения в радарх с поляризационными измерениями. На основе разработанного антенного модуля (2×2), построена и исследована 16-элементная двухполяризационная антенная решетка с динамическим диапазоном не менее 100 дБ (рисунок 10). Временная форма импульсов, принятых одним каналом решетки и эталонной ТЕМ-антенной, приведены на рисунке 11. Экспериментально установлено, что работоспособность антенной решетки восстанавливается после воздействия импульсов с напряженностью электрического поля до 6 кВ/м. При соответствующей системе защиты от попадания прямого излучения передающей антенны, антенная решетка может быть использована в СШП радаре с большой пиковой мощностью.

Показано, что скрещенные активные диполи позволяют с малыми искажениями регистрировать импульсы излучения длительностью 0.5–1.5 нс при напряженности поля до 100 В/м. Поляризационная развязка скрещенных диполей составила не менее 25 дБ и она не ухудшается при увеличении числа элементов решетки. В пределах ширины диаграммы направленности решетки по половинной мощности искажения формы импульсов не превышают 20% по отношению к форме импульсов в главном направлении вне зависимости от количества элементов.

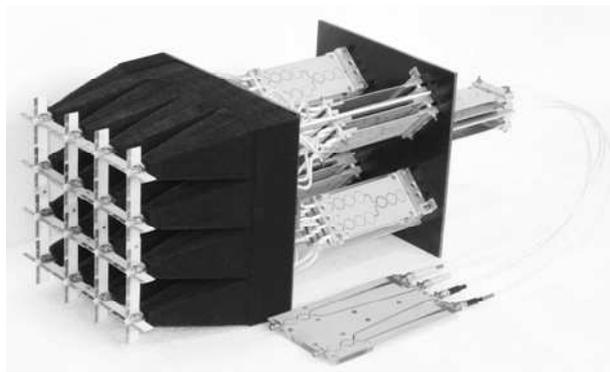


Рисунок 10 – Двухполяризационная активная приемная антенная решетка

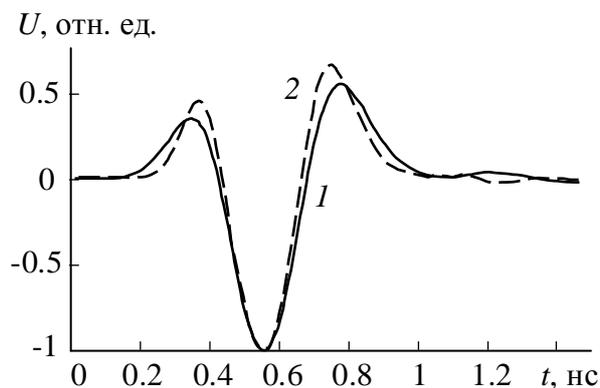


Рисунок 11 – Форма принятых импульсов. 1 – антенная решетка 4×4 ; 2 – ТЕМ-антенна

В заключении сформулированы основные научные результаты и выводы диссертационной работы.

В приложении приводятся данные об использовании результатов работы автора при выполнении международных контрактов.

Основные результаты и выводы

1. Исследованы факторы, влияющие на полосу пропускания приемных дипольных антенн. Показано, что для уменьшения искажения формы регистрируемых СШП импульсов необходимо использовать одновременно несколько приемов: рассогласование диполя в сторону увеличения сопротивления нагрузки, использование активных элементов с определенной частотной зависимостью входного импеданса и спадающим с частотой коэффициентом усиления, внесение резистивных элементов в конструкцию плеч диполя.

2. Для расчета распределение тока вдоль плеч и тока в нагрузке резистивного диполя с равномерно распределенным сопротивлением модифицирован метод наложения бегущих волн: влияние сопротивления потерь в материале плеч диполя на постоянную распространения волны и волновое сопротивление плеч учитывается наравне с влиянием потерь на излучение. Составлена программа расчета токов, начальным приближением для которой является диполь без потерь, учет потерь реализован в виде итерационной процедуры, которая сходится на 4-5 шагах для металлического диполя и на 3 шаге для резистивного. Показано, что при погонном сопротивлении плеч диполя свыше 20 кОм/м искажения временной формы импульсов напряжения на выходе резистивного диполя не превышают 10% от временной формы импульса падающего поля.

3. Исследованы факторы, влияющие на точность измерения поляризационной структуры импульсного электромагнитного поля с помощью векторных антенн. Расчет распределения тока вдоль плеч приемного диполя позволяет вычислить переизлученное поле в точках соседнего диполя и определить вклад наведенного тока на точность регистрации компонент падающего поля. Показано, что при допустимом уровне взаимодействия -30 дБ отклонение от перпендикулярного расположения не должно превышать 2° для металлических диполей и 4° для резистивных диполей. Сдвиг центров как для металлических, так и для резистивных диполей не должен превышать 3% от длины плеча.

4. Разработана конструкция и исследованы характеристики активной антенны на основе симметричного диполя и активного элемента на полевых транзисторах. На частотах 0.4-2 ГГц использован рассогласованный режим: измеренное входное сопротивление активного элемента имеет ёмкостный характер, такой же импеданс имеет короткий диполь. На частотах 2-5 ГГц импеданс активного элемента носит индуктивный характер, диполь согласован с нагрузкой. Низкая эффективность диполя в области низких частот скомпенсирована уменьшением коэффициента усиления активного элемента с частотой. Созданная дипольная активная антенна позволяет регистрировать СШП импульсы длительностью 0.7-2 нс с искажениями временной формы менее 15%.

5. Разработана методика определения направления на источник импульсного электромагнитного поля при отличной от линейной поляризации падающего поля.

6. Разработана векторная антенна, предназначенная для регистрации поляризационной структуры поля СШП импульсов при неизвестном направлении на источник излучения и определения направления на источник электромагнитных импульсов.

7. Разработана двухполяризационная антенная решетка, предназначенная для регистрации поляризационной структуры поля СШП импульсов при известном направлении на источник излучения.

Использованная литература

- 1*. Lee R.T., Smith G.S. A design study for the basic TEM horn antenna // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2004. – Vol. 46, No. 1. – P. 86-92.
- 2*. Андреев Ю. А., Кошелев В. И., Плиско В. В. Характеристики TEM антенн в режимах приема и излучения // Доклады 5-ой Всероссийской научно-технической конференции "Радиолокация и радиосвязь", Москва, 21-25 ноября, 2011. – С. 77-82.
- 3*. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design / C. A. Balanis. 2nd ed. – John Wiley & Sons, 1997. – 960 p.
- 4*. Milligan T. A. Modern Antenna Design / Thomas A. Milligan. 2nd ed. Willey Interscience // IEEE Press, 2005. – 632 p.
- 5*. Hemmi C., Dover R.T., German F., Vespa A. Multifunction Wide-Band Array Design // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1999. – Vol. 47. – No.3. – P. 425-431.
- 6*. Erickson R., Ouacha A., Carlegrim B. et al. Dual Polarized Wideband Antenna Arrays With Reconfigurable Beamforming and Beamshaping // Proc. "EuCAP 2006", Nice, France, 6-10 Nov. 2006. – P. 1867-1870.
- 7*. Пономарев Г. А., Куликов А. Н., Тельпуховский Е. Д. Распространение УКВ в городе. – Томск: Изд-во «РАСКО», 1991. – 224 с.
- 8*. Патент РФ №2193265. Активная петлевая антенна (варианты). / Авт. изобрет.: Бульбин Ю. В., Буянов Ю. И., Винокуров А. А., Чуйков В. Д., Якубов В. П. – Опубл. 20.11.2002.
- 9*. Кинг. Р., Смит Г. Антенны в материальных средах: В 2-х книгах. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 824 с.
- 10*. Лавров Г. А., Князев А. С. Приземные и подземные антенны. – М.: Сов. радио, 1965. – 472 с.
- 11*. Koshelev V. I., Buyanov Yu. I., Andreev Yu. A., Plisko V. V., Sukhushin K. N. Ultrawideband radiators of high-power pulses // Proc. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf. – 2001. – V. 2. – P.1661-1664.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Сверхширокополосная дипольная антенна с резистивными плечами // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49, №4. – С. 460-465.
2. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Векторная приемная антенна для измерения поляризационной структуры сверхширокополосных электромагнитных импульсов // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 8. – С. 938-947.
3. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Активная антенна для измерения импульсных электрических полей // Известия вузов. Физика. – 2007. – Т. 50. – №5. – С. 82-86.
4. Yoon I. J., Balzovsky E., Buyanov Yu., Park S. H., Kim Y. E., Koshelev V. Active Integrated Antenna for Mobile TV Signal Reception // Microwave and Optical Technology Letters. – 2007. – Vol. 49, No. 12. – P. 2998-3001.
5. Kwon D. H., Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I., Kim Y., Koshelev V. I. Small Printed Combined Electric-Magnetic Type Ultrawideband Antenna with Directive Radiation Characteristics // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 2008. – V. 56. – No. 1. – P. 237-241.
6. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Двухполяризационная приемная антенная решетка для регистрации сверхширокополосных импульсов // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55. – № 2. – С. 184-192.

Патенты

7. Kwon D. H., Kim Y. J., Lee S. S., Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I., Koshelev V. I. Small Ultra Wide-Band Antenna Having Uni-Directional Radiation Pattern. – Patent KR20060084347. – Jul. 24, 2006.
8. Park S. H., Yoon B. T., Kim Y. E., Yoon I. J., Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I., Koshelev V. I. Active Antenna Able to Transmit and Receive for Wireless Signal and Mobile Communication Terminal thereof. – Patent KR100822475B1. – Apr. 16, 2008.
9. Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I., Kim Y. J., Koshelev V. I., Kwon D. H., Lee S. S. Small Ultra Wideband Antenna Having Unidirectional Radiation Pattern. – Patent US7589686B2. – Sep. 15, 2009.

Сборники трудов, материалы конференций и тезисы докладов

10. Koshelev V. I., Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I. Investigation of polarization structure of ultrawideband radiation pulses // Proc. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf. – 2001. – V. 2. – P. 1657-1660.
11. Балзовский Е. В. Сверхширокополосная дипольная приемная антенна // Труды XII Всероссийской школы-конференции по дифракции и распространению волн. – Москва: Изд-во МФТИ. – 2001. – Т. II. – С. 316-317.

12. Балзовский Е. В. Сверхширокополосная дипольная антенна // Труды Всероссийской научной конференции «Физика радиоволн». – Томск: Изд-во ТГУ. – 2002. – С. VI-20 - VI-23.
13. Koshelev V. I., Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I. Vector receiving antenna for ultrawideband radar polarimetry // Proc. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 6. – 2003. – P. 511-522.
14. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Коньков П. А., Кошелев В. И. Исследование пространственно-временной поляризационной структуры импульсов сверхширокополосного излучения // Сборник докладов Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». – Муром: Изд.-полигр. центр МИ ВлГУ. – 2003. – С. 204-208.
15. Балзовский Е. В. Исследование поляризационной структуры сверхширокополосных электромагнитных импульсов // Материалы Межд. конф. "Современные проблемы физики и высокие технологии". – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – С. 411-413.
16. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Векторная приемная антенна для исследования поляризационной структуры импульсного сверхширокополосного излучения // Труды III Международной конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: Изд-во ТУСУР – 2005. – С. 139-141.
17. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Сверхширокополосная активная приемная антенна // Известия вузов. Физика. – 2006. – № 9, Приложение. – С. 14-18.
18. Koshelev V. I., Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I., Konkov P. A., Sarychev V. T., Shipilov S. E. Radar Signal Polarization Structure Investigation for Object Recognition // Proc. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 7. – 2007. – P. 707-714.
19. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Элемент активной приемной двухполяризационной антенной решетки // Доклады Международной научно-практической конф. «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». – Томск: В-Спектр. – 2007. – Ч. 1. – С. 155-158.
20. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Исследование и разработка активной векторной антенны для приема сверхширокополосных субнаносекундных импульсов // Известия вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – №9/2. – С. 11-12.
21. Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I., Koshelev V. I. Characterization of active ultrawideband array antennas with dual polarization // Proc. 15th Int. Symp. on High Current Electronics. – 2008. – P. 418-421.
22. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Малогабаритная плоская антенна как элемент сверхширокополосной двухполяризационной решетки // Труды III Всероссийской научно-технической конференции

- «Радиолокация и радиосвязь». – 2009. – М.: Изд-во ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. – Т.1. – С. 39-43.
23. Балзовский Е. В., Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Активная антенная решетка для приема импульсов с произвольной поляризацией // Труды III Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – 2009. – М.: Изд-во ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. – Т.1. – С. 66-70.
24. Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I., Koshelev V. I. Characterization of Active Vector Receiving Antenna // Proc. 16th Inter. Symp. on High Current Electronics. – 2010. – P. 451-454.
25. Koshelev V. I., Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I. Ultra-wideband active receiving array antenna with dual polarization // Proc. Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9 / Edited by F. Sabath et al. – 2010. – New York: Springer. – P. 269-276.
26. Kwon D. H., Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I., Kim Y., Koshelev V. I. Small printed ultra-wideband antenna combining electric- and magnetic-type radiators // Proc. Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9 / Edited by F. Sabath et al. – 2010. – New York: Springer. – P. 425-431.

Подписано в печать 25.11.2013 г.
Отпечатано в ООО «Луна-принт»:
г. Томск, пр. Фрунзе, 240а, стр. 11
тел. 23-45-60
Тираж 100 экз.