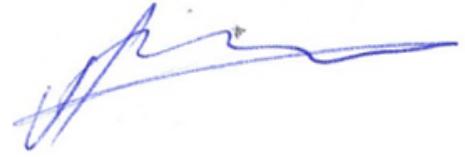


На правах рукописи



Плиско Вячеслав Владимирович

**ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
ИМПУЛЬСОВ РЕШЕТКАМИ КОМБИНИРОВАННЫХ АНТЕНН**

Специальность 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук» (ИСЭ СО РАН), г. Томск

Научный руководитель: **Кошелев Владимир Ильич**,
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБУН ИСЭ СО РАН

Официальные оппоненты: **Горбачев Анатолий Петрович**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный технический
университет (НГТУ)», профессор кафедры
радиоприемных и радиопередающих устройств;
Сатаров Раиль Наилевич,
кандидат физико-математических наук,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»,
научный сотрудник лаборатории терагерцевых
исследований

Ведущая организация: ФГБУН «Институт радиотехники и электроники
им. В.А.Котельникова РАН», г.Москва

Защита состоится «31» мая 2022 года в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), по адресу: 634050, г.Томск, пр.Ленина,40, ауд.201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте:
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/18td8g1f>

Автореферат разослан «___» апреля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Исследование и разработка мощных источников сверхширокополосного (СШП) излучения является актуальным направлением развития физики и техники электромагнитных излучателей. В мощных источниках СШП-излучения используется прямое преобразование энергии высоковольтных электрических импульсов в энергию электромагнитных импульсов с помощью антенных систем. Существуют и другие методы генерации мощного СШП-излучения, но они здесь не рассматриваются. Создание источников излучения с новыми характеристиками расширяет возможности их применения для решения различных прикладных задач.

Основной областью применения мощных СШП-импульсов являются исследования воздействия сильных электромагнитных полей на различные объекты и среды, в том числе биологические. Сюда же относятся исследования по электромагнитной совместимости (ЭМС) электронных систем в условиях преднамеренных помех. Второй важной областью применения мощного СШП-излучения является радиолокация с высоким пространственным разрешением, которое обусловлено короткой длительностью. Главной задачей СШП-радиолокации является распознавание объектов. Мощные источники СШП-излучения разрабатываются также для систем связи.

Важными требованиями к мощным источникам СШП-излучения являются высокая энергетическая эффективность и компактность излучателя. Разработка компактных антенных систем для излучения мощных СШП-импульсов с высокой энергетической эффективностью является актуальной задачей исследований.

Состояние вопроса

Уже более 100 лет источники электромагнитного излучения разрабатываются параллельно на основе зеркальных антенн и многоэлементных решеток. Каждое из этих направлений имеет свои достоинства. Излучатели на основе зеркальных антенн привлекают своей простотой реализации. Многоэлементные решетки предоставляют более широкие возможности по управлению характеристиками излучения, но являются более сложными. Это относится также и к мощным источникам СШП-излучения.

Современный этап развития исследований по генерации мощного СШП-излучения начинается с 1989 года, когда Карл Баум предложил антенну для излучения мощных СШП-импульсов, получившую название IRA (Impulse Radiating Antenna). В этой антенне используется параболический отражатель большого диаметра и газовый разрядник. Антенна возбуждалась монополярным импульсом с крутым фронтом и медленным спадом. Позднее с использованием IRA были получены импульсы излучения с эффективным потенциалом (произведение пиковой напряженности поля E_p на расстояние r в дальней зоне) 1300 кВ. Основным недостатком этого излучателя является низкая энергетическая эффективность.

Параллельно в США были начаты исследования многоэлементных решеток, возбуждаемых управляемыми полупроводниковыми ключами, которые привели к созданию в 1995 г. источника СШП-излучения GEM 2 с уникальными характеристиками. Элементы решетки возбуждались монополярными и биполярными импульсами с частотой повторения 3 кГц. Было реализовано сканирование волновым пучком и получены импульсы излучения с пиковой мощностью 1 ГВт и эффективным потенциалом 1650 кВ. Однако, трудности синхронизации 144 ключей ограничили возможность его практического применения.

Исследования в других лабораториях пошли по этим двум направлениям. В рамках данной диссертации для нас, в первую очередь, представляют интерес исследования мощных источников СШП-излучения на основе решеток. Здесь следует отметить первые исследования в ИЭФ УрО РАН и ОИВТ РАН, в которых использовались решетки ТЕМ-антенн, возбуждаемые высоковольтными импульсами, формируемыми в генераторах с газовым и полупроводниковыми ключами соответственно. В последние годы выполнены исследования, направленные на генерацию высоковольтных затухающих импульсов с помощью нелинейных передающих линий и их использованию в мощных источниках СШП-излучения.

Исследования мощных источников СШП-излучения в ИСЭ СО РАН были начаты в 1993 г. В программу исследований было заложено применение биполярных импульсов напряжения для возбуждения излучателей. Выбор был обусловлен более высокой энергетической эффективностью излучения биполярных импульсов по сравнению с монополярными. В первых исследованиях использовались одиночная антенна и 4-элементная решетка. Использовались биполярные импульсы длительностью 3 нс и амплитудой до 200 кВ. Были получены импульсы СШП-излучения с эффективным потенциалом до 500 кВ. Антенны были разработаны на основе комбинации электрического монополя и магнитного диполя.

Ограничение полосы пропускания такой антенны в области высоких частот привело к необходимости создания комбинированной антенны (КА) с расширенной полосой частот на основе ТЕМ-рупора. Отметим, что длина КА меньше, чем ТЕМ-антенны при одинаковой нижней граничной частоте. Это позволило помещать ее в диэлектрический контейнер с газом SF₆ для повышения электрической прочности.

Первый источник СШП-излучения с использованием КА, возбуждаемой биполярным импульсом длительностью 1 нс и амплитудой 120 кВ, разработан в 2002 г. В экспериментах были получены импульсы СШП-излучения с эффективным потенциалом 136 кВ на частоте повторения 100 Гц. Энергетическая эффективность антенны $k_W = 0.85$, эффективность по пиковой напряженности электрического поля $k_E = 1.1$.

Для освоения широкого диапазона частот необходимо было разработать и исследовать КА и решетки на их основе, оптимизированные для возбуждения высоковольтными (100–200 кВ) биполярными импульсами

длительностью 0.2–3 нс, а также получить импульсы СШП-излучения с эффективным потенциалом мультимегавольтного уровня. При заданной длительности биполярного импульса полоса частот излученного импульса ограничена полосой частот возбуждающего импульса. Расширение полосы частот излученного импульса возможно за счет сложения в свободном пространстве импульсов с различными спектральными диапазонами. Исследования в этом направлении представляют несомненный интерес.

Цели и задачи исследований.

Целями диссертационной работы являются исследования и разработка излучателей мощных СШП-импульсов на основе многоэлементных решеток комбинированных антенн КА для уменьшения габаритов, повышения энергетической эффективности и ширины полосы излучения.

Для достижения поставленных целей требуется решение следующих задач:

1. Исследование КА, оптимизированных для возбуждения биполярными импульсами длительностью 0.2–3 нс, в качестве элемента решетки мощных источников СШП-излучения.
2. Разработка, исследование и оптимизация многоэлементных плоских решеток на основе КА для излучения мощных СШП электромагнитных импульсов с линейной и ортогональными поляризациями поля.
3. Разработка и исследование фидерных систем решеток, включая делители мощности.
4. Построение численной модели синтеза импульсов излучения в свободном пространстве для оптимизации конфигурации плоской решетки и расчета параметров задержек импульсов.
5. Проведение экспериментальных исследований синтеза мощных СШП-импульсов излучения с помощью сложения в свободном пространстве импульсов с различной шириной спектра. Получение импульсов излучения с максимально возможной спектральной полосой при заданных импульсах возбуждения элементов решетки.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались методы классической электродинамики, спектрального анализа и численный расчет. Для моделирования КА и делителей мощности во временной области использовался программный пакет CST Studio Suite. Расчеты по моделированию синтеза СШП-излучения проводились с использованием библиотек NumPy и SciPy. Экспериментальные исследования проводились в безэховой камере ИСЭ СО РАН.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Антенны, разработанные на основе комбинации ТЕМ-рупора и магнитных диполей (активного и пассивных) и оптимизированные для возбуждения высоковольтными биполярными импульсами напряжения длительностью от 0.2 до 3 нс, позволили получить мощные импульсы

- сверхширокополосного излучения с эффективным потенциалом от 100 до 400 кВ.
2. При возбуждении антенной решетки биполярным импульсом напряжения, равномерное распределение амплитуд напряжения по элементам решетки, а также гальваническое соединение элементов по вертикали и расстояние между элементами по горизонтали, равное 0.1 пространственной протяженности импульса, обеспечивают минимальные габариты решетки и высокую эффективность по полю и энергии.
 3. Диагональное расположение элементов решетки, повернутых на 90° относительно друг друга, позволяет получать импульсы сверхширокополосного излучения с ортогональными поляризациями и максимумами диаграмм направленности на оси, перпендикулярной плоскости решетки. В решетке 4×4, состоящей из двух подрешеток с ортогональными поляризациями, получены импульсы излучения с эффективным потенциалом 300 кВ при последовательном возбуждении биполярными импульсами длительностью 1 наносекунда подрешеток с разными поляризациями.
 4. Фидерная система с газовой изоляцией (SF₆) на основе последовательного соединения волнового трансформатора, делителя мощности и использования кордельных кабелей позволяет согласовать волновое сопротивление генератора и фидерной системы решетки в широкой полосе частот при уровне пиковой мощности биполярных импульсов до 1 ГВт и обеспечивает длительное время работы (более 2×10⁶ импульсов) на частоте повторения 100 Гц.
 5. 64-х канальный делитель мощности с одновременной трансформацией сопротивления позволил согласовать волновое сопротивление генератора 12.5 Ом с волновым сопротивлением фидерной системы решетки 0.78 Ом. В решетке 8×8 с разработанным делителем получены импульсы сверхширокополосного излучения с эффективным потенциалом 4.3 МВ.
 6. Предложенный подход к синтезу импульсов излучения с расширенной полосой частот на основе плоских решеток комбинированных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами разной длительности, позволил получить мощные импульсы излучения с полосой частот 4 октавы и эффективным потенциалом 185 кВ.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается значительным объемом экспериментальных данных, полученных при проведении натурных измерений с использованием современной измерительной техники: цифровых осциллографов реального времени Tektronix TDS 6604 и LeCroy WaveMaster 830Zi с полосой пропускания 6 и 16 ГГц, измерителя комплексных коэффициентов передачи Agilent 8719ET с полосой рабочих частот 0.05 – 13.5 ГГц, анализатора цепей Agilent N5227A с

полосой – 0.01 – 67 ГГц, прецизионных аттенуаторов, в том числе высоковольтных, разъемов и коаксиальных кабелей с малыми потерями в полосе частот, занимаемой спектром регистрируемых импульсов.

Результаты работы являются воспроизводимыми и проверяемыми, наблюдается качественное и количественное согласие результатов моделирования и экспериментальных исследований.

Научная новизна

1. Показано, что при возбуждении антенной решетки биполярными импульсами напряжения, равномерное распределение амплитуд напряжения по элементам решетки обеспечивают низкий уровень бокового излучения и высокую эффективность по полю.

2. Показано, что диагональное расположение элементов решетки с ортогональными ориентациями позволяет получать импульсы сверхширокополосного излучения с ортогональными поляризациями и максимумами диаграмм направленности на оси, перпендикулярной плоскости решетки.

3. Предложен подход синтеза импульсов излучения с расширенной полосой частот на основе плоских решеток комбинированных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами разной длительности.

Теоретическая значимость

Теоретически показано, что комбинация электрических и магнитных диполей позволяет сдвинуть нижнюю границу полосы согласования антенны в сторону низких частот. Это подтверждено численным моделированием КА.

Практическая значимость

1. Предложенные антенные решетки на основе КА используются для излучения СШП электромагнитных импульсов гигаваттного уровня мощности с мегавольтным эффективным потенциалом.

2. Разработанные фидерные системы и делители мощности с газовой изоляцией обеспечивают подвод к элементам решетки высоковольтных биполярных импульсов напряжения с минимальными потерями энергии.

Внедрение результатов работы

Разработанные в ходе исследований антенные решетки на основе КА для мощных источников СШП-излучения использовались для проведения исследований по ЭМС совместно с НПО СТиС МВД России (г. Новосибирск), а также при выполнении международных контрактов:

1. «Источник СШП-излучения с 9-элементной решеткой» с Университетом Инха (Республика Корея), 2013–2014 гг.
2. С Сианьским Цзяотун Университетом (КНР), 2013–2015 гг.
3. С Технологической компанией IRCN (КНР), 2016–2017 гг.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на Международных конференциях «Intense Microwave pulses V», San Diego,

California, 1997; «IEEE Pulsed Power Plasma Science», Las Vegas, Nevada, 2001; «American Electromagnetics Conference», Annapolis, Maryland, 2002; «European Electromagnetics Conference», Lausanne, Switzerland, 2010; 13, 14, 15, 16 International Symposium on High Current Electronics, Tomsk, 2004, 2006, 2008, 2010; IV, V, VI Международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы радиофизики», Томск, 2012, 2013, 2015; III, V Всероссийских научно-технических конференциях «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 2009, 2011; I, II, IV Всероссийских Микроволновых конференциях, Москва, 2013, 2014, 2016.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 23 статьи, из них 15 статей, входящих в журналы из перечня ВАК РФ, и 17 докладов на конференциях.

Структура и объём диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 135 страниц, включая 12 таблиц, 166 рисунков и 112 библиографических ссылок.

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 результатов обработки измерений. Созданием мощных источников СШП-излучения на основе КА (Глава 2 и Глава 3) занималась большая группа сотрудников ИСЭ СО РАН: Андреев Ю.А., Губанов В.П., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Коровин С.Д., Кошелев В.И., Кремнев В.В., Ростов В.В., Степченко А.С., Сухушин К.Н. Участие автора заключалось в создании СШП-излучателей, делителей мощности, исследовании их характеристик и характеристик излучения мощных СШП-источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. Рассматриваются известные источники мощных СШП-импульсов на основе зеркальных антенн, в том числе Impulse Radiating Antenna, ТЕМ-рупоров и комбинированных антенн. Проводится обзор публикаций по синтезу излучения путем сложения электромагнитных импульсов в свободном пространстве. В конце главы на основе проведенного анализа формулируются задачи исследования.

Во второй главе рассматриваются комбинированные антенны и источники с одиночной антенной. Изложены теоретические предпосылки

улучшения согласования и расширения полосы пропускания в область низких и высоких частот комбинированных антенн. Показано, что по соотношению геометрических размеров к ширине полосы пропускания и величине обратной мощности комбинированная антенна с ТЕМ-рупором является оптимальным выбором для элемента СШП-решеток. Рассмотрены методы и устройства для измерения характеристик СШП-антенн и импульсов излучения.

Важнейшими характеристиками СШП-антенн и источников излучения на их основе являются:

эффективный потенциал излучения, определяемый как rE_p , где r – расстояние от антенны до точки наблюдения в дальней зоне, E_p – максимальная напряженность поля в точке наблюдения;

энергетическая эффективность антенны, определяемая как

$$k_w = W_{rad}/W_g, \quad (1)$$

где W_{rad} – излученная антенной энергия, W_g – энергия в импульсе напряжения на входе антенны;

эффективность по пиковой напряженности электрического поля, определяемая как

$$k_E = rE_p/U_g, \quad (2)$$

где U_g – пиковое значение модуля амплитуды напряжения генератора.

На рисунке 1 схематически представлена геометрия комбинированной антенны КА. Ширина и высота антенны равны и $h \cong L$, где L продольный размер антенны. Верхняя часть ТЕМ-рупора соединяется гальванически с корпусом антенны и является магнитным диполем. Нижняя часть ТЕМ-рупора также соединяется с корпусом антенны. Периметр S активного магнитного диполя 3 изменялся перемещением пластины 5 . Максимальный периметр диполя $S = S_0$, имеет место при отсутствии пластины 5 . В центре задней стенки антенны имеется отверстие для присоединения фидера с волновым сопротивлением 50 Ом.

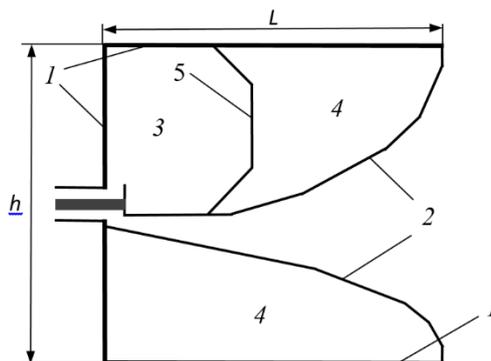


Рисунок 1 – Геометрия КА. 1 – корпус, 2 – ТЕМ-рупор, 3 – активный магнитный диполь, 4 – пассивные магнитные диполи, 5 – пластина

На основе представленной выше конструкции КА с использованием принципа электродинамического подобия была разработана линейка комбинированных антенн, оптимизированных для возбуждения биполярными импульсами напряжения длительностью 3, 2, 1, 0.5 и 0.2 нс (Рисунок 2).

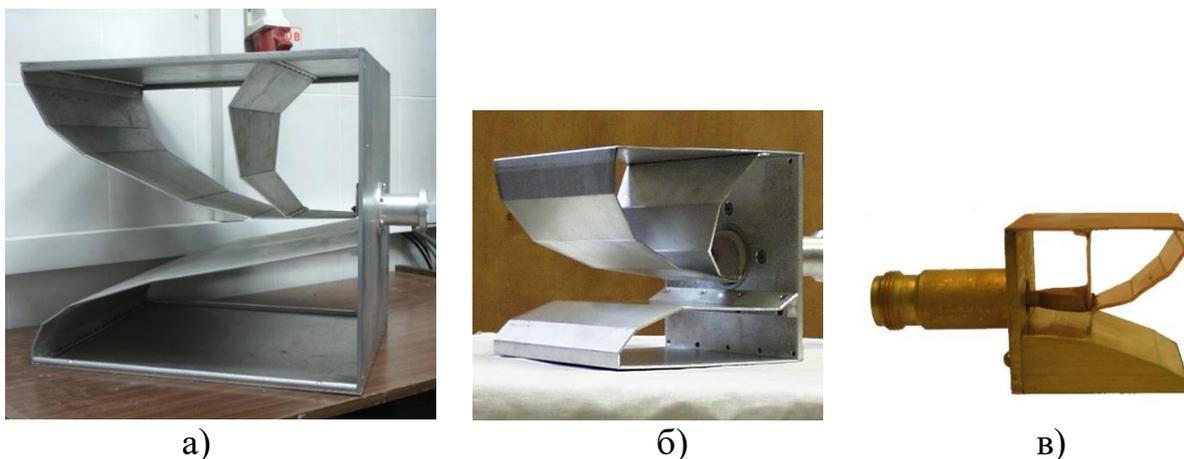


Рисунок 2 – Внешний вид антенн КА3 – (а), КА1-2 – (б) и КА0.2 – (в)

Характеристики разработанных КА приведены в таблице 1, здесь f_L – нижняя, а f_H – верхняя граничные частоты спектра излучения по уровню - 10 дБ, $\Delta f = f_H - f_L$ – ширина спектра, $f_0 = (f_H + f_L)/2$ – средняя частота спектра излучения, $\Delta f/f_0$ – относительная ширина спектра. Параметры мощных источников СШП-излучения на их основе приведены в таблице 2.

Таблица 1 Параметры КА

	Габариты, см	Длительность импульса возбуждения, нс	КСВН по уровню 2, f_L/f_H , ГГц	$\Delta f/f_0$	f_H/f_L	Ширина ДН E/H-плоскости, градусы	k_w	k_E
КА3	45×45×47	3	0.11/1.11	1.64	10	74/73	0.93	2
КА2	30×30×32	2	0.18/1.1	1.44	6.11	79/87	0.9	1.9
КА1-1	15×15×16	1	0.54/1.85	1.1	3.43	101/98	0.87	1.2
КА1-2	15×15×16	1	0.63/2.02	1.05	3.21	103/92	0.92	1.25
КА1-3	15×15×16	1	0.64/2.04	1.04	3.19	104/88		1.3
КА0.5	7.5×7.5×8	0.5	0.94/4.23	1.27	4.5	106/83	0.9	1.2
КА0.2	4×4×4.3	0.2	1.4/9.76	1.5	6.97	98/92	0.92	0.9
КА1-0.5-1	15×15×17	0.5 1	0.41/1.95	1.3	4.76	-	-	- 1.3
КА1-0.5-2	15×15×16	0.5 1	0.36/4.63	1.71	12.86	70/84 108/98	0.94 0.9	- 1.17

Таблица 2 Параметры мощных источников СШП-излучения с КА

	КА0.2	КА0.5	КА1	КА2	КА3
Длительность импульса напряжения, нс	0.2	0.5	1	2	3
Амплитуда импульса напряжения, кВ	100	200	200	230	150
Эффективный потенциал rE_p , кВ	100	260	300	400	280
k_E	1	1.3	1.5	1.74	1.86

В третьей главе численно исследовано влияние амплитудного распределения по апертуре решетки на уровень бокового излучения. Показано (Рисунок 3), что при возбуждении решетки КА биполярным импульсом напряжения с точки зрения получения максимального эффективного потенциала излучения оптимальным является использование

равноамплитудного распределения. Проведены исследования по оптимизации структуры решеток. Показано, что, учитывая требование минимизации размеров, для решеток КА оптимальным является гальваническое соединение элементов в E -плоскости ($d_v = h$) и их разнесение на расстояние $0.1\tau_p c$ ($d_h \approx 1.2h$) в H -плоскости.

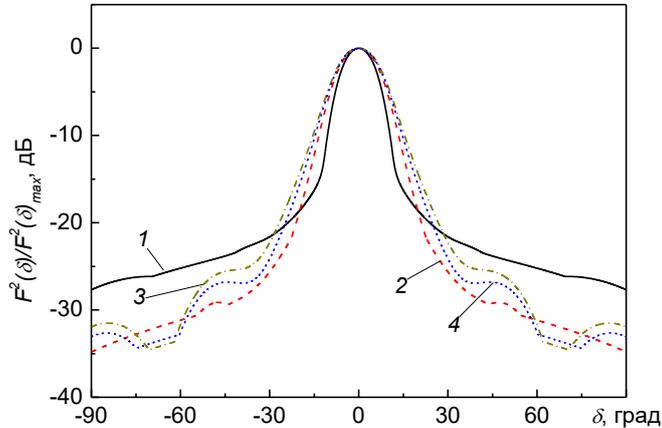


Рисунок 3 – Расчетные ДН 8-ми элементной линейной решетки возбуждаемой биполярным импульсом с равноамплитудным распределением – 1, распределениями косинус на пьедестале – 2, косинус в квадрате на пьедестале – 3 и Дольфа-Чебышева – 4

Представлены характеристики решеток КА и источников мощного СШП-излучения (Рисунок 4) на их основе (Таблица 3).



Рисунок 4 – Внешний вид источника СШП-излучения с 64-элементной решеткой

Рассмотрены особенности антенно-фидерных систем для источников мощного СШП-излучения. Для делителей с числом выходов 16 и менее оптимальным оказалось использование кордельных коаксиальных кабелей, заполненных газом SF_6 под давлением 5 атм. Причем, трансформатор сопротивлений и делитель мощности в этом случае, тоже были с газовой изоляцией. Этот вариант давал минимальные потери мощности при достаточной электрической прочности и обеспечивал длительное время работы (более 2×10^6 импульсов) при уровне пиковой мощности биполярных импульсов до 1 ГВт на частоте повторения 100 Гц. Для источника с 64-элементной решеткой была использована конструкция со ступенчатым

делителем мощности (Рисунок 5). Сопротивление волновых трансформаторов рассчитывалось с помощью выражения для компенсированного экспоненциального перехода:

$$\rho(x) = \rho_0 \exp \left\{ \ln \frac{\rho_L}{\rho_0} \left(\frac{L-x}{L} - 0.133 \sin \left(2\pi \frac{L-x}{L} \right) \right) \right\}, \quad (3)$$

где L – длина перехода, ρ_0 и ρ_L начальное и конечное сопротивление перехода.



Рисунок 5 - 64-канальный делитель мощности

Благодаря широкой кардиоидной диаграмме направленности (ДН) КА, решетки на их основе обеспечивают сканирование волновым пучком СШП-излучения в пределах $\pm 45-55^\circ$. Режим сканирования реализовывался подбором длин кабелей, возбуждающих элементы решетки, таким образом, чтобы они обеспечивали нужную временную задержку импульса. Расчет задержек осуществлялся путем решения задачи одновременного прихода излученных импульсов в заданную точку наблюдения.

Относительные эффективные потенциалы мощных источников СШП-излучения на основе решеток КА и одиночных широкоапертурных отражательных антенн типа IRA и HIRA сопоставимы (Таблица 3). Однако, отношение эффективного потенциала излучения к площади апертуры $k_S = rE_p / S$ при одинаковой длительности импульса СШП-излучения $\tau_p \sim 100$ пс у решеток КА на 1–2 порядка выше, чем у IRA и HIRA. Это обусловлено равномерным распределением поля на апертуре решетки и использованием биполярных импульсов напряжения для возбуждения элементов решетки.

Предельный эффективный потенциал излучения можно оценить, используя следующее выражение:

$$rE_\theta(r, 0, 0, 0) = \frac{\sqrt{Z_0 W}}{2\sqrt{2\pi}} \sqrt{\int_{\Omega} \left[\sum_{n=1}^{N(\omega)} (2n + 1) \right] d\omega},$$

где rE_θ – произведение напряженности электрического поля E_θ на расстоянии r в дальней зоне; Z_0 – волновое сопротивление окружающей антенну среды; W – полная излученная энергия. Интегрирование проводится по положительным и по отрицательным частотам Ω ; $N = [\omega_0 a / c + 2\pi]$ – число учитываемых мод, a

- радиус минимальной сферы, в которую помещается антенна или решетка, c
- скорость света.

Для сравнительного анализа была выполнена оценка $rE_{\theta} = rE_{2\pi}$ для различных излучателей и получены значения коэффициента эффективности как отношения экспериментально измеренного потенциала излучения к предельному rE_{exp}/rE_{θ} . В таблице 3 приведены исходные данные и результаты расчетов: τ_p – длительность биполярного импульса напряжения, W – полная излученная энергия (для IRA и HIRA в скобках указана запасенная энергия). В расчетах полагали, что энергетическая эффективность излучения биполярных импульсов антеннами равна 100%.

Из полученных результатов для решеток КА следует, что относительная эффективность возрастает с увеличением числа элементов. Для 9-элементной решетки КА, возбуждаемых от генератора биполярных импульсов длительностью 2 нс, получено максимальное значение $rE_{exp}/rE_{\theta} = 0.58$. Это обусловлено уменьшением потерь энергии в фидерной системе при использовании газовой (SF_6) изоляции. В таблице 3 приведены также оценки эффективности по пиковой напряженности поля $k_E = rE_p / U_{g\ max}$ и по площади $k_S = rE_p / S$. Здесь эффективность по полю $k_E = 21.5$ максимальна для решетки КА 8×8 , а эффективность по площади $k_S = 1.6 \cdot 10^7$ кВ/м² максимальна для решетки КА 4×4 , возбуждаемой биполярным импульсом длительностью 0.2 нс.

Таблица 3 Параметры антенн и решеток

	КА	IRA	HIRA	TEM	2×2 КА	4×4 КА	3×3 КА	4×4 КА	8×8 КА	4×4 КА	4×4 КА
τ_p , нс	2	-	-	1	3	2	2	1	1	0.5	0.2
W , Дж	1.17	0.015(2)	1.1(26)	0.175	0.94	1.18	0.8	0.36	1.2	0.169	0.037
f_L , МГц	100	50	50	50	53	96	60	207	210	436	413
f_H , МГц	934	2900	2100	2110	570	942	770	1589	2100	3394	8078
f_0 , МГц	517	1475	1075	1080	311.5	519	415	898	1155	1915	4245
$\Delta f/f_0$, %	161	193	191	191	166	163	171	154	164	154	180
a , м	0.266	1.83	1.525	0.716	0.692	0.928	0.696	0.494	1	0.247	0.119
rE_{exp}/rE_{θ}	0.26	0.5	0.45	0.35	0.383	0.56	0.582	0.385	0.5	0.331	0.268
$U_{g\ max}$, кВ	230	130	1000	150	90	230	100	210	200	200	120
rE_p , кВ	440	1280	5300	910	530	1700	1000	780	4300	700	450
k_E	1.9	9.8	5.3	6.1	5.9	7.4	10	3.7	21.5	3.5(3.1)	3.75
$k_S = rE_p/S$, кВ/м ²	4.9E6	1.2e5	1.45E6	5.4E6	6.2E5	1.0E6	1.1E6	1.6E6	2.2E6	5.9E6	1.6E7

В четвертой главе представлена численная модель сложения импульсов излучения с различной шириной спектра в свободном пространстве. Рассмотрено увеличение ширины спектра синтезированного импульса на примере импульсов, излучаемых КА, возбуждаемыми биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс. Для моделирования импульса, излученного КА, использовали производную суммы двух гауссовых функций:

$$E(t, \tau) = \left(\frac{1}{\tau} - 1\right) e^{-\left(\frac{4t}{\tau} - 4\right)^2} - \left(\frac{1}{\tau} - 0.5\right) e^{-\left(\frac{4t}{\tau} - 2\right)^2}, \quad (4)$$

где τ – длительность импульса напряжения на входе в антенну.

Синтезированные импульсы оптимизировались по двум параметрам: максимальной амплитуде поля и максимальной ширине спектра. Рассматривались варианты сложения двух импульсов 2 и 3 нс, трех импульсов – 1, 2 и 3 нс и четырех импульсов – 0.5, 1, 2 и 3 нс. Параметры синтезированных импульсов приведены в таблице 4.

Таблица 4 Расчетные параметры импульсов излучения

импульс СШП-излучения	f_L (ГГц)	f_H (ГГц)	f_0 (ГГц)	Δf (ГГц)	$\Delta f/f_0$	$b = f_H/f_L$
0.5 нс	0.664	3.074	1.869	2.410	1.29	4.632
1 нс	0.332	1.537	0.934	1.205	1.29	4.632
2 нс	0.1658	0.7686	0.4672	0.6028	1.290	4.636
3 нс	0.1104	0.5125	0.3115	0.4021	1.291	4.643
2+3 нс, по максимуму амплитуды	0.1209	0.6232	0.3721	0.5023	1.35	5.153
2+3 нс, по максимальной ширине спектра	0.0835	0.72	0.4017	0.6364	1.584	8.618
1+2+3 нс, по максимуму амплитуды	0.123	0.725	0.424	0.602	1.418	5.876
1+2+3, по максимальной ширине спектра	0.079	1.346	0.713	1.267	1.778	17.05
0.5+1+2+3 нс, по максимуму амплитуды	0.124	0.766	0.445	0.612	1.37	6.18
0.5+1+2+3 нс, по максимальной ширине спектра	0.081	1.78	0.93	1.7	1.83	22

Для примера на рисунке 6 приведены результаты сложения импульсов 0.5, 1, 2 и 3 нс с задержками, оптимизированными для максимальной ширины спектра. По сравнению с одиночным импульсом отношение верхней и нижней граничных частот суммарного импульса увеличилось в 4.7 раза.

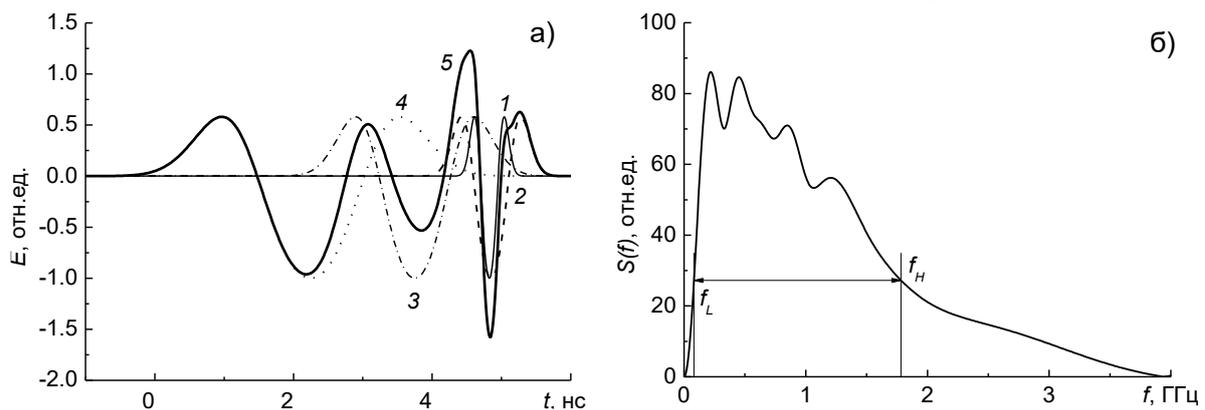


Рисунок 6 – Сложение импульсов с задержками, найденными методом перебора с шагом 0.05 нс и равными 4.45 нс (0.5 нс), 4.1 нс (1 нс) и -2.25 нс (2 нс) относительно импульса длительностью 3 нс. а) импульсы излучения от отдельных антенн (кривые 1–4) и суммарный импульс (кривая 5); б) спектр суммарного импульса излучения ($f_H/f_L = 22$)

Моделирование ДН при возбуждении решеток двумя импульсами длительностью 1 и 2 нс и четырьмя импульсами длительностью 0.5, 1, 2, и 3 нс показало, что для плоской решетки, возбуждаемой биполярными импульсами

разной длительности, симметричная ДН может быть сформирована, когда элементы решетки, излучающие импульсы одной длительности, расположены симметрично относительно центра решетки.

Были проведены экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн низковольтными и высоковольтными биполярными импульсами длительностью 3, 2, 1 и 0.5 нс. Параметры маломощных импульсов излучения приведены в таблице 5. Для синтезированного импульса с задержкой, оптимизированной для получения максимальной ширины спектра, ширина спектра Δf увеличилась в 1.3–2 раза, а по отношению крайних частот b от 1.6 до 4 раз.

Таблица 5 Параметры маломощных импульсов излучения

импульс СШП-излучения	f_L , ГГц	f_H , ГГц	f_0 , ГГц	Δf , ГГц	$\Delta f/f_0$	$b = f_H/f_L$
0.5+1 нс, макс. ампл.	0.367	2.206	1.286	1.839	1.429	6.008
0.5+1 нс, макс. спектр	0.266	2.845	1.556	2.578	1.657	10.676
2+3 нс, макс. ампл.	0.147	1.032	0.5895	0.885	1.5	7.02
2+3 нс, макс. спектр	0.1085	1.3385	0.7235	1.23	1.7	12.34
0.5+1+2+3 нс, макс. ампл.	0.119	1.18	0.65	1.06	1.63	9.91
0.5+1+2+3 нс, макс. спектр	0.074	2.34	1.133	2.266	2	31.6

В таблице 6 приведены параметры мощных синтезированных импульсов СШП-излучения. Ширина спектра синтезированного импульса по отношению крайних частот увеличена в 2.1–2.6 раза по сравнению с СШП-источниками на основе решеток, возбуждаемых одинаковыми биполярными импульсами.

Таблица 6 Параметры мощных импульсов излучения

импульс СШП-излучения	f_L , ГГц	f_H , ГГц	f_0 , ГГц	Δf , ГГц	$\Delta f/f_0$	$b = f_H/f_L$
0.5+1 нс, макс. ампл.	0.394	2.127	1.261	1.733	1.375	5.4
0.5+1 нс, макс. спектр	0.196	2.591	1.394	2.395	1.718	13.208
2+3 нс, макс. ампл.	0.18	0.768	0.474	0.588	1.24	4.27
2+3 нс, макс. спектр	0.101	1.047	0.574	0.946	1.648	10.37
0.5+1+2+3 нс, макс. ампл.	0.102	0.907	0.5	0.805	1.6	8.9
0.5+1+2+3 нс, макс. спектр	0.086	1.45	0.76	1.36	1.78	16.9

В заключении сформулированы основные научно-технические результаты и выводы диссертационной работы.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Использование в конструкции антенн комбинации ТЕМ-рупора и магнитного излучателя позволило расширить их полосу согласования как в область высоких, так и в область низких частот. По соотношению геометрических размеров к ширине полосы пропускания и величине обратной мощности КА является оптимальным выбором в качестве элемента СШП-

решеток. Полоса пропускания, достаточная для эффективного (~90 %) излучения энергии биполярных импульсов, обеспечивается при размерах антенн, примерно равных половине пространственной длины возбуждающего импульса напряжения. На основе принципа электродинамического подобия разработанная конструкция КА масштабировалась для разных длительностей биполярных импульсов.

2. С использованием КА созданы источники мощного СШП-излучения с длительностями биполярных импульсов напряжения от 0.2 нс до 3 нс. В источнике с антенной КА2, возбуждаемой биполярными импульсами напряжения длительностью 2 нс и амплитудой 230 кВ, получены импульсы СШП-излучения с эффективным потенциалом $rE_p \approx 400$ кВ.

3. Максимальный эффективный потенциал при возбуждении решетки КА биполярным импульсом напряжения достигается при использовании равноамплитудного распределения. Для подвода импульсов напряжения к элементам решетки оптимальным с точки зрения уменьшения потерь мощности при достаточной электрической прочности является использование кордельных кабелей, заполненных газом SF₆ под давлением 5 атм.

4. На основе решеток КА создана линейка источников мощного СШП-излучения с длительностями биполярных импульсов напряжения от 0.2 нс до 3 нс. На источнике с 64-элементной решеткой КА, возбуждаемой биполярными импульсами напряжения длительностью 1 нс и амплитудой 200 кВ, получены импульсы СШП-излучения с эффективным потенциалом $rE_p \approx 4.3$ МВ.

5. Разработаны и исследованы антенные решетки для последовательного излучения импульсов с ортогональными поляризациями и эффективным потенциалом 300 кВ. Для совпадения ДН ортогональных подрешеток их элементы располагаются по диагоналям.

6. Благодаря широкой кардиоидной ДН КА решетки на их основе обеспечивают сканирование волновым пучком СШП-излучения в пределах $\pm 45-55^\circ$.

7. Построена численная модель синтеза импульсов излучения с помощью сложения в свободном пространстве импульсов с различной шириной спектра. По результатам расчетов выбраны оптимальные конфигурации плоской четырехэлементной решетки, возбуждаемой различными комбинациями биполярных импульсов длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс. Показана возможность увеличения отношения крайних частот в спектре импульса синтезированного излучения до 22.

8. В экспериментальных исследованиях синтеза излучения малой мощности для решетки, возбуждаемой биполярными импульсами длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс, получены импульсы излучения с отношением крайних частот до 10 в режиме максимальной амплитуды поля. В режиме максимальной ширины спектра — это отношение достигает 32. Различие между расчетными и экспериментальными значениями ширины спектра

обусловлено отличием формы экспериментальных импульсов излучения от модельных.

9. Экспериментально исследован синтез мощных импульсов излучения на основе решетки 2×2 КА, возбуждаемых различными комбинациями биполярных импульсов напряжения длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс. Реализовано два режима синтеза излучения: максимальная напряженность поля (эффективный потенциал излучения 600 кВ при отношении крайних частот 5.4 для импульса 0.5 + 1 нс) и максимальная ширина спектра (эффективный потенциал излучения 185 кВ при отношении крайних частот 16.9 для импульса 0.5 + 1 + 2 + 3 нс).

Разработанные источники мощного СШП-излучения могут использоваться в исследованиях по устойчивости электронных систем. Развитый метод синтеза СШП-импульсов является перспективным для управления спектральными характеристиками в адаптивной радиолокации.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, соответствующие перечню периодических изданий, рекомендуемых ВАК:

1. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И., Плиско В.В. О возможности расширения полосы пропускания малогабаритных излучателей // Радиотехника и электроника, Т. 44, № 2, 1999. С. 178-184.

2. Губанов В.П., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Коровин С.Д., Кошелев В.И., Плиско В.В., Степченко А.С., Сухушин К.Н. Источники мощных импульсов сверхширокополосного излучения с одиночной антенной и многоэлементной решеткой // Приборы и техника эксперимента, № 3, 2005. С. 46-54.

3. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н. Генерация и излучение мощных сверхширокополосных импульсов наносекундной длительности // Радиотехника и электроника, Т. 52, № 7, 2007. С. 813-821.

4. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н. Мощные источники сверхширокополосного излучения с субнаносекундной длительностью импульса // Приборы и техника эксперимента, № 1, 2011. С. 77-83.

5. Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н. Высокоэффективный источник мощных импульсов сверхширокополосного излучения наносекундной длительности // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 6. С. 51-60.

6. Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н. Генерация и излучение мощных сверхширокополосных импульсов пикосекундной длительности // Радиотехника и электроника, Т. 56, № 12, 2011. С. 1457-1467.

7. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В. Четырехканальный источник мощных импульсов сверхширокополосного излучения // Приборы и техника эксперимента, № 3, 2013. С. 61-67.

8. Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk V.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N. Generation and radiation of ultra-wideband electromagnetic pulses with high stability and effective potential // *Laser Particle Beams*, Vol. 32, No. 3, 2014. pp. 413–418.

9. Губанов В.П., Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Ростов В.В., Степченко А.С. Источник мощных импульсов сверхширокополосного излучения с 9-элементной решеткой комбинированных антенн // *Приборы и техника эксперимента*, № 2, 2017. С. 61-67.

10. Кошелев В.И., Плиско В.В. Структура решеток сверхширокополосных комбинированных антенн // *Радиотехника и электроника*, Т. 62, № 6, 2017. С. 541-545.

11. Кошелев В.И., Плиско В.В., Севостьянов Е.А. Синтез наносекундных импульсов сверхширокополосного излучения // *Известия вузов. Физика*, Т. 60, № 8, 2017. С. 98-102.

12. Efremov A.M., Koshelev V.I., Plisko V.V., Sevostyanov E.A. A high-power synthesized ultrawideband radiation source // *Rev. Sci. Instrum*, Vol. 88, No. 9, Sep 2017. P. 094705.

13. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Плиско В.В., Севостьянов Е.А. Мощный источник сверхширокополосных импульсов синтезированного излучения // *Приборы и техника эксперимента*, № 1, 2019. С. 36–45.

14. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Плиско В.В. Синтез электромагнитных импульсов с разной частотной полосой в свободном пространстве // *Радиотехника и электроника*, Т. 65, № 5, 2020. С. 442–456.

15. Кошелев В.И., Плиско В.В. Фазовый центр и центр излучения комбинированных антенн, возбуждаемых биполярными импульсами // *Радиотехника и электроника*, Т. 66, № 12, 2021. С. 1172-1177.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

16. Koshelev V.I., Buyanov Y.I., Kovalchuk V.M., Andreev Y.A., Belichenko V.P., Efremov A.V., Plisko V.V., Sukhushin K.N., Vizir V.A., Zorin V.B. High-power ultrawideband electromagnetic pulse radiation // *Proc. SPIE*. Vol. 3158. 1997. pp. 209-219.

17. Koshelev V.I., Andreev Y.A., Efremov A.M., Kovalchuk V.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N., Liu S. Study on Stability and Efficiency of High-Power Ultrawideband Radiation Source // *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 6, No. 5, 2012. pp. 771-776.

18. Кошелев В.И., Плиско В.В. Формирование диаграммы направленности четырехэлементных линейных решеток при сканировании волновым пучком // *Известия вузов. Физика*, Т. 55, № 9/2, 2012. С. 33-36.

19. Koshelev V.I., Efremov A.M., Kovalchuk V.M., Plisko V.V. High-power source of ultrawideband radiation with wave beam steering // *Известия вузов. Физика*, Т. 55, № 10/3, 2012. С. 217–220.

20. Кошелев В.И., Плиско В.В. Энергетические характеристики четырехэлементных решеток комбинированных антенн // *Известия вузов. Физика*, Т. 56, № 8/2, 2013. С. 134-138.

21. Кошелев В.И., Плиско В.В., Севостьянов Е.А. Синтез сверхширокополосного излучения на основе решетки комбинированных антенн,

возбуждаемой биполярными импульсами разной длительности // Известия вузов. Физика, Т. 58, № 8/3, 2015. С. 54-58.

22. Koshelev V.I., Plisko V.V., Sevostyanov E.A. Synthesis of ultrawideband radiation of combined antenna arrays excited by nanosecond bipolar voltage pulses // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 830, 2017. P. 012012.

23. Koshelev V.I., Plisko V.V. Arrays of combined antennas excited by high-voltage bipolar pulses // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1843, 2021. P. 012002.

Доклады в сборниках материалов конференций:

24. Koshelev V.I., Buyanov Y.I., Andreev Y.A., Plisko V.V., Sukhushin K.N. Ultrawideband radiators of high-power pulses // Proc. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf. 2001. Vol. 2. pp. 1661-1664.

25. Koshelev V.I., Gubanov V.P., Efremov A.M., Korovin S.D., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Stepchenko A.S., Sukhushin K.N. High-power ultrawideband radiation source with multielement array antenna // Proc. 13 Inter. Symposium on High Current Electronics. Tomsk. 2004. pp. 258–261.

26. Koshelev V.I., Andreev Y.A., Buyanov Y.I., Plisko V.V., Sukhushin K.N. Ultrawideband transmitting antennas, arrays, and high-power radiation sources // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 6. 2003. pp. 357–367.

27. Belichenko V.P., Koshelev V.I., Plisko V.V., Buyanov Y.I., Litvinov S.N. Estimation of an Utmost Efficient Potential of Ultrawideband Radiating Systems // Proc. 14 Inter. Symposium of High Current Electronics. Tomsk. 2006. pp. 391-394.

28. Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N. Source of high-power ultrawideband wave beams with orthogonal polarization // Proc. 14 Inter. Symposium on High Current Electronics. Tomsk. 2006. pp. 395–398.

29. Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N. High-Power Sources of Ultrawideband Radiation with Subnanosecond Pulse Length // Proc. 14 Inter. Symp. on High Current Electronics. Tomsk. 2006. pp. 446-449.

30. Koshelev V.I., Plisko V.V. Interaction of ultrawideband radiators in linear array with wave beam steering // Proc. 14 Inter. Symposium on High Current Electronics. Tomsk. 2006. pp. 413–416.

31. Andreev Y.A., Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N. High-power sources of ultrawideband picosecond radiation pulses // Proc. 15 Inter. Symposium on High Current Electronics. Tomsk. 2008. pp. 447–450.

32. Koshelev V.I., Efremov A.M., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N. High-power source of ultrawideband radiation wave beams with high directivity // Proc. 15 Inter. Symposium on High Current Electronics. Tomsk. 2008. pp. 383–386.

33. Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н. Генерация и излучение мощных пикосекундных электромагнитных импульсов // Доклады III Всероссийской научно-практической конференции «Радиолокация и радиосвязь». Москва. 2009. Т. 2. С. 142–146.

34. Koshelev V.I., Andreev Y.A., Efremov A.M., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N., Liu S. Increasing Stability and Efficiency of High-Power

Ultrawideband Radiation Source // Proc. 16 Inter. Symposium on High Current Electronics. Tomsk. 2010. pp. 415-418.

35. Plisko V.V., Andreev Y.A., Efremov A.M., Koshelev V.I., Sukhushin K.N. Source of high-power ultrawideband picosecond pulses with 16-element array // Proc. 16 Inter. Symposium on High Current Electronics. Tomsk. 2010. pp. 485-488.

36. Koshelev V.I., Plisko V.V., Sukhushin K.N. Array antenna for directed radiation of high-power ultrawideband pulses // Proc. Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9. 2010. pp. 259-267.

37. Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Плиско В.В. Характеристики ТЕМ антенн в режимах приема и излучения // Доклады V Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». 2011. С. 77-82.

38. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н. Мощный источник сверхширокополосного излучения с мультимегавольтным эффективным потенциалом // Доклады 1 Всероссийской Микроволновой конференции. Москва. 2013. С. 197-201.

39. Кошелев В.И., Плиско В.В. Оптимизация структуры решеток сверхширокополосных комбинированных антенн // Доклады II Всероссийской Микроволновой конференции. Москва. 2014. С. 19-14.

40. Кошелев В.И., Плиско В.В., Севостьянов Е.А. Расширение спектра излучения при сложении электромагнитных импульсов в свободном пространстве // Доклады IV Всероссийской Микроволновой конференции. Москва. 2016. pp. 115-119.