

На правах рукописи

**Андреев Юрий Анатольевич**

**КОМБИНИРОВАННЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ МОЩНЫХ  
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико–математических наук

Томск – 2006

Работа выполнена в Институте сильноточной электроники СО РАН

Научный руководитель:

доктор ф.-м. наук, профессор Кошелев Владимир Ильич

Научный консультант:

кандидат ф.-м. наук, доцент Буянов Юрий Иннокентьевич

Официальные оппоненты:

доктор ф.-м. н., профессор Гошин Геннадий Георгиевич (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники),

кандидат ф.-м. наук, ст. н. с. Чуйков Вячеслав Дмитриевич (Сибирский физико-технический институт)

Ведущая организация:

Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург.

Защита состоится 1 февраля 2007 г. в 14.30

на заседании диссертационного совета Д 212.267.04

при 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 “ ” декабря 2006 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Б. Н. Пойзнер

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Развитие импульсной и антенно-фидерной техники в различных лабораториях мира, позволило создать источники сверхширокополосного (СШП) излучения нано- и субнаносекундной длительности, перспективные для использования в различных областях науки и техники. Возможные применения таких источников – это подземная радиолокация и поиск мин, радиолокация лесных массивов и аэрокосмических объектов, воздействие на объекты и среды, в том числе биологические, электромагнитная совместимость. Преимуществами СШП радиолокации являются высокая разрешающая способность, вследствие короткой длительности импульса, и увеличение информативности излучения, рассеянного объектами, обусловленное большой шириной спектра. Для целей радиолокации аэрокосмических объектов на расстояниях до 100 км необходимы источники СШП излучения с длительностью  $\sim 1$  нс и пиковой мощностью 1-10 ГВт. Существующие в настоящее время мощные источники СШП излучения строятся по схемам: один генератор – одна передающая антенна, один генератор – антенная решетка либо – антенная решетка, каждый элемент которой возбуждается своим генератором. Антенные решетки с управляемым временем задержки входного импульса на каждом элементе (сканирующие антенные решетки) являются, вероятно, самыми перспективными излучателями для радиолокационных систем. К элементу такой антенной решетки предъявляются жесткие, порой противоречащие друг другу требования. Элемент должен быть компактным. Диаграмма направленности должна быть однонаправленной и характеристики излучения должны быть максимально близкими для возможно больших углов отклонения от направления главного максимума в рабочем полупространстве. Кроме того, антенна должна иметь полосу пропускания, достаточно большую для эффективного излучения возбуждающих импульсов и высокую электрическую прочность для излучения мощных импульсов.

Известные и широко применяемые в настоящее время излучатели мощных СШП импульсов не удовлетворяют всей совокупности этих требований.

**Состояние вопроса.** Традиционно антенны делятся на узкополосные, широкополосные и диапазонные или частотно независимые. Однако, многие из известных широкополосных и диапазонных антенн не пригодны для малоискаженного излучения СШП импульсов в связи с зависимостью положения фазового центра антенны от частоты. К таким антеннам относятся спиральные и логопериодические антенны. Биконическая антенна в

полосе частот не менее двух октав сохраняет стабильные характеристики направленности, поляризационную характеристику, стабильный фазовый центр и постоянное входное сопротивление. Но диаграмма направленности (ДН) биконической антенны и толстого диполя равномерна в плоскости перпендикулярной оси диполя, что ограничивает их применение в качестве излучателей направленных СШП импульсов.

В качестве излучателей мощных СШП импульсов в настоящее время широко используются ТЕМ антенны и IRA (Impulse Radiating Antenna). Вопрос создания СШП сканирующей антенной решетки, где в качестве элемента решетки используется IRA, обсуждается в литературе. Указывается на теоретическую возможность создания такой системы для радарных и других приложений с установкой на воздушных судах и космических кораблях. Однако, информацию о реальных IRA решетках обнаружить не удалось.

Известны антенные решетки, выполненные на основе ТЕМ антенн. К недостаткам таких антенных решеток можно отнести большие габаритные размеры излучателя и малые углы сканирования.

Для практического применения источники мощного СШП излучения должны удовлетворять ряду требований. Это – компактность, малый вес и высокая излучаемая мощность. Таким образом, необходимо уменьшать размеры и вес всех подсистем, составляющих СШП источник, и одновременно увеличивать выходную пиковую мощность при высокой частоте повторения импульсов. Развитие технологии твердотельных генераторов дает основание для решения энергетической части задачи. Компактная СШП антенна, которая обеспечивала бы высокую эффективность излучения СШП импульсов и широкую полосу пропускания – является следующей проблемой, с которой сталкиваются разработчики компактных источников СШП излучения.

Развитие техники генерирования мощных нано- и субнаносекундных импульсов на основе газовых коммутаторов позволило создать источники мощных импульсов с амплитудой напряжения  $\sim 100$  кВ. Следует отметить, что генераторы с использованием газовых разрядников позволяют получать импульсы субнаносекундного диапазона с большей мощностью, чем твердотельные. Таким образом, в настоящее время имеется энергетическая основа для разработки мощных источников СШП излучения.

Исходя из вышесказанного, целью работы является исследование влияния комбинаций излучателей электрического и магнитного типов, а также ТЕМ рупора на характеристики СШП излучения комбинированных антенн и создание на их основе компактных излучателей мощных электромагнитных импульсов.

**Задачи исследований.** В рамках поставленной цели решались следующие задачи.

1. Исследование факторов, влияющих на согласование антенн с фидерным трактом. Выяснение возможности расширения полосы согласования антенн в область низких частот. Определение предельной (теоретической) нижней полосы пропускания антенны. Исследование возможности создания компактной комбинированной антенны, состоящей из излучателей электрического и магнитного типов с общим входом.
2. Решение задачи расширения полосы пропускания компактных антенн в область высоких частот.
3. Исследование пространственно-временной структуры поля излучения комбинированных излучателей и возможности управления ею.
4. Решение задачи нахождения пиковой мощности излучения СШП источников при их возбуждении нано- и субнаносекундными импульсами напряжения.
5. Исследование и разработка источников СШП излучения с пиковой мощностью более  $10^8$  Вт.

**Методы проведения исследования.** При решении поставленных задач использовались методы электродинамики и спектрального анализа. Для проверки работоспособности предложенных подходов использовались численное моделирование и натурные эксперименты.

**На защиту выносятся следующие положения.**

1. Комбинация электрических и магнитных излучателей в антенне уменьшает запас реактивной энергии в ближней зоне и позволяет расширить полосу согласования, получить кардиоидную диаграмму направленности, а также реализовать комбинированные антенны (электрический монополь и магнитный диполь с общим входом) с размерами  $L = 0.17\lambda_n$  ( $\lambda_n$  – длина волны, соответствующая нижней граничной частоте полосы согласования) и частотным перекрытием 10:1 по уровню коэффициента стоячей волны по напряжению  $\leq 3$  для источников излучения с пиковой мощностью 100 МВт с одиночной антенной и 1 ГВт с четырехэлементной антенной решеткой.
2. Условием нахождения пиковой мощности сверхширокополосного излучения является знание коэффициента эффективности излучателя по пиковой мощности, который вычисляется по результатам измерений амплитудно-временных зависимостей входного и отраженного от антенны импульсов, а также пространственно-временных зависимостей импульсов поля в дальней зоне и пригоден для сравнения сверхширокополосных

излучателей различного типа, а также для оценки пиковой напряженности поля в дальней зоне.

3. Стабилизация положения максимума диаграммы направленности комбинированной антенны путем включения в ее состав элемента в виде ТЕМ рупора обеспечивает как сдвиг верхней границы полосы пропускания в область высоких частот в 3-4 раза так и увеличение эффективности по пиковой мощности в 1.3-1.8 раза.

4. Полоса пропускания (частотное перекрытие) комбинированных антенн с ТЕМ рупором в направлении главного максимума диаграммы, достигает 5:1 и более чем в двое шире полосы пропускания комбинированных антенн без ТЕМ рупора, а при отклонении от максимума на  $\pm 45^\circ$  в главных плоскостях ширина полосы пропускания всех комбинированных антенн близка к 2:1.

**Достоверность** результатов первого и четвертого защищаемых положений подтверждаются использованием в измерениях поверенного прибора Agilent 8719ET Network Analyzer (с рабочей полосой частот 0.05 – 13.5 ГГц), обеспечивающего высокую точность измерений частоты, амплитудных значений КСВН, затухания и фазы.

Достоверность результатов второго и третьего защищаемых положений подтверждаются использованием в измерениях поверенных цифровых осциллографов фирмы Tektronix TDS7404 и TDS6604 с полосой пропускания 4 и 6 ГГц, аттенюаторов и переходников фирмы Radial с полосой пропускания 18 ГГц, обеспечивающих высокую точность измерения амплитудно-временных значений наносекундных импульсов.

Кроме того, достоверность результатов третьего положения подтверждается совпадением в пределах 10% измеренного в эксперименте пикового значения напряженности электрического поля  $E_p$  и расчетного значения  $E_p$ , полученного на основе расчета эффективности по пиковой мощности  $k_p$ .

**Научная новизна.** Реализована идея комбинации излучателей электрического и магнитного типов в компактной комбинированной антенне с общим входом и предназначенной для эффективного излучения мощных электромагнитных импульсов, что привело к появлению нового класса мощных СШП излучателей в дополнение к уже известным ТЕМ антеннам и IRA.

Была впервые предложена методика оценки эффективности СШП антенн по пиковой мощности.

**Научная ценность.** Важным является факт, что при изменении геометрии верхних активного и пассивного магнитных диполей путем изменения положения разделяющей их пластины изменяются моменты токов, что, в свою очередь, приводит к изменению согласования комбинированной антенны с фидером и характеристик излучения. Благодаря найденным в эксперименте зависимостям энергетической эффективности антенн и пиковой напряженности электрического поля в импульсе излучения, а также полученным зависимостям ширины диаграммы направленности от геометрии магнитных диполей обнаружен механизм настройки антенн удобный тем, что в антенне меняется геометрическое положение только одного настроечного элемента, при этом габаритные размеры остаются неизменными.

Благодаря конструктивному решению использования в комбинированных антеннах излучателя электрического типа в виде ТЕМ рупора, удалось значительно увеличить полосу пропускания антенн в направлении главного максимума излучения.

#### **Практическая значимость.**

1. Комбинированные антенны позволяют излучать электромагнитные импульсы гигаваттного уровня мощности благодаря высокой электрической прочности и возможности использования элегазовой ( $\text{SF}_6$ ) изоляции.

2. Комбинированные СШП антенны пригодны к использованию в мощных источниках с электронным управлением диаграммой направленности излучения, т.к. удовлетворяют требованиям, предъявляемым к элементу сканирующей СШП решетки.

3. Оценка эффективности антенн по пиковой мощности позволяет сравнивать разные антенны и рассчитывать пиковую напряженность электрического поля антенн в дальней зоне.

4. Совмещение комбинированного излучателя с ТЕМ рупором позволило увеличить межэлектродные зазоры в антенне на 70% и реализовать источник с пиковой мощностью излучения ~ 170 МВт при длительности возбуждающего биполярного импульса 1 нс.

5. В комбинированных антеннах с ТЕМ рупором электрический монополюс гальванически соединен с корпусом, что существенно упрощает конструкцию высоковольтного генератора, входящего в состав источника СШП излучения.

5. Комбинированные передающие антенны с ТЕМ рупором в режиме приема обеспечивают с высокой чувствительностью малоискаженную регистрацию СШП сигналов, рассеянных от объектов, вследствие широкой полосы пропускания.

**Внедрение результатов работы.** Разработанные в ходе исследований комбинированные СШП излучатели и мощные источники СШП излучения на их основе использовались в различных исследованиях, в том числе по электромагнитной совместимости. Перечисленные ниже отечественные и зарубежные организации использовали различные комбинированные излучатели или мощные источники СШП излучения, включающие в себя комбинированные излучатели:

1. Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск);
2. Агентство оборонных исследований (г. Лондон, Великобритания);
3. Институт прикладной электроники Китайской академии инженерной физики (г. Меньян, КНР);
4. Шеньянский технологический институт (г. Шеньян, КНР);
5. Северо-западный институт ядерных технологий (г. Сиань, КНР);
6. Международные технологии по мощной импульсной технике (г. Тегра, Франция).

**Апробация работы.** Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на следующих научных конференциях: VI Int. Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Lviv, Ukraine, 1996); SPIE Int. Symposium, Intense Microwave Pulses V Conference (San Diego, USA, 1997); 11- 14<sup>th</sup> IEEE Int. Pulsed Power Conferences (Baltimore, USA, 1997; Monterey, USA, 1999; Las Vegas, USA, 2001; Dallas, USA, 2003); IV, VI Int. Conferences on Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics (Tel-Aviv, Israel, 1998; Annapolis, USA, 2002); рабочем совещании NATO ARW по современным исследованиям в области разминирования (Москва, Россия, 1997 г.); Всероссийской научной конференции “Физика радиоволн” (Томск, Россия, 2002 г.); Всероссийской научной конференции “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике” (Муром, Россия, 2003 г.); III Международной научно-практической конференции “Электронные средства и системы управления” (Томск, Россия, 2005 г.); 14<sup>th</sup> Int. Symposium on High Current Electronics (Томск, Россия, 2006 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 статей и 15 докладов на конференциях.

**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. Созданием мощных источников СШП излучения (Глава 4) занималась большая группа сотрудников ИСЭ СО РАН: Визирь В.А., Губанов В.П., Ефремов А.М., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Коровин С.Д., Кошелев В.И., Кремнев В.В., Плиско В.В., Степченко А.С., Сухушин К.Н. Участие автора заключалось в создании СШП излучателей, исследовании их характеристик и характеристик излучения мощных СШП источников.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. В работе содержится 134 листов машинописного текста, 57 рисунков, 4 таблицы, 92 библиографические ссылки.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** рассмотрена актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и задачи исследования; сформулированы защищаемые положения; определены достоверность и новизна полученных результатов; кратко изложено содержание работы.

В **Главе 1** проводится анализ элементарных излучателей, возбуждаемых нестационарными токами. Рассматриваются факторы, влияющие на искажение СШП импульса излучения, а также способы расширения полосы пропускания антенн. Представлены характеристики широко используемых в мощных источниках СШП излучения ТЕМ антенн и IRA. Подробно рассматриваются реализованные к настоящему времени мощные источники СШП излучения. На основе проведенного анализа обсуждается необходимость развития новых подходов по созданию компактных антенн на основе комбинации излучателей электрического и магнитного типов с учётом энергетических соотношений для электромагнитных полей вблизи излучателя и требований, предъявляемых к элементу сканирующей антенной решетки. В конце главы формулируются задачи исследования.

В **Главе 2** приводятся результаты численного моделирования комбинированных антенн и V-диполя. Определяется предельная (теоретическая) нижняя полоса пропускания линейной антенны. Рассматриваются возможности расширения полосы пропускания реальных антенн в область нижних частот.

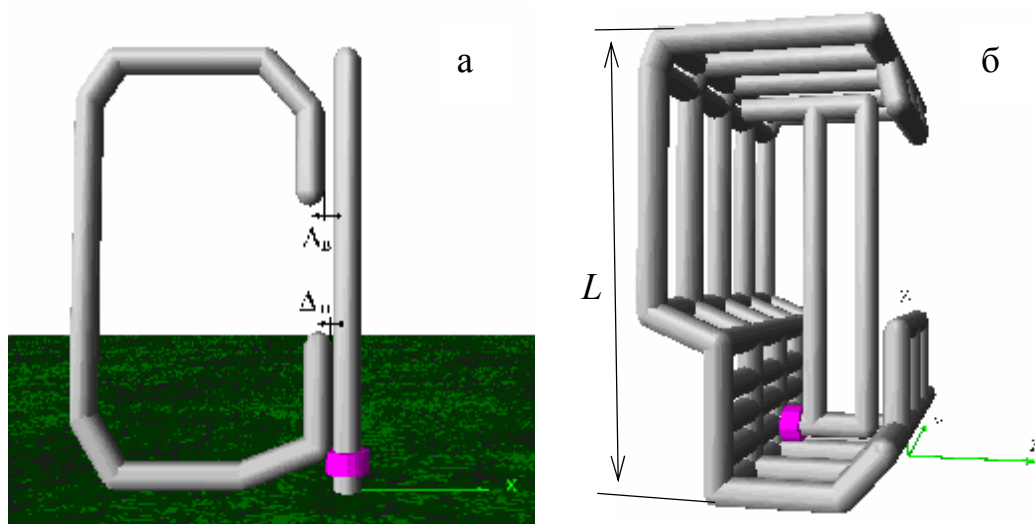


Рисунок 1 – Проволочного модели плоского (а) и объемного (б) комбинированных излучателей

Представлены сравнительные исследования согласования и характеристик излучения комбинированных антенн и простейшего излучателя в виде электрического монополя над неограниченной идеально проводящей плоскостью. Расчеты проводились с использованием программы 4NEC2. Первая (проволочная) комбинированная антенна (Рисунок 1а), исследуемая в численных расчетах, состояла из электрического монополя, высотой  $L$ , и разомкнутой рамки. Данную модель можно рассматривать как комбинацию электрического монополя и ортогонального ему магнитного диполя. Электрический и магнитный излучатели разделены в пространстве, но возбуждаются через общий порт. Данная комбинация обеспечивала сдвиг нижней граничной частоты  $f_n$  полосы согласования по уровню КСВН = 2 в область нижних частот на 30% по сравнению с  $f_n$  монополя. При этом верхняя граничная частота полосы согласования  $f_v$  по уровню КСВН = 2, увеличивалась более чем в два раза по сравнению с  $f_v$  монополя. Однако, комбинированная антенна также располагалась над неограниченной идеально проводящей плоскостью.

В компактной объемной модели комбинированной антенны (Рисунок 1б) ограниченный экран был свернут вокруг толстого электрического монополя. Для образования излучателя магнитного типа в виде разомкнутой рамки корпус-экран комбинированной антенны изогнут так, чтобы между боковой кромкой монополя и экраном образовалась щель. При этом, аналогом магнитного диполя является виток, образованный толстым монополем и частью корпуса-экрана. Для увеличения емкости между корпусом и монополем последний имеет дополнительную проволочку в верхней части, параллельную верхней части корпуса. КСВН объемного комбинированного излучателя, а также широкого монополя данного излучателя над ограниченным экраном, представляющим собой развертку

экрана-корпуса излучателя, и тонкого монополя над неограниченной идеально проводящей плоскостью представлены на Рисунке 2.

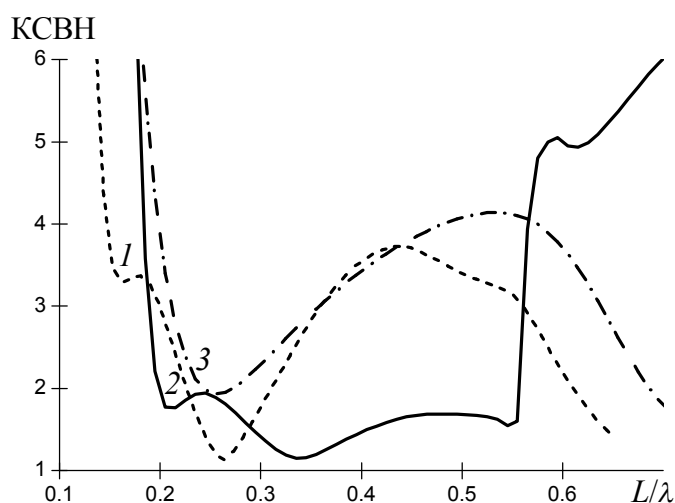


Рисунок 2 – КСВН широкого монополя над ограниченным экраном (1), объемной модели комбинированного излучателя (2) и тонкого монополя над неограниченным экраном (3)

Показано, что увеличение поперечных размеров монополя позволяет расширить его полосу согласования до 1.4:1 по уровню КСВН = 2. Частота  $f_n$  объемной модели комбинированного излучателя сдвинута в область нижних частот на 11% по сравнению с толстым монополем. Объемный комбинированный излучатель согласован в полосе частот 3:1 по уровню КСВН = 2. ДН комбинированного излучателя имеет один лепесток и положение главного максимума излучения ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $\delta = 0^\circ$ ) стабильно в полосе 2.2:1. К недостаткам данной модели излучателя относится зависимость положения главного максимума ДН от частоты для диапазона, соответствующего  $L/\lambda > 0.45$ , а также высокий уровень кроссполаризованного излучения для этого же диапазона частот. Показано, что нестабильность положения ДН объемной модели комбинированного излучателя на частотах, соответствующих  $L/\lambda > 0.45$ , определяется именно комбинацией излучателей электрического и магнитного типов.

Расширить полосу пропускания электрически короткого диполя в область высоких частот возможно за счет выполнения диполя в виде V-образной антенны. Для проверки такой возможности рассчитывались ДН по полю симметричного диполя длиной  $2L$  и V-образной антенны с той же длиной плеч. Исследования выполнены в широком диапазоне частот, соответствующих отношению  $L/\lambda = 0.25-2$ , и в диапазоне углов между плечами V-антенны  $120^\circ \geq 2\theta_0 \geq 60^\circ$ . Показано, что на низкой частоте, соответствующей  $L/\lambda = 0.25$ , V-антенна с углом  $2\theta_0 = 60^\circ$  не является эффективным излучателем и максимум ее ДН составляет лишь 0.5 от максимума ДН симметричного диполя. При увеличении угла  $2\theta_0$  растет напряженность поля излучения V-антенны в направлении главного максимума и при

$2\theta_0 = 120^\circ$  максимум ее ДН составляет  $\cong 0.9$  от максимума ДН симметричного диполя. Напряженность поля, создаваемая V-антенной, становится больше напряженности поля, создаваемой симметричным диполем в направлении главного максимума ( $\delta = 0^\circ$ ), на частотах, соответствующих  $L/\lambda \geq 0.5$ , при  $2\theta_0 = 120^\circ$ . С уменьшением угла  $2\theta_0$  напряженность поля, создаваемая V-антенной, становится больше напряженности поля, создаваемой симметричным диполем в направлении  $\delta = 0^\circ$ , на более высоких частотах, соответствующих  $L/\lambda = 0.65$  и  $L/\lambda = 0.7$  для  $2\theta_0 = 90^\circ$  и  $2\theta_0 = 60^\circ$ . При этом положение главного максимума ДН V-антенны с углом  $2\theta_0 = 120^\circ$  остается стабильным вплоть до частот, соответствующих  $L/\lambda = 1.5$ , а с уменьшением угла  $2\theta_0$  до значений  $90^\circ$ - $60^\circ$  положение главного максимума ДН V-антенн остается стабильным, как минимум, до частот, соответствующих  $L/\lambda = 2$ .

Направленность излучения V-антенн растет с уменьшением угла  $2\theta_0$  и становится больше 1.4 ( $F^2(0^\circ)/F^2(180^\circ) \cong 2$ ) с частот, соответствующих  $L/\lambda \cong 0.45$ , 0.42 и 0.40 для антенн с  $2\theta_0 = 120^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $60^\circ$ . Отсюда видно, что использование V-антенны в комбинированной антенне как излучателя электрического типа перспективно для расширения полосы пропускания в область высоких частот.

В **Главе 3** рассматриваются конструкции и характеристики компактных комбинированных антенн трех модификаций.

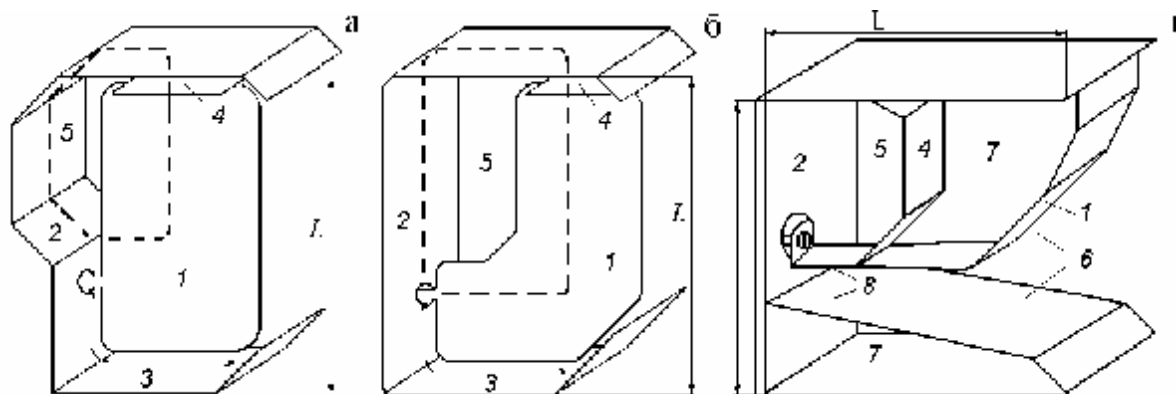


Рисунок 3 – Геометрия СШП передающих антенн: 1 – электрический монополюль, 2 – корпус-экран, 3 – щелевая линия, 4 – пластина, 5 – активный магнитный диполь, 6 – ТЕМ рупор, 7 – пассивный магнитный диполь, 8 – полосковая линия

Первая модификация комбинированных антенн А1 (Рисунок 3а) повторяет по своей конструкции численную модель объемного комбинированного излучателя, рассмотренную в Главе 2. Во второй конструкции А2 (Рисунок 3б) магнитный диполь образован за счет изменения геометрии электрического монополя. Показано, что совмещение ближних зон

излучателей электрического и магнитного типов уменьшает добротность комбинированной антенны и расширяет полосу согласования, измеренную по уровню КСВН = 3, в область нижних частот на  $\geq 18\%$  по сравнению с полосой согласования толстого монополя. При этом нижняя граничная частота полосы согласования соответствует отношению  $L/\lambda = 0.17$ , а частотное перекрытие превышает 10:1 по уровню КСВН  $\leq 3$ . Диаграммы направленности антенн в главных плоскостях близки к кардиоидной, поляризация излученного поля линейная.

Были разработаны и исследованы антенны А1, оптимизированные для излучения биполярных импульсов длительностью 4 (А14) и 3 нс (А13); антенна А2, оптимизированная для излучения биполярных импульсов длительностью 2 нс (А22).

Комбинированные антенн третьей модификации А3 (Рисунок 3в) отличаются от первых двух тем, что с целью расширения полосы пропускания в область высоких частот, излучатель электрического типа выполнен в виде ТЕМ рупора (трехмерный вариант V-диполя). Кроме того, в данных антеннах можно выделить один активный и два пассивных магнитных диполя. Были разработаны и исследованы антенны А3, оптимизированные для излучения биполярных импульсов длительностью 3, 2 и 1 нс (А33, А32, А31).

По экспериментальным данным находили энергетическую эффективность антенн  $k_w$ , равную отношению излученной энергии  $W_{изл}$  к энергии в импульсе генератора  $W_{ген}$ .  $W_{изл}$  находили как разность  $W_{ген}$  и энергии отраженной от входа в антенну  $W_{отр}$ . Излученные антеннами импульсы регистрировали ТЕМ антенной и резистивным диполем в дальней зоне. Расширенная полоса пропускания позволяет использовать антенны А3 в качестве приемных, формы регистрируемых импульсов хорошо совпадают с аналогичными, зарегистрированными ТЕМ антенной. Дальнюю зону определяли как расстояние от антенны  $R$ , начиная с которого, эффективный потенциал  $U_{эфф} = E_p R$  остается примерно постоянным, где  $E_p$  – пиковое значение напряженности электрического поля в импульсе излучения.

Предложена методика определения эффективности сверхширокополосной антенны по пиковой мощности  $k_p = P_{||изл}/P_{ген}$ , где  $P_{||изл}$  – пиковая мощность вертикально поляризованного излучения,  $P_{ген}$  – пиковая мощность в импульсе на входе антенны. Эффективность  $k_p$  находим как:

$$k_p = \sum_{i=1}^{12} k_{pi} = \frac{\sum_{i=1}^{12} (U_{изл i}^2 S_i) k_w \int_0^{\tau_{ген}} U_{ген}^2(t) dt}{U_{ген}^2 \sum_{i=1}^{12} (S_i \int_0^{\tau_{изл i}} U_{изл i}^2(t) dt)},$$

где  $U_{ген}(t)$  – амплитудно-временная зависимость импульса генератора,

$U_{\text{изл}i}(t)$  – амплитудно-временная зависимость излученного импульса, характерного для поверхности наблюдения  $S_i$ ,

$S_i$  – часть поверхности наблюдения (сфера) с частичным фазовым центром антенны в центре, определяется телесными углами наблюдения характерными для данного  $i$ ,

$U_{\text{ген}}$  и  $U_{\text{изл}i}$  – пиковые значения импульса напряжения на антенном входе и максимальное отклонение от нулевого значения напряжения в импульсе излучения характерном для поверхности  $S_i$ ,

$\tau_{\text{ген}}$  – длительности импульсов генератора,

$\tau_{\text{изл}i}$  – длительность излученного импульса зарегистрированного на поверхности  $S_i$ .

Коэффициент направленного действия (КНД) в направлении главного максимума находился как:

$$D_0 = \frac{4\pi F^2(0,0)}{\sum_{i=1}^N S_i F_i^2(\delta, \varphi)},$$

где  $F_i^2(\delta, \varphi)$  – среднее значение нормированной ДН антенны на поверхности  $S_i$ ,

$F^2(0,0)=1$  – значение нормированной ДН антенны для направления  $\varphi, \delta = 0^\circ$  (максимум ДН).

Зная,  $k_p$  и  $D_0$ , а также  $P_{\text{ген}}$ , пиковую напряженность поля  $E_p$  оценивали как:

$$E_p = \frac{1}{R} \sqrt{30P_{\text{ген}} k_p D_0}.$$

Эффективность антенн по излученному полю находили как:

$$k_E = \frac{E_p R}{U_{\text{ген}}}.$$

Полосу пропускания комбинированных антенн определим как диапазон (отношение) частот, в котором выполняются условия для малоискаженной передачи сигнала: изменение АЧХ антенны относительно среднего значения находятся в пределах  $\pm 1.5$  дБ, а отклонение ФЧХ от линейной – в пределах  $\pm \pi/16$ . Третьим параметром, определяющим полосу пропускания антенны, считаем уровень КСВН антенны  $\leq 3$ . Нижнюю границу определяли как наибольшую, а верхнюю как наименьшую частоту при одновременном выполнении всех трех критериев.

Характеристики комбинированных антенн приведены в Таблице 1. Антенны исследовались в режиме возбуждения биполярными импульсами напряжения (БП) и монополярными импульсами (МП). Длительность МП меньше длительности БП в два раза.

Данные по полосе пропускания (отношения верхних и нижних граничных частот) комбинированных антенн для различных углов наблюдения представлены в Таблице 2.

Таблица 1 – Характеристики комбинированных антенн

	$k_w$		$D_0$		$k_p$		Ширина ДН по уровню половинной мощности, град.				$k_E$	
	МП	БП	МП	БП	МП	БП	$H$ -плоскость		$E$ -плоскость		МП	БП
							МП	БП	МП	БП		
A14	0.62	0.86	2.9	2.5	0.3	0.55	105	100	120	145	0.7	0.9
A13	0.6	0.88	2.5	2.7	0.25	0.6	120	95	140	140	0.7	0.9
A22	0.45	0.88	2	2.1	0.3	0.75	180	170	140	140	0.5	0.8
A33	0.6	0.88	3.8	3.8	0.45	1.1	85	85	90	90	1	1.5
A32	0.72	0.9	3.9	4.2	0.45	1	90	85	90	90	0.8	1.5
A31	0.64	0.88	3.4	3.7	0.25	0.85	90	90	95	95	0.6	1.1

Таблица 2 – Полоса пропускания комбинированных антенн

	$\varphi, \delta = 0^\circ$	$\varphi = \pm 30^\circ, \delta = 0^\circ$	$\varphi = \pm 45^\circ, \delta = 0^\circ$	$\varphi = 0^\circ, \delta = 30^\circ$	$\varphi = 0^\circ, \delta = 45^\circ$	$\varphi = 0^\circ, \delta = -30^\circ$	$\varphi = 0^\circ, \delta = -45^\circ$
A14	1.9	1.8	1.8	3	2.4	2	1.9
A13	1.9	2	2.1	2	1.9	1.5	1.4
A22	1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	1.3	1.1
A33	4.6	3.5	2.3	5.5	4	2.9	2.4
A32	5.5	4.2	2.2	5.4	4.2	3.6	2.4
A31	4.8	3.2	2.2	4.8	3.1	3.6	2.3

Показано, что модификация антенн А3 отличается от А1 и А2 меньшим уровнем кроссполяризованного излучения. При близкой энергетической эффективности антенн, антенны третьей модификации имеют в 1.5 раза больший КНД и  $k_E$ . Эффективность этих антенн по пиковой мощности в 1.3-1.8 раза больше, чем для антенн первых двух модификаций. Как видно из приведенных данных, все параметры антенн выше при их возбуждении биполярными импульсами напряжения.

Полоса пропускания антенн А3 соответствует 5:1 и увеличена более чем в два раза по сравнению с полосой пропускания А1 и А2 в направлении главного максимума за счет продвижения в область высоких частот. Верхняя граничная частота полосы пропускания увеличена в 3-4 раза. При отклонении от направления главного максимума на  $\pm 45^\circ$  в

горизонтальной и вертикальной плоскостях полоса пропускания всех антенн составляет примерно 2:1 и остается достаточной для малоискаженного излучения СШП импульсов.

Разработанные антенны компактны и их размеры не превышают половину пространственной протяженности излучаемого биполярного импульса. Антенны предназначены для излучения мощных СШП импульсов и обладают высокой электрической прочностью. Для повышения электрической прочности антенн использовались два подхода. Первый – увеличение радиуса кривизны электродов антенн, использовался в конструкциях первых двух вариантов комбинированных антенн. Второй – увеличение межэлектродного зазора в области антенного входа и осуществление гальванического контакта потенциального электрода с заземленным корпусом. Второй вариант использовался при разработке комбинированных антенн третьей модификации. Комбинированные антенны могут быть использованы в составе источников электромагнитных импульсов мощностью  $\geq 10^8$  Вт.

В **Главе 4** представлены конструкции и характеристики мощных источников СШП излучения, созданных с использованием комбинированных антенн различных модификаций. Во всех источниках используются генераторы биполярных импульсов напряжения для возбуждения излучателей. Диапазон длительностей биполярных импульсов напряжения составляет 1-4 нс, а диапазон амплитуд – 100-200 кВ.

Для увеличения электрической прочности комбинированные антенны помещались в тонкостенные диэлектрические контейнеры, заполненные SF<sub>6</sub> газом. Давление газа SF<sub>6</sub> доходило до 0.6 атм избыточной. При этом, диэлектрический контейнер незначительно влиял на характеристики комбинированных антенн.

Импульс излучения комбинированной антенны А31 с расширенной полосой пропускания, возбуждаемой биполярным импульсом длительностью 1 нс, показан на Рисунке 4. Пиковая напряженность поля на расстоянии  $R = 4$  м для этого источника, полученная в эксперименте, составила  $E_p \cong 34$  кВ/м. При этом значение эффективного потенциала  $U_{эфф}$ , определяемое как произведение  $E_p R$ , составило  $\cong 130$  кВ. Расчетное значение  $E_p$  в той же точке составило 36 кВ/м. Хорошее соответствие расчетной и измеренной величин  $E_p$  подтверждает правильность нахождения  $k_w$ ,  $k_p$  и КНД передающих СШП антенн.



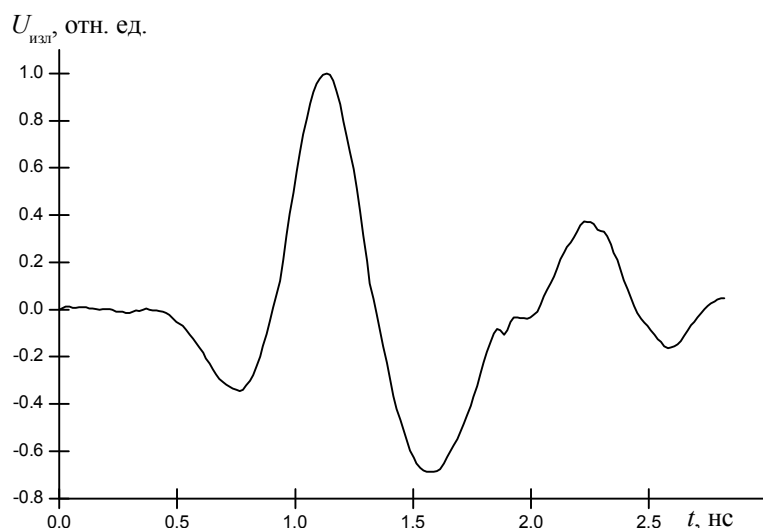


Рисунок 4 – Осциллограмма излученного импульса

Пиковая мощность разработанных источников СШП излучения составила 0.1-1 ГВт, а эффективный потенциал 100-500 кВ.

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. Численно исследована модель объемного компактного излучателя, представляющего собой электрический монополю и ограниченный экран, свернутый вокруг монополя. Данную модель можно рассматривать как комбинацию разделенных в пространстве электрического монополя и ортогонального ему магнитного диполя. Данная комбинация возбуждается одним общим источником ЭДС. Показана возможность согласования такого излучателя в полосе частот, близкой к 3:1, по уровню КСВН = 2. ДН комбинированного излучателя имеет один лепесток и положение главного максимума излучения ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $\delta = 0^\circ$ ) стабильно в полосе 2.2:1. К недостаткам данной модели излучателя относится зависимость положения главного максимума ДН от частоты для диапазона, соответствующего  $L/\lambda > 0.45$ , а также высокий уровень кроссполяризованного излучения для этого же диапазона частот. Показано, что такое поведение ДН комбинированного излучателя для частот, соответствующих  $L/\lambda > 0.45$ , определяется взаимодействием монополя и магнитного диполя и что для

расширения полосы пропускания в область данных частот необходимо предпринимать дополнительные меры.

2. Показана возможность расширения полосы пропускания электрически короткого диполя в область высоких частот за счет выполнения диполя в виде V-образной антенны. Были рассчитаны ДН по полю симметричного диполя длиной  $2L$  и V-образной антенны с той же длиной плеч. Исследования выполнены в широком диапазоне частот, соответствующих отношению  $L/\lambda = 0.25-2$ , и в диапазоне углов между плечами V-антенны  $120^\circ \geq 2\theta_0 \geq 60^\circ$ . Показано, что на частоте, соответствующей  $L/\lambda = 0.25$ , V-антенна с углом  $2\theta_0 = 60^\circ$  не является эффективным излучателем и максимум ее ДН составляет лишь 0.5 от максимума ДН симметричного диполя. При увеличении угла  $2\theta_0$  растет напряженность поля излучения V-антенны в главном направлении и при  $2\theta_0 = 120^\circ$  максимум ее ДН составляет  $\cong 0.9$  от максимума ДН симметричного диполя. Напряженность поля, создаваемая V-антенной, становится больше напряженности поля, создаваемой симметричным диполем в направлении главного максимума ( $\delta = 0^\circ$ ), на частотах, соответствующих  $L/\lambda \geq 0.5$ , при  $2\theta_0 = 120^\circ$ . С уменьшением угла  $2\theta_0$  напряженность поля, создаваемая V-антенной, становится больше напряженности поля, создаваемой симметричным диполем в направлении  $\delta = 0^\circ$ , на более высоких частотах, соответствующих  $L/\lambda = 0.65$  и  $L/\lambda = 0.7$  для  $2\theta_0 = 90^\circ$  и  $2\theta_0 = 60^\circ$ . При этом, положение главного максимума ДН V-антенны с углом  $2\theta_0 = 120^\circ$  остается стабильным вплоть до частот, соответствующих  $L/\lambda = 1.5$ , а с уменьшением угла  $2\theta_0$  до значений  $90^\circ-60^\circ$  положение главного максимума ДН V-антенн остается стабильным, как минимум, до частот, соответствующих  $L/\lambda = 2$ .

3. Разработаны два варианта конструкций компактных комбинированных антенн, размеры которых не превышают половину пространственной протяженности излучаемого биполярного импульса. Показано, что совмещение ближних зон электрического монополя и излучателя магнитного типа (рамка) расширяет полосу согласования комбинированной антенны по сравнению с полосой согласования электрического монополя. Получены сдвиги  $f_n$  в область нижних частот на 18-26% для данных антенн до частоты, соответствующей отношению  $L/\lambda_n \cong 0.17$ . Диаграммы направленности антенн в главных плоскостях близки к кардиоидным, поляризация основной части излученного поля линейная. Антенны предназначены для излучения мощных СШП импульсов и обладают высокой электрической прочностью.

4. Предложена методика определения коэффициента эффективности сверхширокополосной антенны по пиковой мощности. Погрешность измерения пиковой

напряженности электрического поля в дальней зоне, определяемая по найденным параметрам  $k_p$ ,  $k_w$  и КНД составляет примерно 10%.

5. Показано, что комбинированные антенны с расширенной полосой пропускания (третий вариант конструкции) отличаются от первых двух: меньшим уровнем кроссполяризованного излучения, увеличенной более чем в два раза полосой пропускания в направлении главного максимума за счет продвижения в область высоких частот (до частот, соответствующих  $L/\lambda > 1$ ). При практически одинаковой энергетической эффективности антенн, антенны третьей модификации имеют в 1.5 раза больший КНД. Эффективность этих антенн по пиковой мощности при возбуждении их биполярным импульсом напряжения достигает 1.1, при том, что для первых двух вариантов антенн  $k_p \cong 0.55-0.75$ . Разработанные антенны компактны и их размеры не превышают половину пространственной протяженности излучаемого биполярного импульса. Антенны предназначены для излучения мощных СШП импульсов и обладают высокой электрической прочностью.

6. Для повышения электрической прочности антенн предложены следующие подходы. Первый – увеличение радиуса кривизны электродов антенн, использовался в конструкциях первых двух вариантов комбинированных антенн. Второй – увеличение межэлектродного зазора в области антенного входа и осуществление гальванического контакта потенциального электрода с заземленным корпусом. Второй вариант использовался при разработке комбинированных антенн третьей модификации. Третий подход – помещение антенн в тонкостенные диэлектрические контейнеры, заполненные  $SF_6$  газом. Давление газа  $SF_6$  доходило до 0.6 атм избыточной. При этом, диэлектрический контейнер незначительно влиял на характеристики комбинированных антенн.

7. Разработаны мощные источники СШП излучения, излучателями в которых являются комбинированные антенны различных модификаций. Во всех источниках используются генераторы биполярных импульсов напряжения для возбуждения излучателей. Диапазон длительностей биполярных импульсов напряжения составляет 1-4 нс, а диапазон амплитуд – 100-200 кВ. Пиковая мощность источников СШП излучения составляла 0.1-1 ГВт, а эффективный потенциал 100-500 кВ.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Synthesis of Ultrawideband Radiators of Nonharmonic Signals / Yu. Andreev, V. Belichenko, Yu. Buyanov, V. Koshelev, V. Plisko, K. Sukhushin // Proc. VI Int. Conf. On Math. Meth. In Electromagnetic Theory. – 1996. – P. 425-428.

2. Исследование генерации мощного широкополосного излучения. 1. Излучение мощных широкополосных сигналов в свободное пространство / Ю.А. Андреев, В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев, В.В. Плиско, К.Н. Сухушин // в кн.Физика микроволн: сборник отчетов по научн. проектам МНТП России. Ниж. Новгород.: ИПФ РАН. – 1996. – Т. 1. – С. 49-52.
3. High-power ultrawideband electromagnetic pulse radiation / V.I. Koshelev, Yu.I. Buyanov, V.M. Kovalchuk, Yu.A. Andreev, V.V. Belichenko, A.M. Efremov, V.V. Plisko, K.N. Sukhushin, V.A. Vizir, V.B. Zorin // Proc. SPIE – 1997. – Vol. 3158. – P. 209-219.
4. Генератор мощных импульсов сверхширокополосного электромагнитного излучения / Ю.А. Андреев, Ю.И. Буянов, В.А. Визирь, А.М. Ефремов, В.Б. Зорин, Б.М. Ковальчук, В.И. Кошелев, К.Н. Сухушин // ПТЭ. – 1997. – № 5. – С. 72-76.
5. High-power ultrawideband electromagnetic radiation generator / Yu.A. Andreev, Yu.I. Buyanov, A.M. Efremov, V.I. Koshelev, V.M. Kovalchuk, K.N. Sukhushin, V.A. Vizir, V.B. Zorin // Proc. 11 Inter. Pulsed Power Conf. – 1997. – Vol.1. – P. 730-735.
6. Исследование генерации мощного широкополосного излучения. 1. Излучение мощных широкополосных сигналов в свободное пространство / Ю.А. Андреев, В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев, В.В. Плиско, К.Н. Сухушин // в кн.Физика микроволн: сборник отчетов по научн. проектам МНТП России. Ниж. Новгород.: ИПФ РАН. – 1998. – С. 25-26.
7. Элемент сканирующей антенной решетки для излучения мощных сверхширокополосных электромагнитных импульсов / Ю.А. Андреев, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев, К.Н. Сухушин // РЭ. – 1999. – Т. 44, № 5. – С. 531-537.
8. Multichannel antenna systems for radiation of high-power ultrawideband pulses / Yu.A. Andreev, Yu.I. Buyanov, V.I. Koshelev, V.V. Plisko, K.N. Sukhushin // Proc. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4. – New York.: Plenum Press. – 1999. – P. 181-186.
9. Gigawatt-power-level ultrawideband radiation generator / Yu.A. Andreev, Yu.I. Buyanov, A.M. Efremov, V.I. Koshelev, V.M. Kovalchuk, V.V. Plisko, K.N. Sukhushin, V.A. Vizir, V.B. Zorin // Proc. 12 Inter. Pulsed Power Conf. – 1999. – Vol.2. – P. 1337-1340.
10. Исследование генерации мощного широкополосного излучения. 1. Излучение мощных широкополосных сигналов в свободное пространство / Ю.А. Андреев, В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев, В.В. Плиско, К.Н. Сухушин // в кн.Физика микроволн: сборник отчетов по научн. проектам МНТП России. Ниж. Новгород.: ИПФ РАН. – 1999. – Т. 1. – С. 45-47.

11. Генератор гигаваттных импульсов сверхширокополосного излучения / Ю.А. Андреев, Ю.И. Буянов, В.А. Визирь, А.М. Ефремов, В.Б. Зорин, Б.М. Ковальчук, В.И. Кошелев, В.В. Плиско, К.Н. Сухушин // ПТЭ. – 2000. – № 2. – С. 82-88.
12. Ultrawideband radiators of high-power pulses / V.I. Koshelev, Yu.I. Buyanov, Yu.A. Andreev, V.V. Plisko, K.N. Sukhushin // Proc. 13 IEEE Inter. Pulsed Power Conf. – 2001. – Vol. 2. – P. 1661-1664.
13. Андреев Ю.А. Определение полосы пропускания сверхширокополосных комбинированных антенн // Труды Всеросс. научн. конф. “Физика радиоволн”. Томск. – 2002. – CVI. – С. 8-11.
14. High-power ultrawideband radiation source / Yu.A. Andreev, V.P. Gubanov, A.M. Efremov, V.I. Koshelev, S.D. Korovin, B.M. Kovalchuk, V.V. Kremnev, V.V. Plisko, A.S. Stepchenko, K.N. Sukhushin // Laser and Particle Beams. – 2003. – Vol. 21, No. 2. – P. 211-217.
15. Ultrawideband transmitting antennas, arrays, and high-power radiation sources / V.I. Koshelev, Yu.A. Andreev, Yu.I. Buyanov, V.V. Plisko, K.N. Sukhushin // Proc. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 6. – New York.: Plenum Press. – 2003. – P. 357-367.
16. Сверхширокополосные комбинированные антенны и решетки / Ю.А. Андреев, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев, В.В. Плиско // Доклады Всеросс. науч. конф. “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике”. Муром. – 2003. – С. 48-53.
17. High-power ultrawideband electromagnetic pulse source / Yu.A. Andreev, V.P. Gubanov, A.M. Efremov, V.I. Koshelev, S.D. Korovin, B.M. Kovalchuk, V.V. Kremnev, V.V. Plisko, A.S. Stepchenko, K.N. Sukhushin // Proc. 14<sup>th</sup> IEEE Inter. Pulsed Power Conf. – 2003. – Vol. 2. – P. 1458-1461.
18. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Комбинированная антенна с расширенной полосой пропускания // РЭ. – 2005. – Т. 50, № 5. – С. 585-594.
19. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные комбинированные антенны для мощных источников микроволнового излучения // Доклады Третьей международной научно-практической конф. “Электронные средства и системы управления”. Томск. – 2005. – Ч.1. – С. 135-138.
20. Электромагнитное излучение при наносекундном разряде в открытом газонаполненном диоде / Ю.А. Андреев, И.Д. Костыря, В.И. Кошелев, В.Ф. Тарасенко // ЖТФ. – 2006. – Т.76, Вып. 5. – С. 105-111.

21. Andreev Yu.A., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I. Combined Antennas for High-Power Ultrawideband Radiation // Изв. вузов. Физика. – 2006. – №. 11. Приложение. – С. 435-438.
22. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Малогабаритные сверхширокополосные антенны для излучения мощных электромагнитных импульсов // Журнал Радиоэлектроники. – 2006. – № 4. [Электронный ресурс] Режим доступа - <http://jre.cplire.ru/mac/apr06/1/text.html>