

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



ПЛИСКО ВЯЧЕСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ
РЕШЕТКАМИ КОМБИНИРОВАННЫХ АНТЕНН**

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор физ.-мат. наук, профессор
Кошелев Владимир Ильич

Томск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫ И РЕШЕТКИ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ.....	12
1.1 Введение	12
1.2 Излучатели на основе зеркальных антенн	12
1.3 ТЕМ-рупоры и решетки	16
1.4 Комбинированные антенны и решетки	18
1.5 Синтез излучения в свободном пространстве	19
1.6 Выводы	21
2. КОМБИНИРОВАННЫЕ АНТЕННЫ	23
2.1 Излучение системы электрического и двух магнитных диполей.....	23
2.2 Комбинированная антенна с ТЕМ-рупором	24
2.3 Конструкция комбинированной антенны КА.....	26
2.4 Методы и устройства для измерения характеристик СШП-антенн и излучения	27
2.4.1 Частотные характеристики антенн.....	27
2.4.2 Приемные антенны	27
2.4.3 Временные характеристики антенн.....	29
2.5 Антенна, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 3 нс (КА3)	32
2.6 Антенна, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 2 нс (КА2)	41
2.7 Антенны, возбуждаемые биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс.....	43
2.8 Антенна, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 0.5 нс.....	45
2.9 Антенна, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 0.2 нс.....	47
2.10 Расширение полосы пропускания антенны для излучения импульсов 0.5 и 1 нс.....	49
2.11 Источники мощного СШП-излучения с КА	53
2.12 Выводы	56

3. РЕШЕТКИ КОМБИНИРОВАННЫХ АНТЕНН, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ БИПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ОДИНАКОВОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ.....	58
3.1 Моделирование решеток и уровень бокового излучения.....	58
3.2 Оптимизация структуры решеток.....	61
3.3 Характеристики решеток и источников излучения.....	65
3.3.1 Решетка, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 3 нс.....	65
3.3.2 Решетки, возбуждаемые биполярным импульсом напряжения длительностью 2 нс.....	67
3.3.3 Решетки, возбуждаемые биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс.....	72
3.3.4 Решетка, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 0.5 нс.....	81
3.3.5 Решетка, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 0.2 нс.....	83
3.3.6 Антенно-фидерная система.....	86
3.4 Управление диаграммой направленности излучения.....	87
3.5 Предельный эффективный потенциал излучения (сравнительные оценки характеристик антенн и решеток).....	91
3.6 Выводы.....	93
4. СИНТЕЗ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....	95
4.7 Моделирование сложения в свободном пространстве импульсов излучения.....	95
4.8 Маломощные источники синтезированного излучения.....	104
4.8.7 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн низковольтными биполярными импульсами длительностью 3 нс и 2 нс.....	105
4.8.8 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки.....	

комбинированных антенн низковольтными биполярными импульсами длительностью 1 нс и 0.5 нс	109
4.8.9 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн низковольтными биполярными импульсами длительностью 3 нс, 2 нс, 1 нс и 0.5 нс	111
4.9 Мощные источники синтезированного излучения	114
4.9.1 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн высоковольтными биполярными импульсами длительностью 3 нс и 2 нс	115
4.9.2 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн высоковольтными биполярными импульсами длительностью 1 нс и 0.5 нс	117
4.9.3 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн высоковольтными биполярными импульсами длительностью 3 нс, 2 нс, 1 нс и 0.5 нс	119
4.10 Выводы	121
Заключение	123
Литература	125
ПРИЛОЖЕНИЕ	135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационного исследования

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 [1], [2], [3], [4], [5]. Второй важной областью применения мощного СШП-излучения является радиолокация с высоким пространственным разрешением, которое обусловлено короткой длительностью импульсов [6], [7], [8]. Главной задачей СШП-радиолокации является распознавание объектов [9]. Мощные источники СШП-излучения разрабатываются также для систем связи [10].

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 отражательных (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) [11]. В этой антенне использовались 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 [12] 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 [13] и ОИВТ РАН [14], 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 [15].

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 [16] и 4-элементная решетка [17]. 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 [18]. 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, представлен в работе [19]. 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 [20]. Исследования в этом направлении представляют несомненный интерес.

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

Задачи исследования

- Исследование КА, оптимизированных для возбуждения биполярными импульсами длительностью 0.2–3 нс, в качестве элемента решетки мощных источников СШП-излучения.
- Разработка, исследование и оптимизация многоэлементных плоских решеток на основе КА для излучения мощных СШП электромагнитных импульсов с линейной и ортогональными поляризациями поля.
- Разработка и исследование фидерных систем решеток, включая делители мощности.
- Построение численной модели синтеза импульсов излучения в свободном пространстве для оптимизации конфигурации плоской решетки и расчета параметров задержек импульсов.
- 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 (SF_6) 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 2×10^6 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. 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 гигаватного 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, IV, V Всероссийских научно-технических конференциях «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 2009, 2010, 2011; I, II, IV Всероссийских Микроволновых конференциях, Москва, 2013, 2014, 2016.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 23 статьи ([61, 62, 63, 64, 68, 69, 70, 72, 74, 78, 80, 82, 84, 85, 89, 95, 100, 101, 102, 105, 106, 111, 112]), из них 15 статей, входящих в журналы из перечня ВАК РФ, и 17 докладов на конференциях ([18, 65, 73, 81, 83, 86, 87, 88, 91, 93, 94, 96, 97, 98, 99, 103, 107]).

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.

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.

1. СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫ И РЕШЕТКИ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

1.2 Введение

Как следует из названия, главной характеристикой СШП-импульсов является занимаемая импульсом полоса частот. В общем виде для ее нахождения можно воспользоваться интегральным преобразованием Фурье:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i\omega t} dt,$$

где $s(t)$ – временная форма импульса, ω – циклическая частота.

Комплекснозначная функция $S(\omega)$ может быть представлена в виде:

$$S(\omega) = |S(\omega)|e^{i\varphi(\omega)},$$

где $|S(\omega)|$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), а $\varphi(\omega)$ – фазочастотная характеристика (ФЧХ).

Для оценки полосы частот широко используются две характеристики:

Относительная полоса частот, определяемая соотношением [21]:

$$\eta = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L},$$

где f_H и f_L – верхняя и нижняя частоты в спектре импульса отсчитываемые, как правило, по уровню -10 дБ, и коэффициент перекрытия по частоте:

$$b = \frac{f_H}{f_L},$$

который может быть выражен через относительную полосу частот следующим образом:

$$b = \frac{2 + \eta}{2 - \eta}.$$

В [22] к СШП-сигналам предложено отнести спектральную полосу с $b > 10$ ($\eta > 1.63$). Кроме того, в настоящее время широко используется определение Федеральной комиссии по связи (FCC) США [23], согласно которому СШП-сигналы должны иметь $\eta > 0.2$, или полосу частот излучения $f_H - f_L \geq 0.5$ ГГц.

1.3 Излучатели на основе зеркальных антенн

Одним из способов получения мощного СШП-излучения с коротким импульсом является использование зеркальных антенн. В 90-е годы прошлого столетия в США была разработана Impulse Radiating Antenna (IRA) [24], [25]. На рисунке 1.1 изображена IRA с зеркалом диаметром 3.66 м. Две ТЕМ-линии с сопротивлением по 400 Ом, соединены с параболическим рефлектором

через резистивные нагрузки. В фокусе рефлектора находится газовый разрядник, при замыкании которого формируется сферическая ТЕМ-волна. При импульсе напряжения ± 60 кВ значение эффективного потенциала излучения составило $rE_p = 1.28$ МВ.

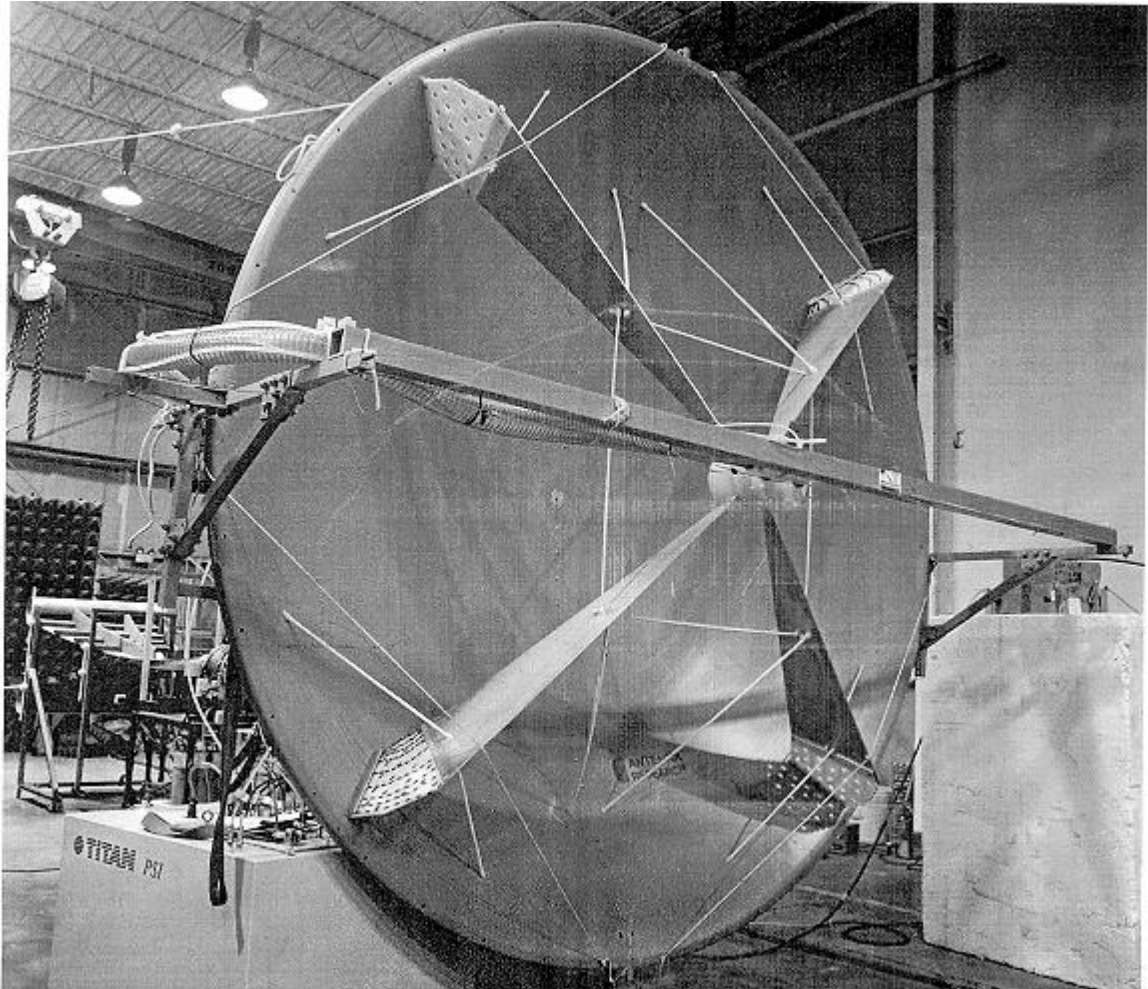


Рисунок 1.1 – IRA

В дальнейшем были разработаны различные варианты IRA [26], [27], отличающиеся диаметром зеркала, конструкцией ТЕМ-линий и разрядника. Самым интересным вариантом является HIRA (Half IRA) [28], представляющая собой половину IRA над проводящей плоскостью (Рисунок 1.2). На HIRA с рефлектором диаметром 3 м и напряжении на разряднике 1 МВ был получен эффективный потенциал излучения $rE_p = 5.3$ МВ

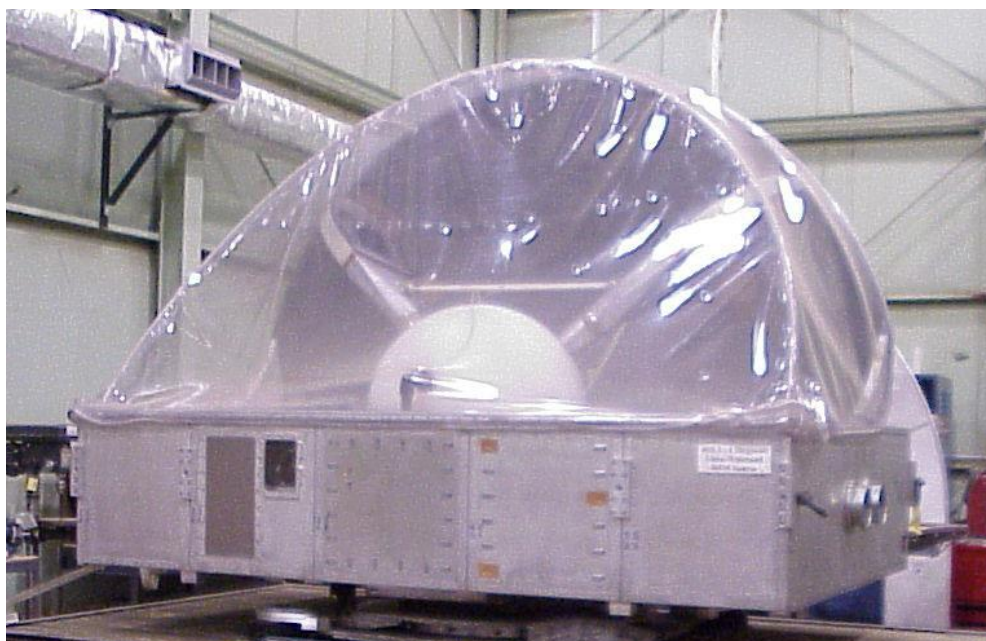


Рисунок 1.2 – HIRA

Недостатками IRA являются низкая энергетическая эффективность ($<1\%$), высокий уровень кроссполяризованного излучения и высокий уровень боковых лепестков.

Другой вариант был предложен группой исследователей из Кореи под руководством Jiheon Ryu [29]. В фокус параболического зеркала помещалась специально сконструированная дипольная антенна с разрядником в точке питания (Рисунок 1.3). С рефлектором диаметром 1.5 м был получен импульс излучения с центральной частотой 1.1 ГГц и эффективным потенциалом излучения $rE_p = 1.7$ МВ.



Рисунок 1.3 – Излучатель с параболическим рефлектором

Похожая конструкция описана в работе [30]. Симметричный диполь, установленный в центре параболического рефлектора, возбуждается при пробое искрового разрядника в центре диполя (Рисунок 1.4). При частоте следования импульсов 400 Гц формируются импульсы излучения с $rE_p = 0.67$ МВ.

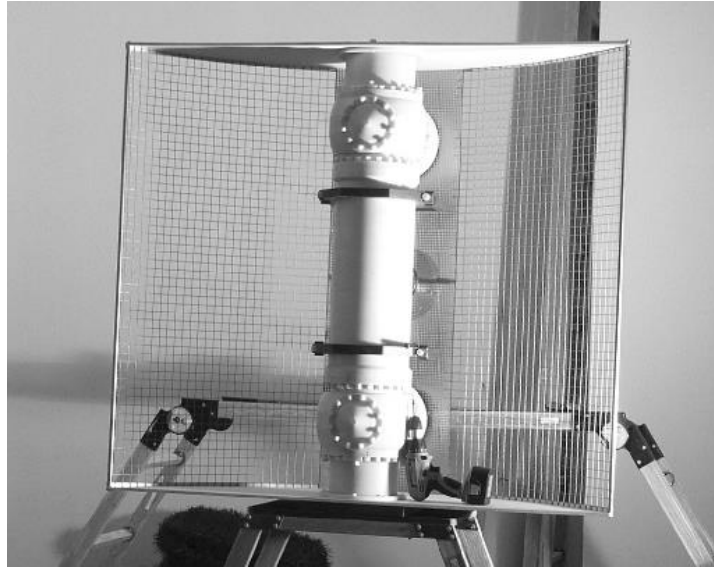


Рисунок 1.4 – Излучатель с рефлектором

В работе [31] описан излучатель электромагнитных импульсов с двухзеркальной антенной (Рисунок 1.5). Основное параболическое зеркало имеет диаметр 6.2 м, контррефлектор – 0.8 м. Импульс напряжения, возбуждающий антенну представляет собой затухающую синусоиду длительностью около 15 нс. Особенностью этого источника является возможность варьировать среднюю частоту колебаний импульса от 0.2 до 1.0 ГГц. Значение rE_p достигает 18 МВ.



Рисунок 1.5 – Излучатель с двухзеркальной антенной

1.4 TEM-рупоры и решетки

Наиболее часто для излучения СШП-импульсов используются различные варианты TEM-рупоров. Исходный вариант регулярного TEM-рупора приведен на рисунке 1.6, он состоит из двух треугольных металлических пластин, расположенных под углом α друг относительно друга. Питание осуществляется через линию передачи на остром краю пластин. Для улучшения согласования TEM-рупора со свободным пространством в широкой полосе частот сопротивление внутри раскрытия рупора обычно изменяют по экспоненциальному закону [32] (Рисунок 1.7).

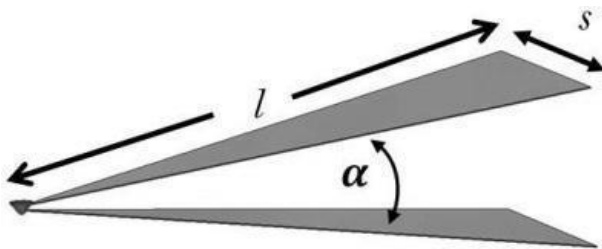


Рисунок 1.6 – Регулярный TEM-рупор

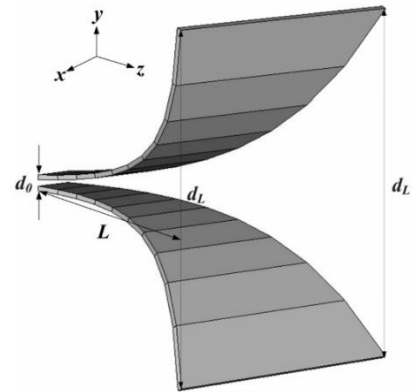


Рисунок 1.7 – Экспоненциальный TEM-рупор

Для уменьшения размеров рупора одна из пластин может быть заменена заземленной пластиной. Такие рупоры называют несимметричными. В работе [33] описан несимметричный петлевой TEM-рупор (Рисунок 1.8) с полосой согласования 1:140.

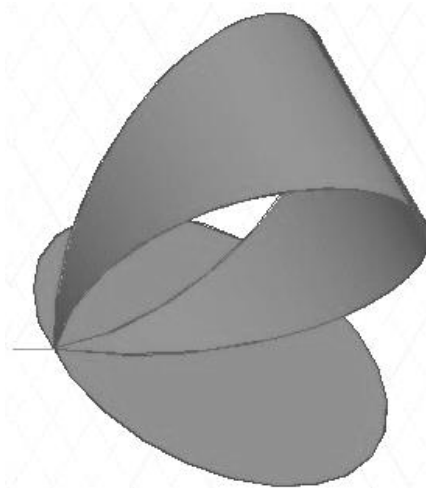


Рисунок 1.8 – Несимметричный петлевой TEM-рупор

В области импульсного СШП-излучения TEM-рупоры сначала использовали в качестве сверхширокополосных датчиков в исследованиях импульсного излучения. В дальнейшем они нашли применение в короткоимпульсных радарх и георадарх. Для излучения мощных СШП-импульсов TEM-рупоры используются с начала 90-х годов [34], [35], [13]. На рисунке 1.9

приведен созданный в 1992 г. мощный СШП-источник Н-2 с ТЕМ-рупором в качестве излучающей системы. Величина rE_p этого источника достигала 350 кВ [35].



Рисунок 1.9 – СШП-источник Н-2 с большим ТЕМ-рупором

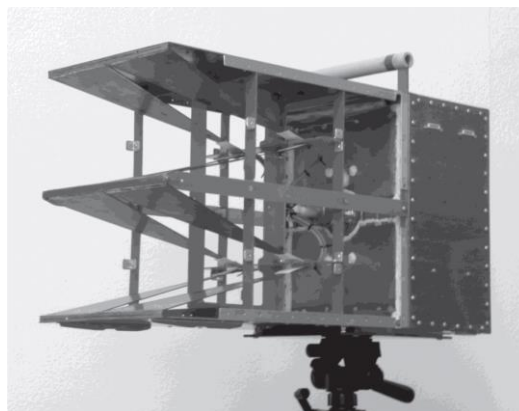


Рисунок 1.10 – Макет сверхширокополосного излучателя

Также ТЕМ-рупоры широко используются в качестве элементов решеток, излучающих СШП-импульсы. В работе [13] описаны исследования источника СШП-излучения с наносекундным драйвером РАДАН-303Б, обострителем импульсов на основе газовых разрядников и двух- и четырехэлементных решеток ТЕМ-рупоров. Источник с восьмиэлементной решеткой ТЕМ-рупоров каждый из которых возбуждался отдельным полупроводниковым генератором, описан в [36]. Апертура решетки составляла 56×56 см, Полупроводниковый генератор GIN35 на нагрузку с волновым сопротивлением 50 Ом выдавал монополярные импульсы с максимальной амплитудой 35 кВ и передним фронтом около 120 пс. Значение rE_p составило 450 кВ.

При использовании ТЕМ-рупоров как элементов решетки часто замыкают соседние элементы между собой. В работе [37] показано, что замыкание лепестков соседних рупоров расширяет полосу излучения в области низких частотах. В работе [38] показаны расчет и измерения решетки 2×2 ТЕМ-рупоров (Рисунок 1.10) замкнутых между собой. Было получено значение $rE_p = 100$ кВ при амплитуде возбуждающего монополярного импульса напряжения 40 кВ.

Интенсивные исследования решеток ТЕМ-рупоров в широком диапазоне частот (отношение крайних частот > 10) проводятся в Институте радиотехники и электроники РАН ([39], [40], [41], [42]). В результате разработана двумерно-периодическая сверхдиапазонная антенная решетка ТЕМ-рупоров с полосой согласования при синфазном возбуждении 19:1. При сканировании в секторе 90° полоса согласования составила 15:1. Это было достигнуто благодаря металлизации межрупорного пространства, замыканию элементов в вертикальной плоскости и частичным замыканием элементов в горизонтальной плоскости.

Основным недостатком TEM-рупоров в качестве излучателя мощных СШП-импульсов является их большие размеры.

1.5 Комбинированные антенны и решетки

В конце 90 годов в ИСЭ СО РАН разработаны первые варианты конструкций комбинированных антенн (Рисунок 1.11) [43].

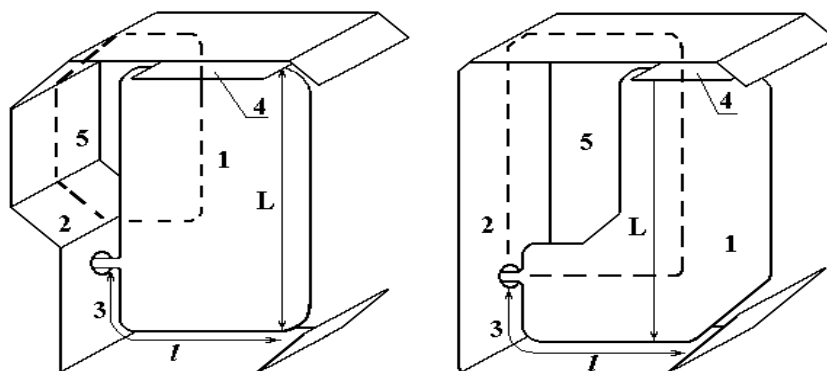


Рисунок 1.11 – Варианты конструкции антенны с комбинациями электрического монополя и магнитного диполя

В данных конструкциях излучателем является плоский электрический монополюль I , соединенный с фидером щелевой линией 3 , образованной экраном 2 и нижней кромкой пластины монополя. Монополюль выполнен в виде металлической пластины, сверху которой укреплена дополнительная пластина 4 для увеличения емкости между электрическим монополюлем I и экраном 2 . Экран 2 или электрический монополюль I изогнуты так, чтобы между боковой кромкой монополя и экраном образовалась щель 5 , которая является аналогом магнитного диполя. Длина l щелевой линии 3 выбиралась такой, чтобы обеспечить оптимальный фазовый сдвиг между электрическим и магнитным токами. Необходимое соотношение между электрическим и магнитным моментами токов обеспечивается выбором геометрических размеров щели 5 и электрического монополя I .

Представленные на рисунке 1.11 конструкции антенн можно рассматривать как комбинацию электрического и магнитного излучателей. С одной стороны, предложенные антенны являются электрическим монополюлем, с другой стороны – проводящим витком с последовательно включенной емкостью.

На основе описанной выше комбинированной антенны были разработаны источники мощного СШП-излучения с одиночной антенной [16] и решеткой 2×2 [17], возбуждаемые биполярным импульсом 3 нс. Значение rE_p составило 40 кВ для источника с одной антенной и амплитуде биполярного импульса напряжении на входе в антенну 100 кВ. Для решетки 2×2

значение rE_p составило 500 кВ при амплитуде биполярного импульса напряжения на выходе генератора 200 кВ.

Первая КА на основе ТЕМ-рупора была разработана для использования в мощном источнике СШП-излучения [19]. Антенна (Рисунок 1.12) возбуждалась биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс и амплитудой 120 кВ, значение rE_p составило 136 кВ. Особенностью антенны являются скошенные к апертуре края верхней пластины. КА, разработанные позднее, имели одинаковые прямоугольные верхние и нижние пластины. Это обусловлено использованием их как элементов в прямоугольных антенных решетках.



Рисунок 1.12 – КА для мощного источника СШП-излучения [19]

Наряду с нашими исследованиями (2001–2021 гг.), представленными в данной работе, исследования и разработка КА и решеток на их основе ведутся во Франции ([44], [45], [46], [47]), Китае ([48], [49]), Иране ([50], [51]), США ([52], [53], [54]), Южной Кореи ([55], [56]) и Польше [57]. Это является дополнительным подтверждением актуальности выполненных исследований.

1.6 Синтез излучения в свободном пространстве

Для практического применения важным является исследование методов управления спектром излучения. При этом представляет интерес задача расширения спектра излучения и вырезания из спектра отдельных полос. Обе эти задачи можно решать за счет синтеза излучения в свободном пространстве при использовании антенных решеток. Рассмотрим эти задачи подробнее.

В работе [20] был предложен способ расширения спектра излучения путем сложения в свободном пространстве импульсов с различной длительностью (полосой частот), излученных линейной решеткой комбинированных антенн. Была смоделирована 8-элементная решетка, в которой излучатели возбуждаются биполярными импульсами с различной длительностью

(Рисунок 1.13). Напряженность электромагнитного поля в дальней зоне, излучаемого отдельным элементом решетки с кардиоидной диаграммой направленности (ДН), без учета взаимодействия определялась выражением

$$E_n(t, r_n) = \frac{A}{r_n} \frac{dI_n}{dt} (1 + \cos \varphi),$$

где, A – размерная константа, r_n – расстояние от элемента решетки до точки наблюдения, c – скорость распространения электромагнитной волны, $I_n = I(t - r_n/c)$ – значение тока n -го излучателя, взятое в момент времени t с запаздыванием на r_n/c , φ – определяет направление на точку поля. Полное поле рассчитывалось как суперпозицией полей, создаваемых элементами решетки. Исследовались пространственно-временные характеристики электромагнитного импульса при возбуждении излучателей биполярным импульсом тока, описываемым выражением

$$I(t) = e^{-\left(\frac{5t}{\tau} - 2\right)^2} - e^{-\left(\frac{5t}{\tau} - 4\right)^2},$$

где τ – длительность импульса на уровне 0.1 его амплитуды.

5 ns	3 ns	1 ns	1 ns	1 ns	1 ns	3 ns	5 ns
------	------	------	------	------	------	------	------

Рисунок 1.13 – Расположение элементов в решетке

Излучатели $n=1, 8$ возбуждались импульсами длительностью 5 нс, $n = 2, 7$ – импульсами длительностью 3 нс, $n = 3 - 6$ – импульсами длительностью 1 нс. Расстояния между излучателями равнялись половине пространственной длительности соответствующего импульса. Импульсы имели одинаковую амплитуду и были синхронизованы по времени изменения полярности сигнала. Форма синтезированного электромагнитного импульса в максимуме ДН приведена на рисунке 1.14. На рисунке 1.15 представлены спектры результирующего импульса (сплошная линия) и импульсов его составляющих (штриховые линии). Отношение частот на половине максимума спектра для синтезированного импульса возросло в 3-4 раза и составило 10.5. Расчеты показали, что предложенный вариант синхронизации обладает достаточно хорошей устойчивостью к разбросу импульсов. При джиттере $\pm 5\%$ от длительности соответствующего импульса волновая форма излученного импульса и ширина спектра изменяются несущественно.

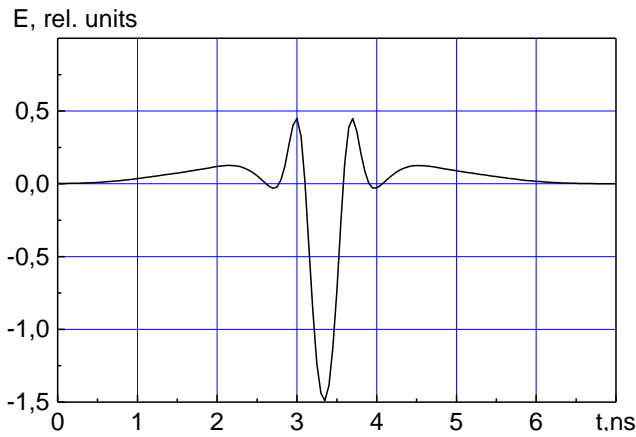


Рисунок 1.14 – Синтезированный импульс электромагнитного излучения

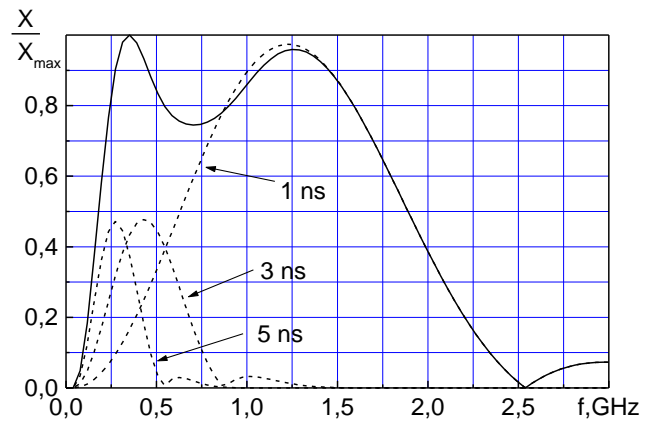


Рисунок 1.15 – Спектр синтезированного импульса

В работе [47] французские исследователи рассмотрели задачу синтеза импульса излучения со спектром, имеющим затухание на определенных “вырезанных” частотах. Используя три генератора затухающих синусоид, они рассчитали их амплитуды, центральные частоты и добротности так, чтобы спектр суммарного импульса имел провалы на частотах 900 МГц и 1.8 ГГц. Возбуждая этими импульсами антенны, авторы получили импульсы излучения с полосой частот 300 МГц – 3 ГГц и двумя “вырезанными” частотами, первая на 900 МГц с затуханием 20 дБ, а вторая на 1.8 ГГц с затуханием 25 дБ. В экспериментах использовалась 3-элементная линейная решетка КА.

В работах [58], [59], [60] были предложены численные методы на основе дискретного преобразования Радона, позволяющие получить заданные характеристики ДН решетки, управляя характеристиками импульсов возбуждающих элементы, либо оптимизировать антенные решетки (размер и конфигурация) для работы с заданным семейством импульсов возбуждения и характеристик ДН.

1.7 Выводы

Анализ опубликованных работ показал, что источники с IRA имеют большие габариты и низкую эффективность по энергии. ТЕМ-рупоры для излучения мощных СШП-импульсов и решетки на их основе также имеют большие размеры. Предложенная в нашем коллективе КА на основе ТЕМ-рупора компактна и имеет высокую энергетическую эффективность при возбуждении биполярным импульсом напряжения.

Большинство опубликованных работ по синтезу излучения в свободном пространстве носят теоретический характер. В работах [59], [60] для управления ДН предполагается управлять формой импульсов напряжения возбуждающих элементы решетки, что трудно реализуемо на

практике. Кроме того, в них рассматриваются только линейные решетки. В работе [47] в эксперименте используются низковольтные (порядка 100 В) импульсы.

Несмотря на большой интерес к мощному СШП-излучению, большинство источников построено на основе IRA или TEM-рупоров, возбуждаемых высоковольтными монополярными импульсами напряжения. Для создания мощных компактных источников СШП-излучения с высокой эффективностью и шириной спектра перспективным представляется исследование и разработка плоских антенных решеток, где излучающими элементами служат КА на основе TEM-рупора, возбуждаемые биполярными импульсами.

Приведенный выше анализ приводит к необходимости постановки и решения 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.

2. КОМБИНИРОВАННЫЕ АНТЕННЫ

В качестве элементов решетки, излучающей мощные электромагнитные импульсы, использовались КА. В основе принципа работы КА лежит идея объединения излучателей электрического и магнитного типов для расширения полосы согласования антенны.

2.1 Излучение системы электрического и двух магнитных диполей

Иллюстрацией простейшей комбинированной антенны является система из электрического и двух магнитных диполей. Покажем, что такая система может обеспечить достаточную стабильность излучаемой мощности в широкой полосе частот.

Пусть в декартовой системе координат размещены симметричный электрический диполь, длиной $2l$, и два магнитных диполя той же длины, оси которых ориентированы параллельно оси x , а центры лежат в плоскости $x=0$ и отстоят от осей y и z на расстояниях d и h , соответственно (Рисунок 2.1). Полагаем распределения электрического и магнитных токов в диполях синусоидальными, с комплексными амплитудами $I_0^e, I_{01}^m, I_{02}^m$, причем

$$\frac{I_{01}^m}{Z_0 I_0^e} = m_1 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^{-1} \exp i(\varphi_1 + \Delta\varphi_1), \quad \frac{I_{02}^m}{Z_0 I_0^e} = m_2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^{-1} \exp i(\varphi_2 + \Delta\varphi_2), \quad (2.1)$$

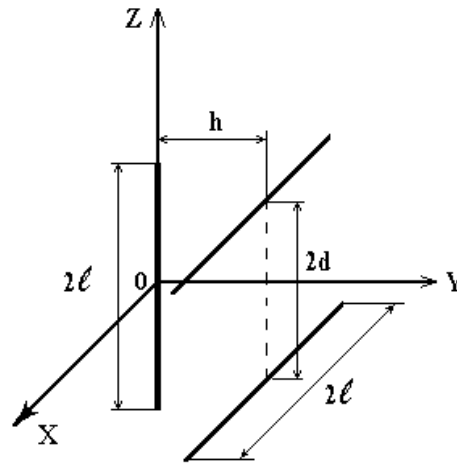


Рисунок 2.1 – Геометрия задачи

где Z_0 – волновое сопротивление окружающей среды, m_1 и m_2 – постоянные, λ – длина волны, φ_1 и φ_2 – начальные сдвиги фаз токов в магнитных диполях по отношению к току в электрическом диполе, $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \beta\sqrt{(kh)^2 + (kd)^2}$, β – имеет смысл коэффициента замедления.

Множитель $(l/\lambda)^{-1}$ в (2.1) отражает частотную зависимость отношения токов, которая имеет место при параллельном подключении к одной питающей линии электрического и

магнитных диполей, а значением коэффициента β определяется замедление в этой линии волны тока.

В работах [61], [62] показано, что нормированную на $|I_0^e|^2 Z_0 / \sin^2 kl$ мощность излучения p_Σ системы диполей можно записать в виде суммы мощности p_Σ^e уединенного электрического диполя, добавки p_Σ^m за счет магнитных диполей, добавки $p_\Sigma^{e,m}$ за счет "комбинационного" эффекта при сложении мощностей. Из рисунка 2.2 видно, что при подключении диполей к общей линии питания с чисто активным волновым сопротивлением ~ 140 Ом достигается согласование комбинированной антенны по уровню КСВН = 2 в полосе 8:1.

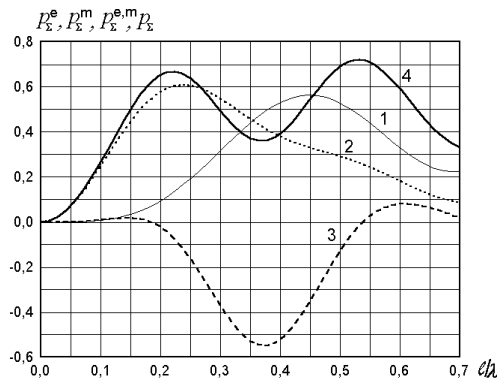


Рисунок 2.2 – Нормированная мощность излучения дипольной системы: $h/l = 0.5$; $d/l = 0.8$; $m_1 = m_2 = 0.3$; $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$; $\beta = -1.5$

Использование комбинации электрического и магнитного вибраторов позволило расширить полосу согласования антенн в область низких частот. Полоса рабочих частот описанных выше антенн (рисунок 1.11) по уровню КСВН = 3 составила $f_H/f_L \cong 4$.

2.2 Комбинированная антенна с ТЕМ-рупором

Для расширения полосы пропускания антенны с использованием комбинации электрического и магнитного излучателей в область высоких частот было предложено [18] использовать в качестве излучателя электрического типа ТЕМ-рупор. Проиллюстрируем различия между характеристиками ТЕМ-антенны и комбинированной антенны с помощью численного моделирования [63] в компьютерном коде CST Studio Suite. На рисунке 2.3 приведены геометрии ТЕМ-антенны (а) и КА (б, в) с поперечными размерами 15 см, соответствующими КА, оптимизированной для излучения биполярного импульса длительностью 1 нс. ТЕМ-рупор имел экспоненциальную форму. Для управления характеристиками КА в верхнем витке используется пластина (в), которая делит магнитный диполь на активный и пассивный. В активном магнитном диполе ток от локального источника по верхней пластине

замыкается на заднюю пластину. Пассивные магнитные диполи возбуждаются полями токов, текущих по пластинам ТЕМ-рупора. Зазор между пластинами на входе ТЕМ-рупора маленький, что соответствует излучению малой пиковой мощности, которая ограничивается электрическим пробоем.

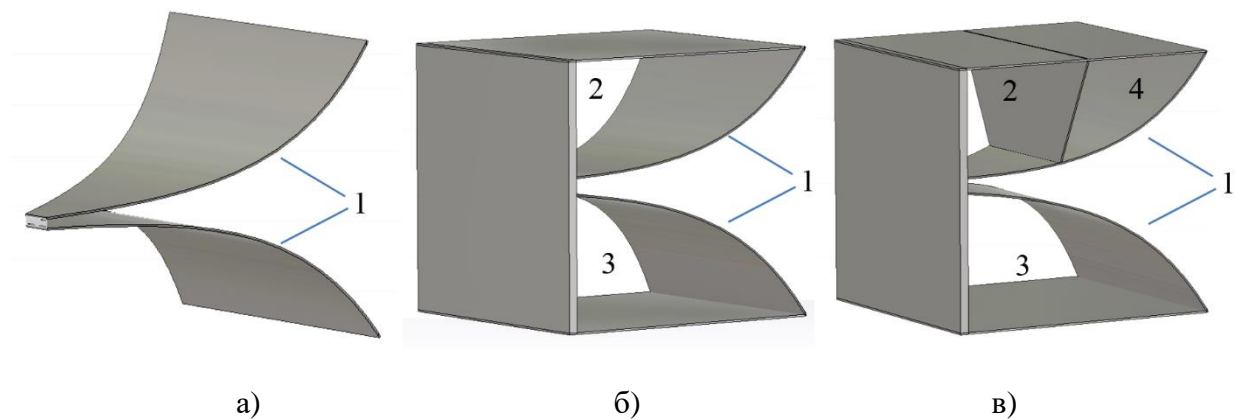


Рисунок 2.3 – Геометрия моделируемых антенн, 1 – ТЕМ-рупор, 2 – активный магнитный диполь, 3 и 4 – пассивный магнитный диполь.

На рисунках 2.4 - 2.5 приведены результаты моделирования антенн. Коэффициент стоячей волны по напряжению КА (Рисунок 2.4, (2), (3)) сдвигается в сторону низких частот относительно КСВН ТЕМ-антенны (Рисунок 2.4, (1)), как и предсказывает теория [62, 61]. При этом для КА увеличивается отношение прямого излучения к обратному (Рисунок 2.5, (2), (3)) по сравнению с ТЕМ-антенной (Рисунок 2.5, (1)). Расчеты показали, что диаграммы модельных антенн не разрушаются вплоть до частоты 5 ГГц. Полоса пропускания КА существенно шире, чем полоса пропускания антенны на основе комбинации электрического монополя и аналога магнитного диполя в виде рамки.

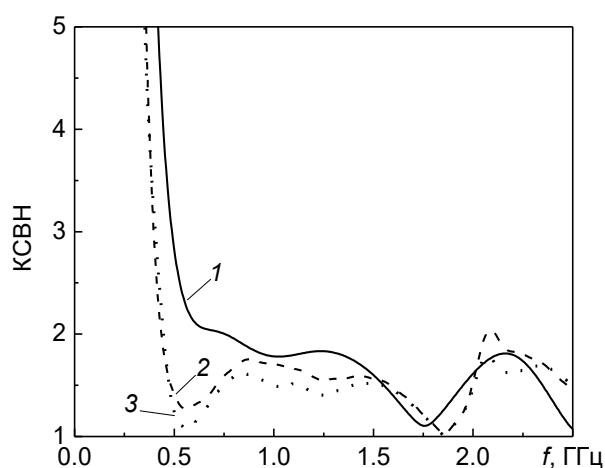


Рисунок 2.4 – Зависимость КСВН от частоты для антенн на рисунке 2.3: 1 – ТЕМ-антенны (а), 2 – КА (б) и 3 – КА (в)

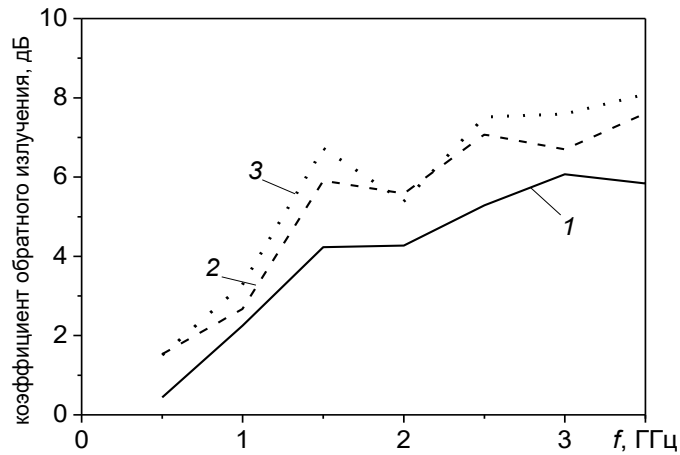


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента обратного излучения от частоты для антенн на рисунке 2.3: 1 – ТЭМ-антенны (а), 2 – КА (б) и 3 – КА (в)

Таким образом, по соотношению геометрических размеров к ширине полосы пропускания и величине обратной мощности комбинированная антенна с ТЭМ-рупором является оптимальным выбором для элемента СШП-решеток.

2.3 Конструкция комбинированной антенны КА

Геометрия комбинированной антенны КА схематически представлена на рисунке 2.6. Антенна состоит из корпуса 1, ТЭМ-рупора 2, активного магнитного диполя 3, двух пассивных магнитных диполей 4. Ширина и высота антенны равны и $h \cong L$, где L продольный размер антенны. Верхняя часть ТЭМ-рупора соединяется гальванически с корпусом антенны и является магнитным диполем. Нижняя часть ТЭМ-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 подсоединения фидера с волновым сопротивлением 50 Ом.

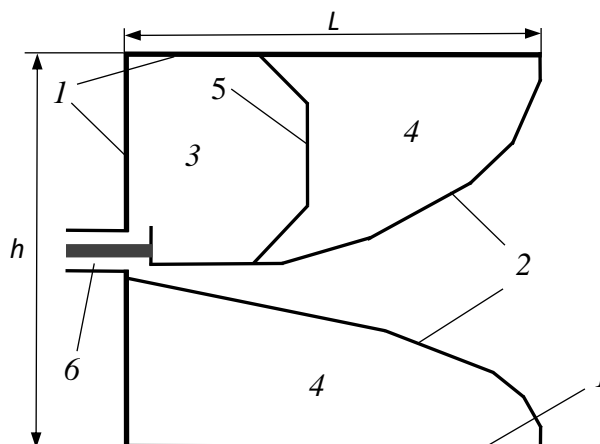


Рисунок 2.6 – Геометрия КА. 1 – корпус, 2 – ТЭМ-рупор, 3 – активный магнитный диполь, 4 – пассивные магнитные диполи, 5 – пластина, ограничивающая активный магнитный диполь, 6 – коаксиальный фидер

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. Во всех случаях за исключением 0.2 нс поперечные размеры антенн составляли половину пространственной длительности биполярного импульса напряжения при $\varepsilon = 1$, а продольный размер был незначительно больше. В дальнейшем будем рассматривать описанные в этом параграфе КА, именуя их по длительности возбуждающего биполярного импульса напряжения КА3, КА2 и т.д.

Так как КА предназначены для использования в мощных источниках СШП-излучения и возбуждаются высоковольтными биполярными импульсами с амплитудой до 200 кВ и частотой повторения 100 Гц, то их входы должны обеспечивать необходимую электрическую прочность. С этой целью диаметр коаксиального фидера (6, Рисунок 2.6) увеличен и используется изолятор с коаксиально-полосковым переходом на входе КА. Это приводит к ухудшению полосы согласования особенно в области высоких частот.

2.4 Методы и устройства для измерения характеристик СШП-антенн и излучения

2.4.2 Частотные характеристики антенн

Полоса согласования КА оценивалась по $K_{СВН} \leq 2$. Для некоторых КА оценивалась полоса пропускания в главном направлении, используя полосу согласования и два дополнительных критерия [64]: неравномерность АЧХ в пределах ± 1.5 дБ и отклонение ФЧХ от линейной в пределах $\pm \pi/16$. Измерения частотных характеристик проводились с использованием измерителя комплексных коэффициентов передачи Agilent 8719ET с полосой рабочих частот 0.05 – 13.5 ГГц и анализатора цепей Agilent N5227A с полосой рабочих частот 0.01 – 67 ГГц.

2.4.3 Приемные антенны

Для регистрации электромагнитных импульсов в свободном пространстве использовались регулярные несимметричные ТЕМ-антенны (Рисунок 2.7) с волновым сопротивлением в апертуре равным 50 Ом [65].

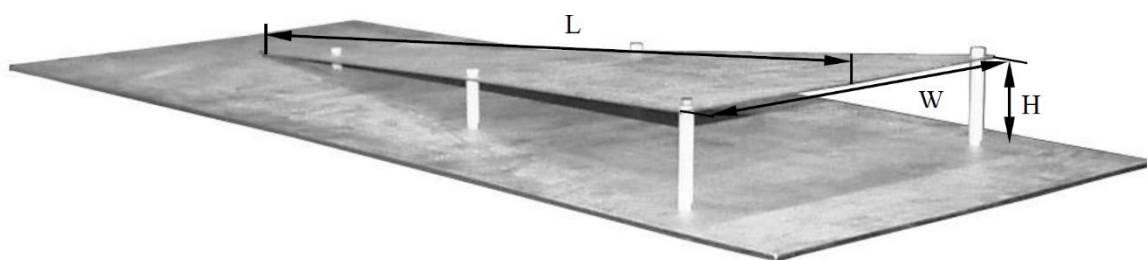


Рисунок 2.7 – Несимметричная ТЕМ-антенна

Регулярная несимметричная ТЕМ антенна представляет собой половину рупорной антенны, в которой лепесток рупора находится над проводящим экраном. Благодаря такой конструкции упрощается согласование антенны с коаксиальной линией питания. Приближенно можно рассматривать такую антенну как полосковую линию с волновым сопротивлением ρ . Размеры антенны тогда вычисляются с помощью известного соотношения [66] для сопротивления полосковой линии:

$$\rho = \frac{119.904\pi}{\frac{W}{H} + 2.42 - 0.44\frac{H}{W} + \left(1 - \frac{H}{W}\right)^2}$$

В работе [65] приведены результаты расчетов и измерений несимметричных ТЕМ-антенн четырех размеров (Таблица 1)

Таблица 1 Геометрические размеры антенн.

	L , мм	W , мм	H , мм
ТЕМ 1	503	220	45
ТЕМ 2	905	400	80
ТЕМ 3	903	100	20
ТЕМ 4	1505	100	20

Для идеализированных моделей антенн без учета конструкции выходного разъема были рассчитаны зависимости эффективной длины антенны h_e от частоты (Рисунок 2.8). Эффективная длина определяется как отношение напряжения на выходе антенны U_a к напряженности поля E на апертуре антенны $h_e = U_a/E$.

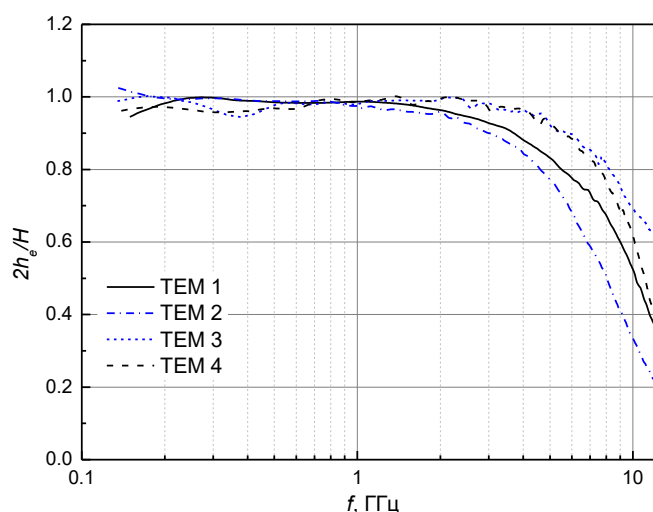


Рисунок 2.8 – Нормированная зависимость эффективной длины антенн от частоты

Регулярные несимметричные ТЕМ-антенны обеспечивают малоискажающую регистрацию СШП электромагнитных импульсов при условии, что пространственная длина импульса не превышает двойной длины лепестка рупора и направление прихода импульса

перпендикулярно плоскости апертуры ТЕМ-антенны. В измерениях также использовались дипольные антенны с резистивными плечами [67]. Для регистрации напряжения на выходе приемных антенн, а также импульса напряжения на входе излучающих антенн использовались осциллографы Tektronix TDS 6604 с полосой пропускания до 6 ГГц и LeCroy WaveMaster 830Zi с полосой пропускания 30 ГГц.

2.4.4 Временные характеристики антенн

К измерениям во временной области относятся измерения импульсов напряжения на входе в КА и электромагнитных импульсов, излученных в свободное пространство.

Традиционно, под ДН понимается угловая зависимость амплитуды напряженности излученного поля (или величины ей пропорциональной), создаваемой в дальней зоне на фиксированном расстоянии. Но при возбуждении антенны или решетки короткими СШП-импульсами напряжения форма излученного электромагнитного импульса зависит от направления на точку наблюдения, поэтому нужно учитывать и момент времени проведения измерений, когда сигнал уже достиг точки наблюдения. В этом случае, измеряя в фиксированный момент времени поле на разных расстояниях от антенны (рисунок 2.9), мы получим различные ДН. В такой ситуации необходимо строить ДН с учетом изменения формы и длительности импульса в зависимости от направления на точку наблюдения. Возможны два способа построение таких ДН:

- по пиковой амплитуде или по пиковой мощности поля;
- по энергии переносимой импульсом.

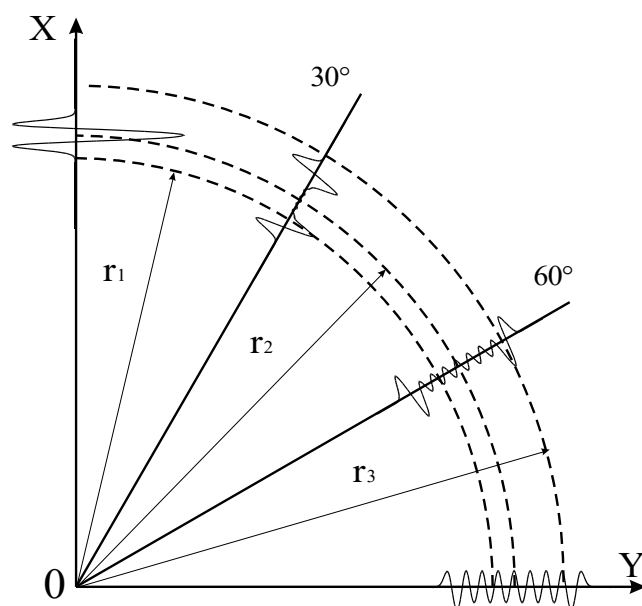


Рисунок 2.9 – Зависимость формы импульса излученного решеткой от направления на точку наблюдения

Так как для практических целей важна максимальная напряженность поля в точке наблюдения, то далее будем использовать ДН по квадрату пиковой напряженности поля или по пиковой мощности поля. Измерения ДН в E - и H -плоскостях проводились относительно геометрического центра антенн.

Зная ДН в E - и H -плоскостях можем вычислить коэффициент направленного действия (КНД) D_0 для направления главного максимума ДН антенны ($\varphi, \delta=0^\circ$, где φ - азимутальный угол, δ - угол места):

$$D_0 = \frac{4\pi F^2(0,0)}{\sum S_i F_i^2(\delta, \varphi)}, \quad (2.2)$$

где $F_i^2(\delta, \varphi)$ – среднее значение нормированной ДН антенны на поверхности S_i , $F^2(0,0) = 1$ значение нормированной ДН для направления $\varphi, \delta = 0^\circ$.

Энергетическую эффективность антенны определяли, как

$$k_w = W_{rad}/W_g, \quad (2.3)$$

где W_{rad} – излученная антенной энергия, W_g – энергия в импульсе напряжения на входе антенны. Излученную энергию находили, используя методы рефлектометрии, как разность энергий в импульсах напряжения, подаваемом на вход антенны и отраженном от входа антенны. Также k_w можно рассчитать [68], [69], используя КСВН антенны и спектр импульса напряжения, возбуждающего антенну.

$$k_w = 1 - \frac{W_{ref}}{W_g} = 1 - \frac{\int U_g^2(f) \left(\frac{K_U(f)-1}{K_U(f)+1} \right)^2 df}{\int U_g^2(f) df}, \quad (2.4)$$

где W_{ref} – энергия, отраженная от входа антенны, $U_g(f)$ – спектр импульса напряжения генератора, K_U – КСВН. Здесь полагалось отсутствие энергетических потерь в антенне.

Одной из наиболее важных характеристик источников СШП-излучения является эффективный потенциал, определяемый как rE_p , где r – расстояние от антенны до точки наблюдения в дальней зоне, E_p – максимальная напряженность поля в точке наблюдения. Эффективный потенциал излучения определяется в дальней зоне.

Границу дальней зоны необходимо знать также при измерениях ДН. Расстояние до границы дальней зоны апертурных антенн можно оценить по известной формуле:

$$r_b = \frac{2D^2}{\lambda_0}, \quad (2.5)$$

где D – максимальный поперечный размер апертуры, λ_0 – длина волны, для которой оценивается r_b . В экспериментальных исследованиях излучения импульсов широко используется критерий дальней зоны

$$rE_p \approx const, \quad (2.6)$$

где E_p – пиковая напряженность электрического поля на расстоянии r от излучателя.

В работе [70] была проведена оценка границы дальней зоны для квадратной 4×4 решетки комбинированных антенн с апертурой $34.5 \times 34.5 \text{ см}^2$, возбуждаемой биполярным импульсом длительностью $\tau_p = 0.5 \text{ нс}$. Вычисленная по формуле (2.5) оценка границы дальней зоны дает значение $r \approx 3 \text{ м}$. При этом полагали, что $\lambda_0 = \tau_p c$, где c – скорость света. На рисунке 2.10 приведена экспериментальная зависимость величины rE_p от расстояния между решеткой и приемной антенной в главном направлении ДН. Выход на горизонтальный участок кривой соответствует границе дальней зоны. Таким образом, теоретически оценка по формуле (2.5) согласуется с критерием (2.6). Это обусловлено тем, что основная доля энергии биполярного импульса напряжения и соответственно импульса излучения сосредоточена вблизи центральной длины волны $\lambda_0 = \tau_p c$ спектра импульса.

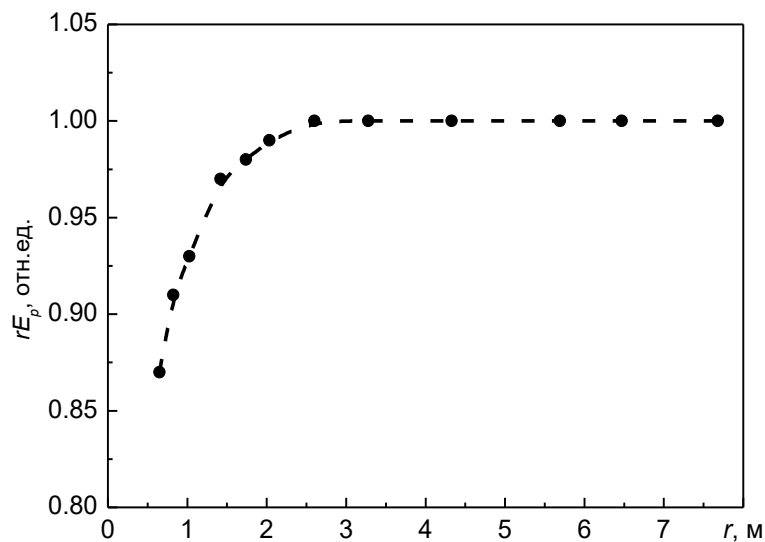


Рисунок 2.10 – Зависимость величины rE_p от расстояния r для решетки комбинированных антенн

Для СШП-антенн важной характеристикой является эффективность по пиковой напряженности электрического поля, определяемая как

$$k_E = rE_p/U_g, \quad (2.7)$$

где U_g – пиковое значение модуля амплитуды напряжения генератора.

Зная эффективность антенны по энергии k_w и пространственно-временные характеристики излучения, можно найти эффективность антенны по пиковой мощности [71]:

$$k_p = P_{rad}/P_g, \quad (2.8)$$

где P_{rad} – пиковая мощность импульса излучения, P_g – пиковая мощность импульса напряжения генератора на входе антенны. Зная k_p и D_0 можно оценить пиковую напряженность электрического поля в дальней зоне на расстоянии r :

$$E_p = \frac{1}{r} \sqrt{30P_g k_p D_0}. \quad (2.9)$$

Так как форма СШП-импульса, излученного антенной или решеткой, зависит от направления излучения (Рисунок 2.9), то важным параметром является зависимость формы импульса от угла наблюдения. Искажение формы импульса оценивалось как среднеквадратичное отклонение импульса $U(t)$, излученного под произвольным углом, от импульса $V(t)$, излученного в направлении максимума ДН:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int [u(t)-v(t)]^2 dt}{\int v^2(t) dt}}, \quad (2.10)$$

где $u(t) = U(t)/U_{max}$ и $v(t)=V(t)/V_{max}$ – нормализованные функции.

2.5 Антенна, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 3 нс (КА3)



Рисунок 2.11 – Внешний вид антенны КА3

Первой рассмотрим КА, оптимизированную для возбуждения биполярным импульсом напряжения длительностью 3 нс (Рисунок 2.11) [72], [73]. Антенна имеет размеры – $45 \times 45 \times 47$ см³. На рисунке 2.12 приведены расчетная и измеренная зависимости КСВН от частоты в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом. КСВН антенны не превышает 2 в полосе частот 0.13 - 1.1 ГГц. При этом отношение диаметра описанной вокруг антенны сферы к длине волны на нижней граничной частоте равно 0.34.

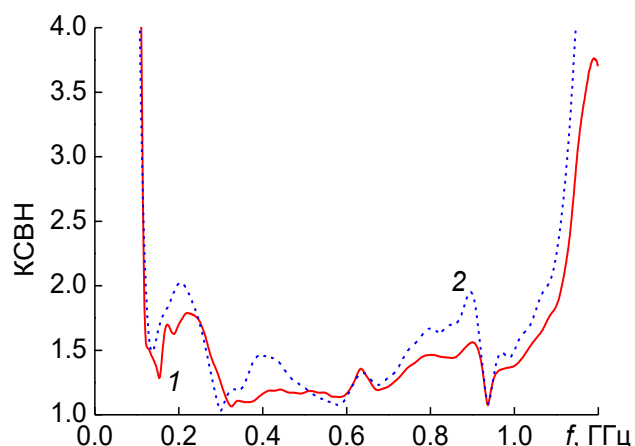


Рисунок 2.12 – КСВН антенны КА3, 1 – измеренный, 2 – рассчитанный

Для системы из двух антенн КА3, одна из которых использовалась как передающая антенна, а другая как приемная, были проведены измерения АЧХ и ФЧХ. Изменение АЧХ относительно среднего значения ($\Delta\text{АЧХ}$) (Рисунок 2.13, кривая 1) не выходит за пределы ± 1.5 дБ для главного направления ($\varphi, \delta=0^\circ$) в диапазоне частот 0.14 – 0.85 ГГц. Отклонение фазочастотной характеристики от линейной ($\Delta\text{ФЧХ}$) для этого же направления наблюдения не превышает $\pm\pi/16$ для частот 0.14 – 0.9 ГГц (Рисунок 2.13, кривая 2). Относительная полоса пропускания, определяемая одновременным выполнением трех критериев ($\text{КСВН} \leq 2$, $\Delta\text{АЧХ} \leq \pm 1.5$ дБ и $\Delta\text{ФЧХ} \leq \pm\pi/16$) составляет 6.1:1 (0.14 – 0.85 ГГц) для главного направления излучения.

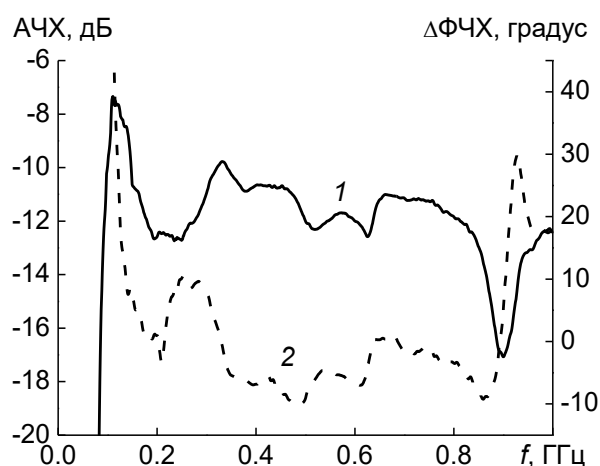


Рисунок 2.13 – Измеренные АЧХ (1) и отклонение ФЧХ от линейной (2) элемента решетки.

Для временных измерений использовался низковольтный биполярный импульс длительностью 3 нс приведенный на рисунке 2.14 (а), а его спектр показан на рисунке 2.14 (б). На рисунке 2.15 (а) приведена осциллограмма импульса излученного антенной КА3 и его амплитудный спектр (Рисунок 2.15 б). Максимум спектра приходится на частоту 350 МГц.

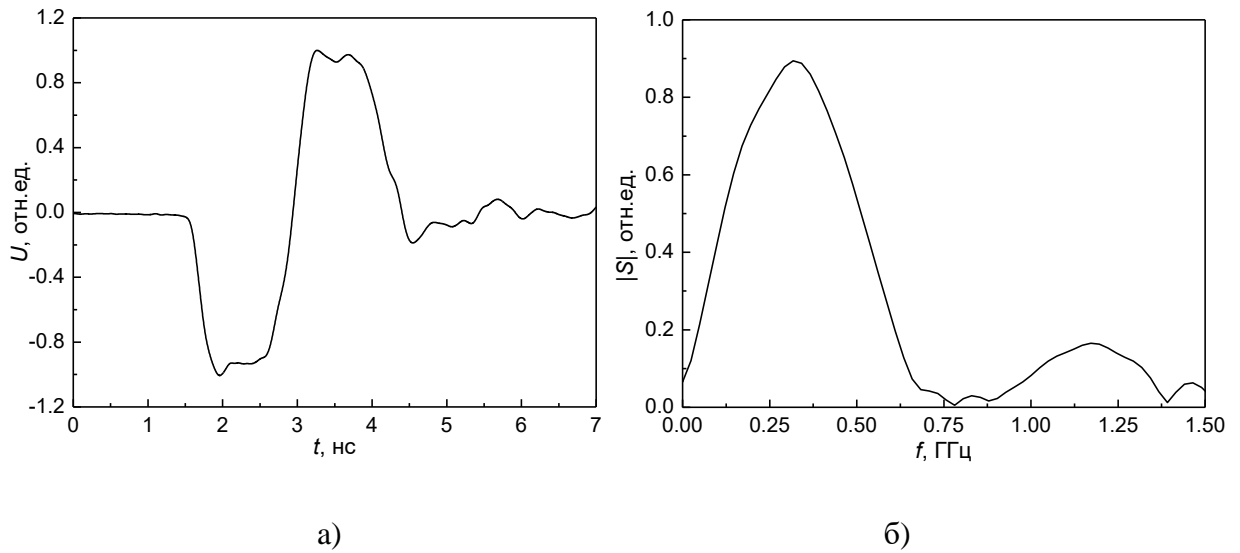


Рисунок 2.14 – Осциллограмма биполярного импульса напряжения длительностью 3 нс а) и его амплитудный спектр б)

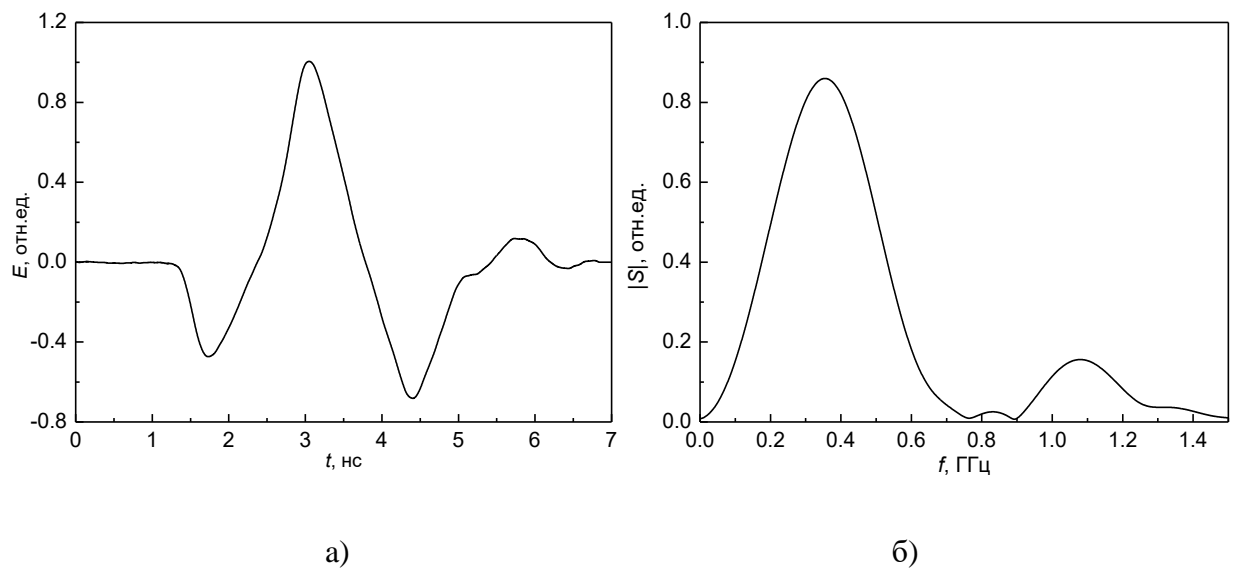


Рисунок 2.15 – Осциллограмма излученного импульса а) и его амплитудный спектр б)

На рисунке 2.16 приведены ДН элемента решетки по пиковой мощности в H - и E -плоскостях. Ширины диаграмм на половинном уровне пиковой мощности примерно одинаковы и составляют 80° .

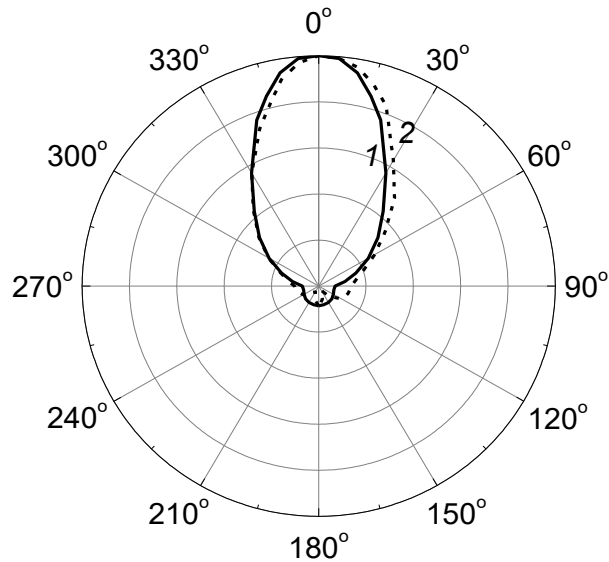


Рисунок 2.16 – Диаграммы направленности в плоскостях H (1) и E (2).

Рассчитанный по результатам измерений КНД антенны в главном направлении $D_0=5$. Эффективность по пиковой напряженности электрического поля составила 2. Энергетическая эффективность примерно равна 0.93.

Для экспериментального определения границы дальней зоны антенны были проведены измерения зависимости произведения rE_p от расстояния между передающей и приемной антеннами. В качестве приемных антенн использовались ТЕМ-антенна с апертурой 40×8 см² и резистивный диполь длиной 20 см [67]. Результаты измерений приведены на рисунке 2.17 [73]. Горизонтальный участок кривой соответствует дальней зоне. Различие в поведении кривых объясняется разными размерами апертур антенн. Результаты измерений с резистивным диполем дают расстояние до дальней зоны $r \approx 1.5$ м от плоскости апертуры антенны. Измерения характеристик антенны КАЗ проводились с помощью ТЕМ-антенны на расстояниях более 4 м.

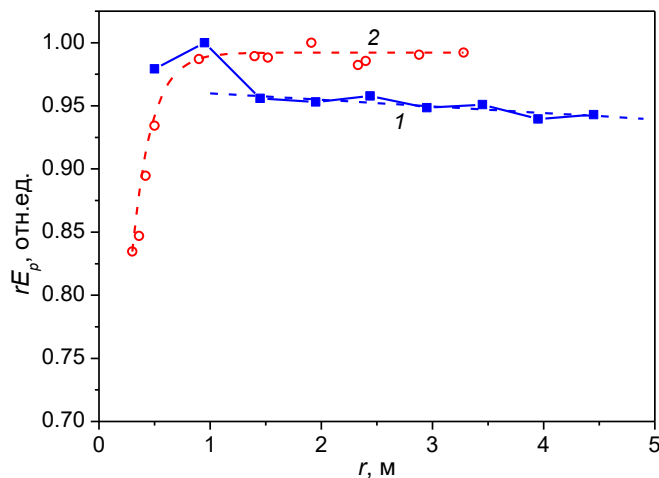


Рисунок 2.17 – Зависимость произведения rE_p от расстояния при использовании ТЕМ-антенны (1) и резистивного диполя (2)

С использованием CST Studio Suite были проведены численные исследования [74] положения фазового центра (ФЦ) и центра излучения (ЦИ) антенны КА3, возбуждаемой биполярным импульсом, приведенным на рисунке 2.14.

Вначале, для центральной частоты (350 МГц) спектра импульса излученного антенной (Рисунок 2.15), были рассчитаны частичные ФЦ антенны в двух плоскостях. Для диапазона углов $\pm 45^\circ$ ФЦ в H -плоскости находится на расстоянии от внешней поверхности задней пластины $z_0 = 235$ мм. При этом отношение $z_0/L = 0.49$. Среднеквадратичное отклонение продольной координаты фазового центра равно 2.4 мм. Частичный ФЦ в E -плоскости находится на расстоянии $z_0 = 438$ мм. При этом отношение $z_0/L = 0.92$. Среднеквадратичное отклонение продольной координаты ФЦ равно 6.7 мм.

Для нахождения ЦИ антенны вместо условия равенства фаз использовали условие одновременного прихода излученных СШП-импульсов, то есть ищем такую точку, чтобы на окружность, проведенную из этой точки в плоскости E или H в заданном диапазоне углов излученные СШП-импульсы приходили одновременно. Так как форма импульса СШП-излучения зависит от угла и это является причиной погрешности определения координат ЦИ в экспериментах, то момент прихода оценивался по максимальной амплитуде импульса [75]. В расчетах было получено, что минимальное различие по времени между максимумами импульсов излучения в H -плоскости в пределах углов $\pm 45^\circ$, равное 0.04 нс, соответствует продольной координате $z_0 = 225\text{--}235$ мм. На рисунке 2.18 приведены импульсы излучения, рассчитанные в дальней зоне на окружности лежащей в H -плоскости с центром в точке с координатами $x = 0$, $y = 0$, $z = 225$ мм для диапазона углов $0\text{--}45^\circ$ в силу симметрии геометрии антенны в H -плоскости. Отметим, что при указанных выше координатах максимумы импульсов излучения в E -плоскости существенно сдвинуты относительно главного направления ≈ 0.2 нс.

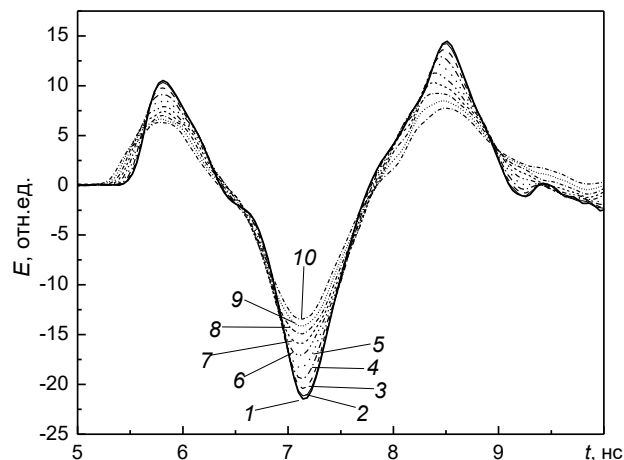


Рисунок 2.18 – Импульсы излучения, рассчитанные в дальней зоне в H -плоскости для $z_0 = 225$ мм и углов 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 и 45° , которым соответствуют кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10

Аналогичные расчеты были выполнены в E -плоскости. Было показано, что минимальное различие по времени задержки максимумов импульсов излучения в диапазоне углов $\pm 45^\circ$ соответствует координате $z_0 = 435\text{--}440$ мм. При этом в H -плоскости временные задержки максимумов импульсов при указанных координатах возрастают. На рисунке 2.19 показаны расчетные импульсы излучения для E -плоскости в диапазоне углов $\pm 45^\circ$ для $z_0 = 438$ мм.

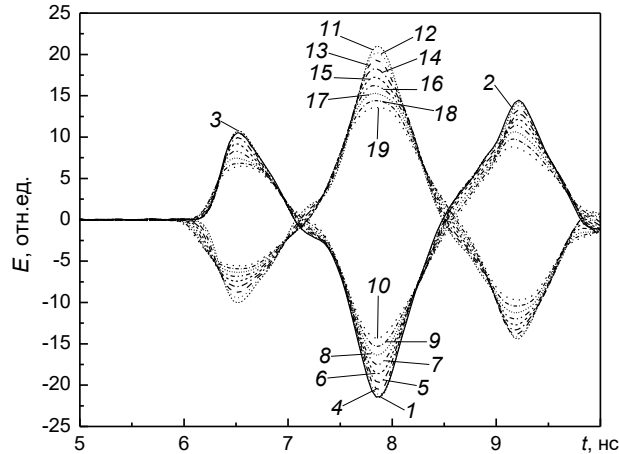


Рисунок 2.19 – Расчетные импульсы излучения для E -плоскости в диапазоне углов $\pm 45^\circ$ для $z_0 = 438$ мм. Кривые 1–10 соответствуют углам от 0 до $+45^\circ$, а кривые 11–19 соответствуют углам от -5 до -45°

В [76] была предложена методика оценки положения ЦИ с использованием критерия дальней зоны $(z-z_0)E_p \approx \text{const}$. Положение ЦИ z_0 оценивалось из условия минимального расстояния до границы дальней зоны только на оси. Геометрия задачи [74] для оценки положения ЦИ с использованием критерия дальней зоны приведена на рисунке 2.20.

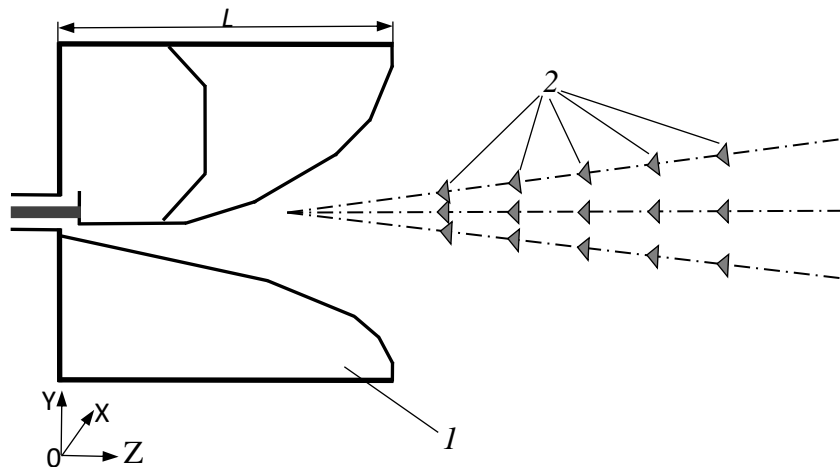


Рисунок 2.20 – Геометрия расчетной задачи. 1–комбинированная антенна, 2–датчики поля в E -плоскости

На рисунке 2.21 показаны осциллограммы импульсов излучения на оси, а именно, измеренного в дальней зоне (кривая 1), рассчитанных в дальней зоне (кривая 2) и на расстоянии от антенны 3 м (кривая 3). Формы импульсов излучения в дальней зоне (кривые 1 и 2)

различаются наиболее существенно в третьем временном лепестке. Отметим, что в измерениях и расчетах использовался одинаковый биполярный импульс длительностью 3 нс (Рисунок 2.14 а). Увеличение длительности экспериментального импульса излучения относительно расчетного обусловлено временным разрешением измерительной системы. Формы импульсов излучения, рассчитанные в дальней зоне (кривая 2) и на расстоянии 3 м (кривая 3), близки. Вычисленные значения эффективности по пиковой напряженности электрического поля k_E равно 2.05 на расстоянии $r = 2.5$ м в прямом расчете и 2.36 при пересчете поля из ближней зоны в дальнюю. В экспериментах [64] получено значение $k_E = 2$, которое хорошо согласуется с результатами расчетов.

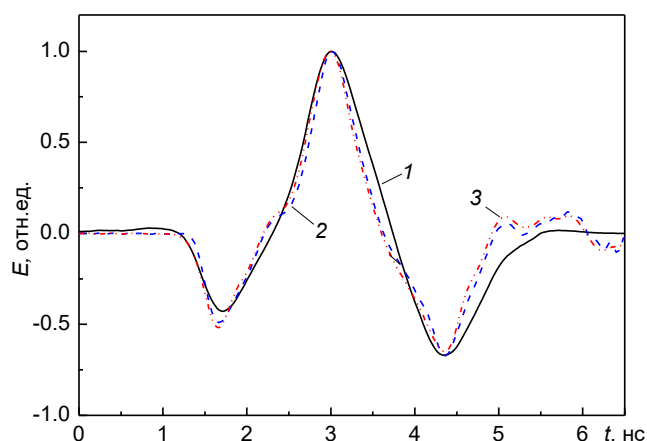


Рисунок 2.21 – Осциллограммы импульсов излучения на оси: измеренного в дальней зоне (кривая 1), рассчитанных в дальней зоне (кривая 2) и на расстоянии 3 м от антенны (кривая 3)

На рисунке 2.22 показаны зависимости $(r-r_0)E_p(r)$ от значения r_0 . Расстояние отсчитывалось от задней стенки антенны. По результатам этих расчетов оценивалось положение ЦИ по минимуму расстояния до границы дальней зоны, в данном случае $r_0 = 350$ мм (кривая б). На рисунке 2.23 показаны зависимости $rE_p(r)$ в сферической системе координат для главного направления (кривая 1), а также в H -плоскости для углов $\pm 10^\circ$ (кривая 2) и E -плоскости для угла $+10^\circ$ (кривая 3) и -10° (кривая 4). На рисунке 2.24 показаны зависимости $(r-r_0)E_p(r)$ для найденного по этой методике положения ЦИ на расстоянии $r_0 = 350$ мм. Кривые 1–4 обозначены аналогично рисунку 2.23. Для оценки положения границы дальней зоны ($rE_p \approx const$) на рисунке 2.25 показаны зависимости производных $(r-r_0)E_p$ от расстояния r . Кривые 1–4 соответствуют нумерации кривых на рисунке 2.24. Из полученных результатов (Рисунок 2.25) следует, что дальняя зона формируется на расстоянии, отсчитываемом от дальней стенки антенны 2.5–3 м. Это соответствует расстоянию 2–2.5 м, отсчитываемому от апертуры антенны, и согласуется с экспериментальными измерениями (Рисунок 2.17).

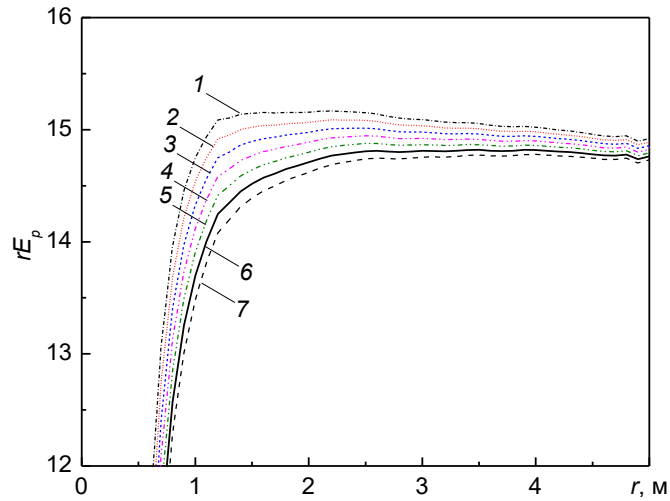


Рисунок 2.22 – Зависимости $(r-r_0)E_p$ для разных r_0 : 1 – 300 мм, 2 – 310 мм, 3 – 320 мм, 4 – 330 мм, 5 – 340 мм, 6 – 350 мм, 7 – 360 мм

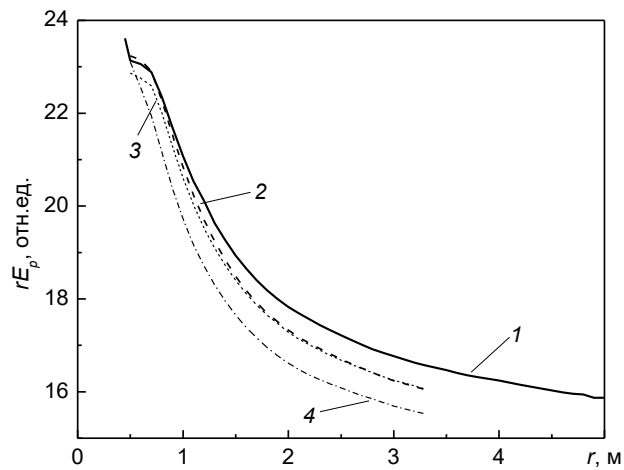


Рисунок 2.23 – Зависимости $rE_p(r)$ в сферической системе координат для главного направления (кривая 1), а также в H -плоскости для углов $\pm 10^\circ$ (кривая 2) и E -плоскости для угла $+10^\circ$ (кривая 3) и -10° (кривая 4)

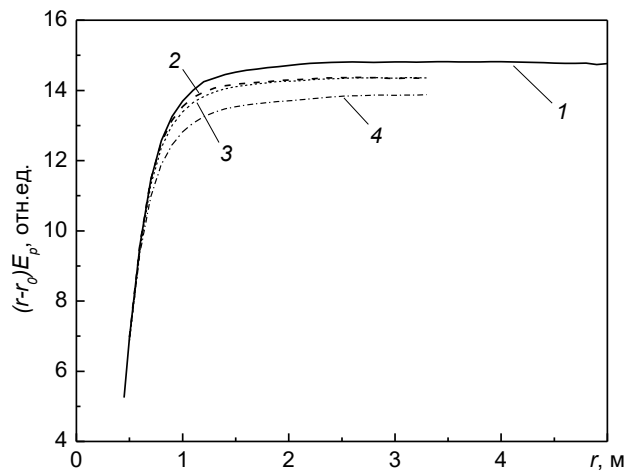


Рисунок 2.24 – Зависимости $(r-r_0)E_p(r)$ в сферической системе координат для $r_0 = 350$ мм в главном направлении (кривая 1), а также в H -плоскости для углов $\pm 10^\circ$ (кривая 2) и E -плоскости для углов $+10^\circ$ (кривая 3) и -10° (кривая 4)

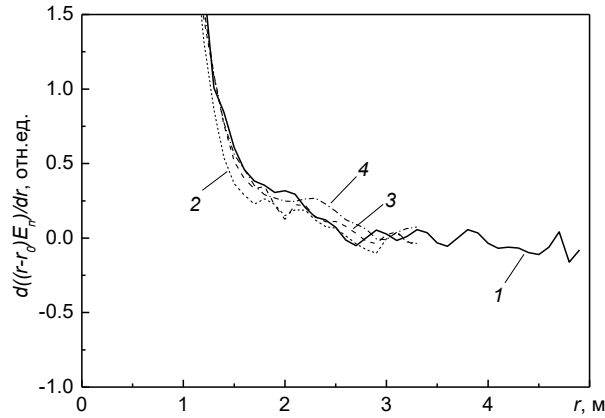


Рисунок 2.25 – Зависимости производных $(r-r_0)E_p$ от расстояния r в сферической системе координат для главного направления (кривая 1), а также в H -плоскости для углов $\pm 10^\circ$ (кривая 2) и E -плоскости для углов $+10^\circ$ (кривая 3) и -10° (кривая 4)

Полагаем, что частичный ФЦ на центральной частоте спектра излучения, который является общим для КАЗ, находится посередине между ФЦ для H - и E -плоскостей. При этом искажения формы излученных импульсов в обеих плоскостях будут примерно одинаковыми. При таком подходе продольная координата общего ФЦ для углового размера диаграммы излучения $\pm 45^\circ$ равна $z_0 = 336.5$ мм, а отношение $z_0/L = 0.71$.

Оценки положения ЦИ в двух плоскостях, полученные с использованием импульсов излучения, рассчитанных в пределах $\pm 45^\circ$, практически совпадают с оценками положения ФЦ для центральной частоты. В этом нет ничего удивительного, так как максимум импульса определяется излучением вблизи максимума спектра на центральной частоте.

Дополнительным аргументом в пользу существования ЦИ антенны, возбуждаемой биполярным импульсом, являются результаты прямых расчетов, позволивших при использовании критерия дальней зоны оценить координату ЦИ ($z_0 = 350$ мм) для углового размера диаграммы излучения в пределах $\pm 10^\circ$ в двух плоскостях. При этом отношение $z_0/L = 0.74$. Полученная оценка положения ЦИ совпадает с результатами расчетов в главном направлении [77], выполненных для этой КА по другой программе, и хорошо согласуется с координатой общего ФЦ ($z_0/L = 0.71$) для двух плоскостей в пределах угловых размеров $\pm 45^\circ$ на центральной частоте спектра импульса.

2.6 Антенна, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 2 нс (КА2)

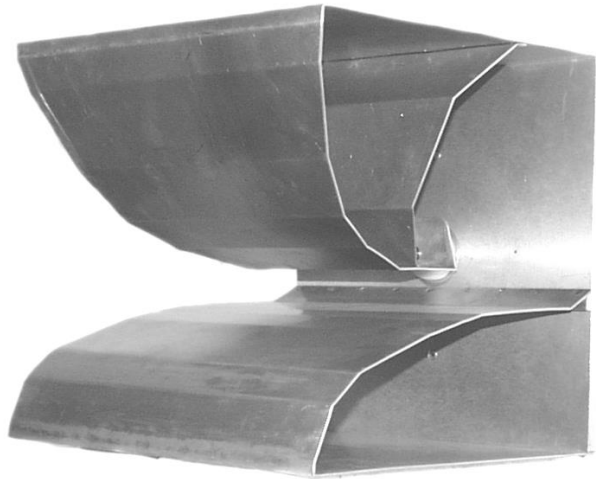


Рисунок 2.26 – Внешний вид антенны КА2

На рисунке 2.26 изображена антенна, оптимизированная для возбуждения биполярным импульсом напряжения длительностью 2 нс, которая подробно описана в [78], [79]. Размеры антенны составляют $30 \times 30 \times 32 \text{ см}^3$ и примерно равны половине пространственной протяженности возбуждающего антенну биполярного импульса длительностью 2 нс.

На рисунке 2.27 представлены расчетная и измеренная зависимости КСВН от частоты в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом. КСВН антенны не превышает 2 в полосе частот 0.18 - 1.1 ГГц, где сосредоточена основная доля энергии биполярного импульса длительностью 2 нс

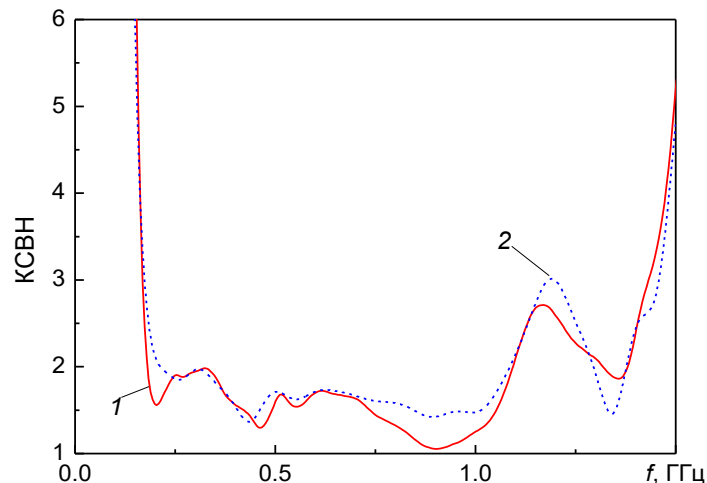


Рисунок 2.27 – КСВН антенны КА2: 1 – измеренный, 2 - расчетный

Низковольтный биполярный импульс длительностью 2 нс, использованный для временных измерений, приведен на рисунке 2.28 (а), его спектр показан на рисунке 2.28 (б). На рисунке 2.29 (а) приведена осциллограмма импульса, излученного антенной КА2, а его

амплитудный спектр показан на рисунке 2.29 (б). Максимум спектра излучения приходится на частоту 570 МГц.

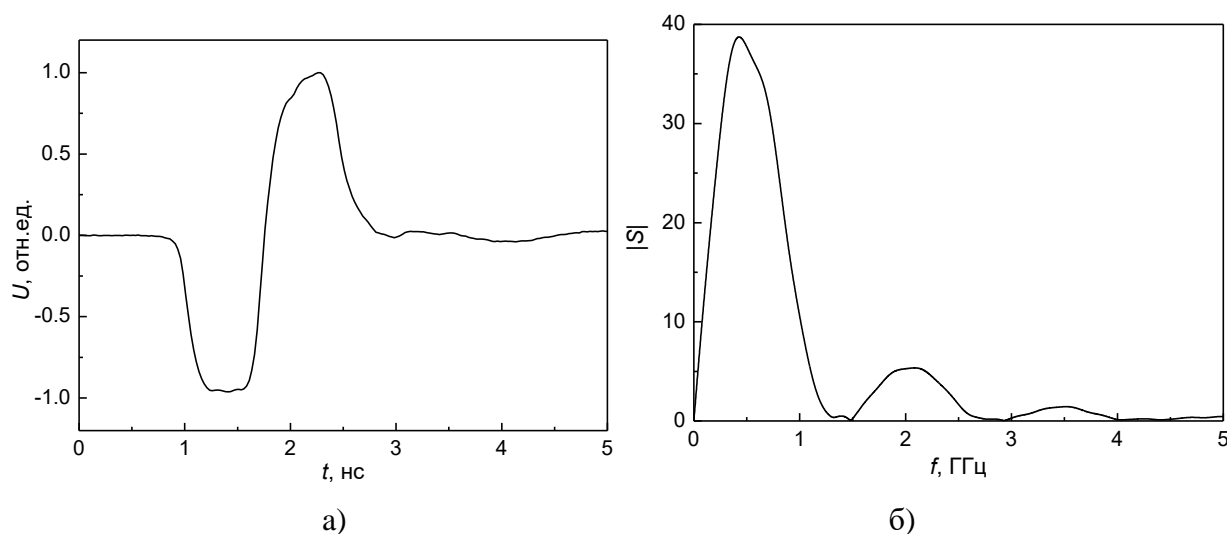


Рисунок 2.28 – Осциллограмма биполярного импульса напряжения длительностью 2 нс (а) и его амплитудный спектр (б)

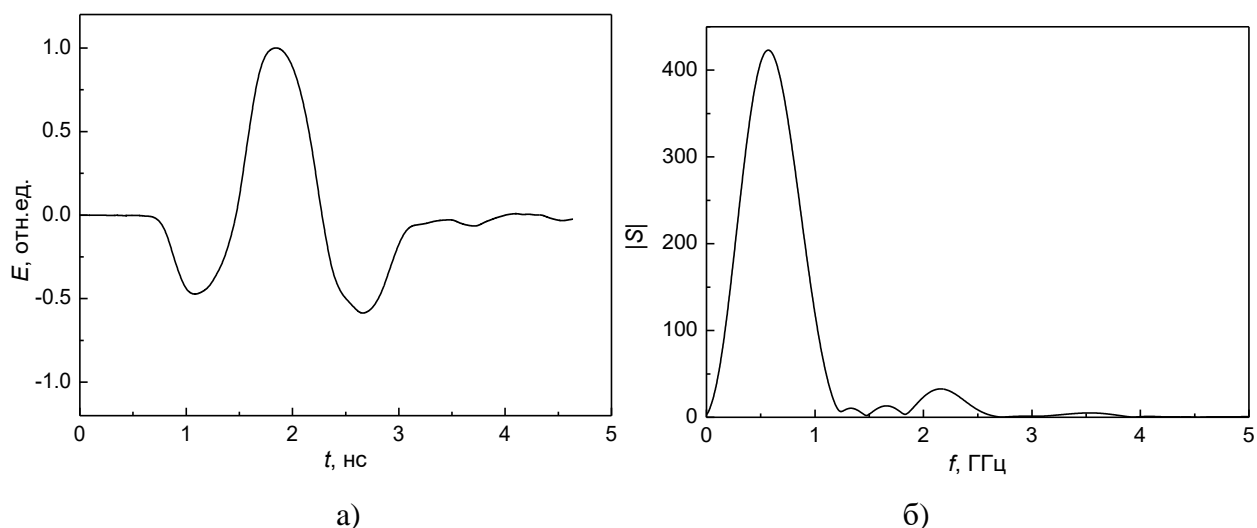


Рисунок 2.29 – Осциллограмма излученного импульса (а) и его амплитудный спектр (б)

Диаграммы направленности антенны в E - и H -плоскостях для вертикально поляризованного электрического поля по пиковой мощности приведены на рисунке 2.30. Уровень мощности кроссполяризованного излучения в E - и H -плоскостях не превышает 5% от максимального уровня мощности для вертикально поляризованного излучения. Как видно из приведенных графиков, ширина диаграмм по уровню половинной мощности составляет 90° для H -плоскости и 80° для E -плоскости. В E -плоскости диаграмма не симметрична относительно плоскости $\delta = 0^\circ$ и ее максимум расположен под углом $\delta = 7^\circ$. Коэффициент направленного действия антенны в главном направлении ($\varphi, \delta = 0^\circ$) составил $D_0 \approx 5.5$.

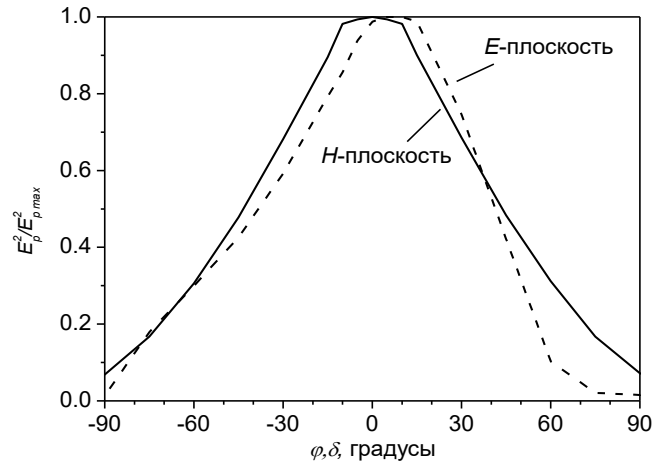


Рисунок 2.30 – Диаграммы направленности антенны КА2 в двух плоскостях

2.7 Антенны, возбуждаемые биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс



а)

б)

в)

Рисунок 2.31 – Антенны КА1-1 (а), КА1-2 (б), КА1-3 (в)

На рисунке 2.31 изображены антенны, оптимизированные для возбуждения биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс [71], [80], [81]. Размеры антенн составляют $15 \times 15 \times 16 \text{ см}^3$ и примерно равны половине пространственной протяженности возбуждающего антенну биполярного импульса длительностью 1 нс. Антенны отличаются конструкцией входного изолятора, кроме того антенна КА1-1 отличается конструкцией верхнего лепестка ТЕМ-рупора.

На рисунке 2.32 представлены зависимости КСВН антенн КА1-1, КА1-2, КА1-3 от частоты. В полосе частот $0.3 \div 2.1 \text{ ГГц}$, где сосредоточена основная доля энергии биполярного импульса длительностью 1 нс, величина КСВН ≤ 3 .

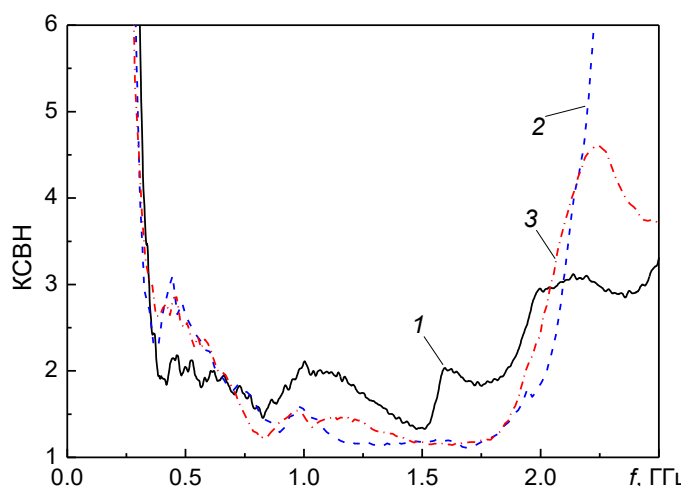


Рисунок 2.32 – КСВН антенн КА1-1 (кривая 1), КА1-2 (кривая 2), КА1-3 (кривая 3)

Диаграммы направленности антенн в E - и H - плоскостях для вертикально поляризованного электрического поля по пиковой мощности приведены на рисунке 2.33. Уровень плотности мощности кроссполяризованного излучения в E - и H - плоскостях не превышает 5% от максимального уровня плотности мощности для вертикально поляризованного излучения. Как видно из приведенных графиков, ширина диаграмм по уровню половинной мощности составляет $88\text{--}98^\circ$ для H -плоскости и $101\text{--}104^\circ$ для E -плоскости. В E -плоскости диаграмма не симметрична относительно плоскости $\delta = 0^\circ$.

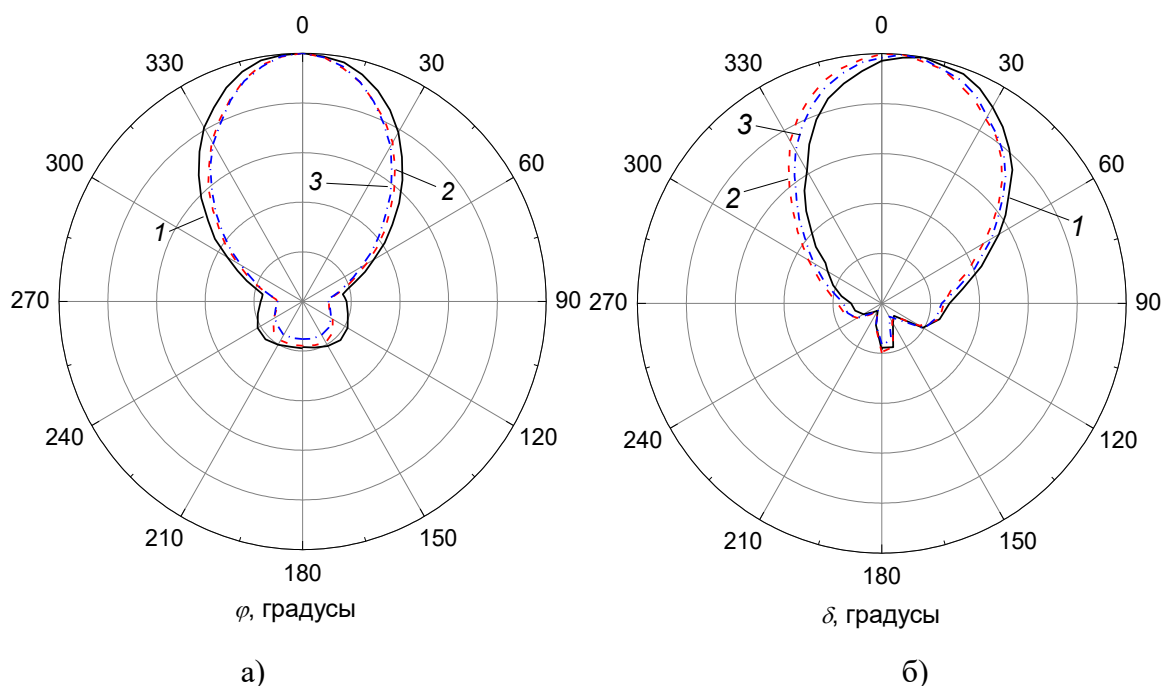


Рисунок 2.33 – ДН в плоскости H (а) и в плоскости E (б) для антенн КА1-1 (кривые 1), КА1-2 (кривые 2), КА1-3 (кривые 3)

Коэффициент направленного действия КА1-1, КА1-2 и КА1-3 в главном направлении ($\varphi, \delta = 0^\circ$) составил $D_0 \approx 4.6$. Остальные характеристики антенн приведены в Таблице 2

2.8 Антенна, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 0.5 нс

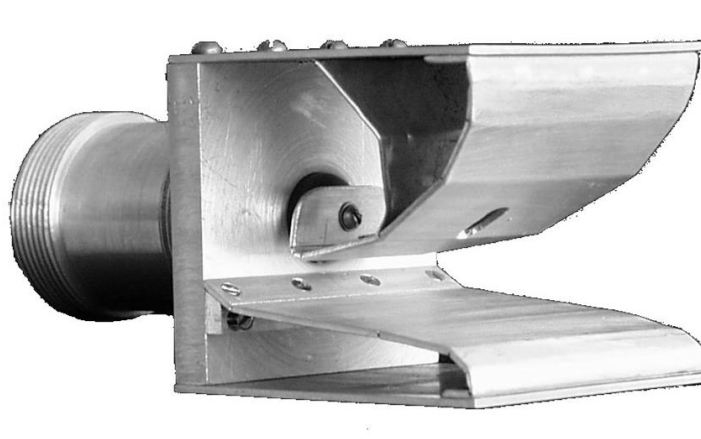


Рисунок 2.34 – Внешний вид антенны КА0.5

На рисунке 2.34 изображена антенна, оптимизированная для возбуждения биполярным импульсом напряжения длительностью 0.5 нс, которая подробно описана в [70]. Размеры антенны составляют $7.5 \times 7.5 \times 9 \text{ см}^3$ и примерно равны половине пространственной протяженности возбуждающего антенну биполярного импульса длительностью 0.5 нс.

На рисунке 2.35 приведены измеренный – кривая 1 и рассчитанный – кривая 2 КСВН антенны КА0.5. На рисунке 2.36 представлены ДН по пиковой мощности в H - и E - плоскостях. Ширина ДН по половинному уровню мощности составляет $\sim 85^\circ$ в плоскости H и $\sim 110^\circ$ в плоскости E .

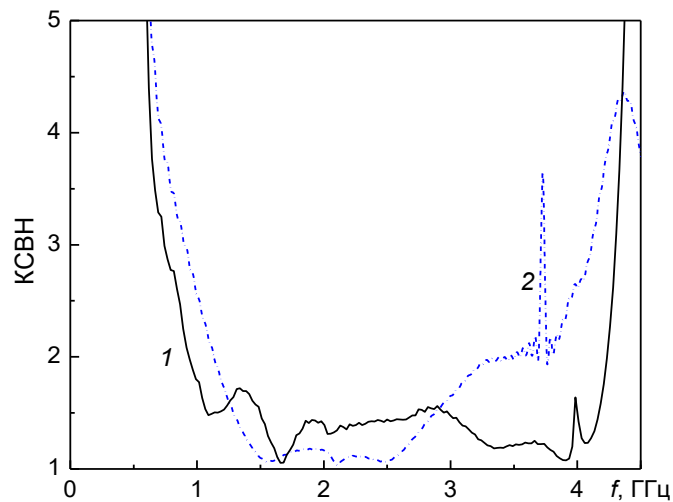


Рисунок 2.35 – Измеренный (кривая 1) и расчетный (кривая 2) КСВН антенны КА0.5

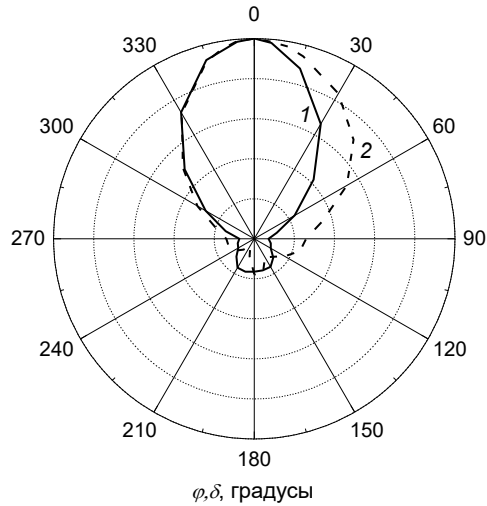


Рисунок 2.36 – ДН антенны КА0.5 в плоскостях H (1) и E (2)

Эффективность антенны по энергии составила $k_w = 0.9$. Измерения, выполненные при возбуждении антенны низковольтным биполярным импульсом длительностью 0.5 нс, позволили оценить величину $k_p \approx 0.8$. Измеренный коэффициент направленного действия антенны в главном направлении диаграммы составил $D_0 \approx 4$, а коэффициент по пиковой напряженности электрического поля $k_E \approx 1.2$. Полученная в измерениях величина E_p отличалась от рассчитанной по формуле (2.7) менее, чем на 10%. Эта разница обусловлена несимметричностью ДН антенны (Рисунок 2.36), что приводит к увеличению погрешности вычисления k_p по методике, изложенной в [71].

На рисунке 2.37 приведены зависимости среднеквадратичного отклонения формы импульса, излученного комбинированной антенной, от угла в H - (кривая 1) и E - (кривая 2) плоскостях. При $\sigma \leq 0.2$ формы импульсов излучения можно полагать близкими.

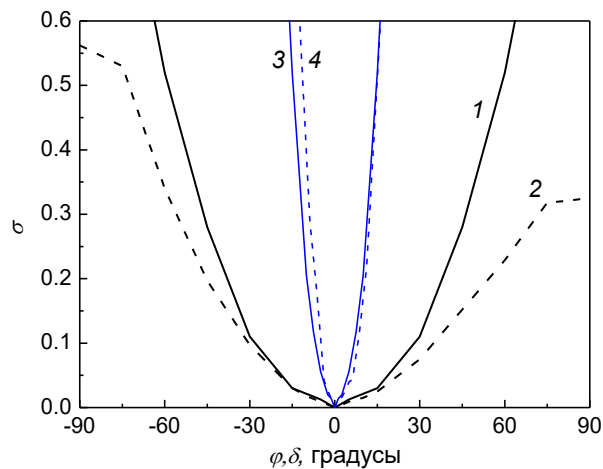


Рисунок 2.37 – Среднеквадратичное отклонение формы импульса, излученного комбинированной антенной, в плоскостях H (1) и E (2) и решеткой в плоскостях H (3) и E (4).

2.9 Антенна, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 0.2 нс

На рисунке 2.38 изображена антенна КА0.2, оптимизированная для возбуждения биполярным импульсом напряжения длительностью 0.2 нс, которая подробно описана в [82], [83].

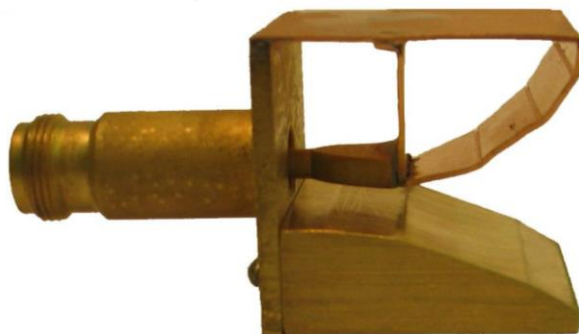


Рисунок 2.38 – Внешний вид антенны КА0.2

Размеры антенны составляют $4 \times 4 \times 4.3$ см³. Антенна подключается к коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом через радиочастотный разъем N-типа.

Полоса согласования антенны КА0.2 по уровню КСВН ≤ 2 составляет 1.4–9.8 ГГц (Рисунок 2.39). Измерения АЧХ и ФЧХ показали (Рисунок 2.40), что для прямого направления АЧХ не выходит за пределы ± 1.5 дБ в диапазоне частот 1.1–8.1 ГГц (Рисунок 2.40, кривая 1), а отклонение ФЧХ от линейной ($\Delta\text{ФЧХ}$) не превышает $\pm\pi/16$ для частот 1.7–9.2 ГГц (Рисунок 2.40, кривая 2). Относительная полоса пропускания в направлении главного максимума излучения, определяемая одновременным выполнением этих трех критериев, составляет 4.8:1 (1.7–8.1 ГГц).

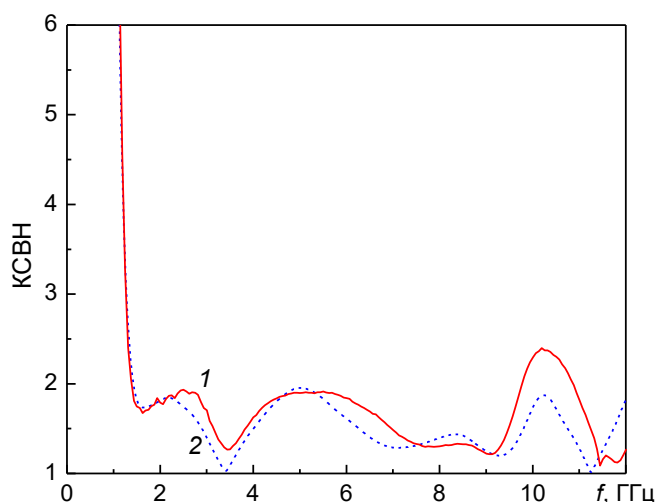


Рисунок 2.39 – Измеренный (1) и расчетный (2) КСВН антенны КА0.2

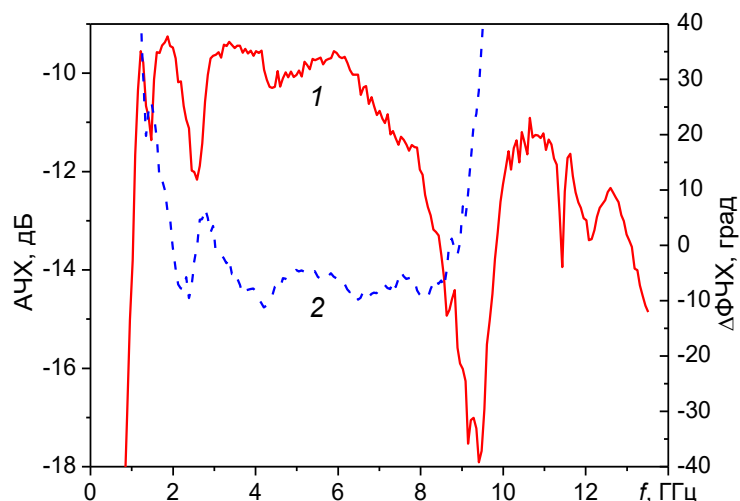


Рисунок 2.40 – Измеренные АЧХ (1) и отклонение ФЧХ от линейной (2) антенны КА0.2

Для измерения пространственно-временных характеристик антенны использовался низковольтный генератор, импульс напряжения которого показан на рисунке 2.41. Электромагнитные импульсы, излученные антенной КА0.2, регистрировались с использованием приемной ТЕМ-антенны с размерами земляной пластины $50 \times 120 \text{ см}^2$ и апертурой $40 \times 8 \text{ см}^2$. Эффективная длина такой приемной антенны вблизи максимума спектра излучения на частотах $f = 4\text{--}5 \text{ ГГц}$ составляет $h_e = 3.4\text{--}3.1 \text{ см}$. В измерениях использовалось значение $h_e = 3.3 \text{ см}$ (Рисунок 2.8).

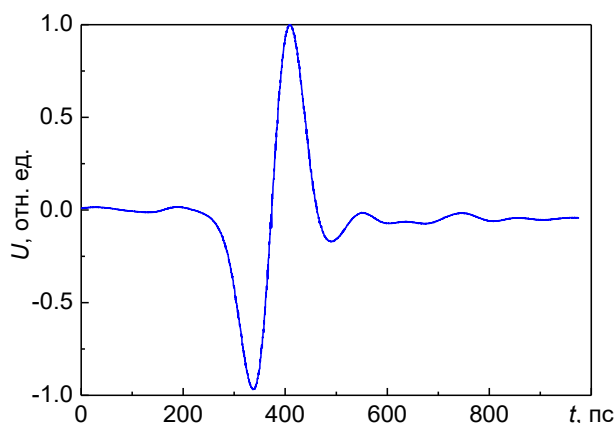


Рисунок 2.41 – Импульс низковольтного генератора напряжения

На рисунке 2.42 приведена осциллограмма импульса излученного антенной КА0.2. Поляризация излучения линейная. Расстояние r между приемной ТЕМ-антенной и КА0.2 составляло 0.9 м. Эффективность антенны КА0.2 по пиковой напряженности электрического поля $k_E = 0.9$. Энергетическая эффективность равна $k_w = 0.92$.

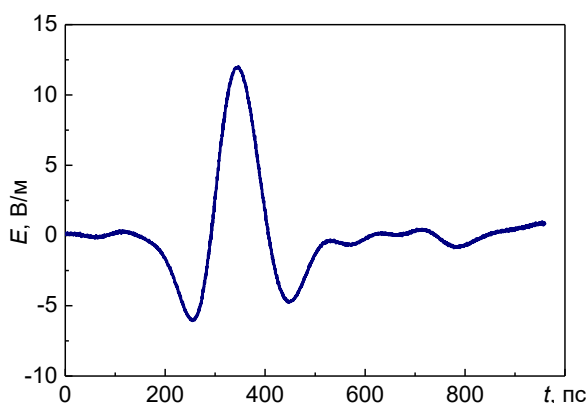


Рисунок 2.42 – Осциллограмма импульса излученного антенной КА0.2

ДН антенны по пиковой мощности в H - и E -плоскостях близки к кардиоидным (Рисунок 2.43). Ширина ДН на полувисоте в H - плоскости равна 90° , а в E - плоскости – 100° . Максимум ДН соответствует 0° в обеих плоскостях. Коэффициент направленного действия антенны $D_0 = 4$.

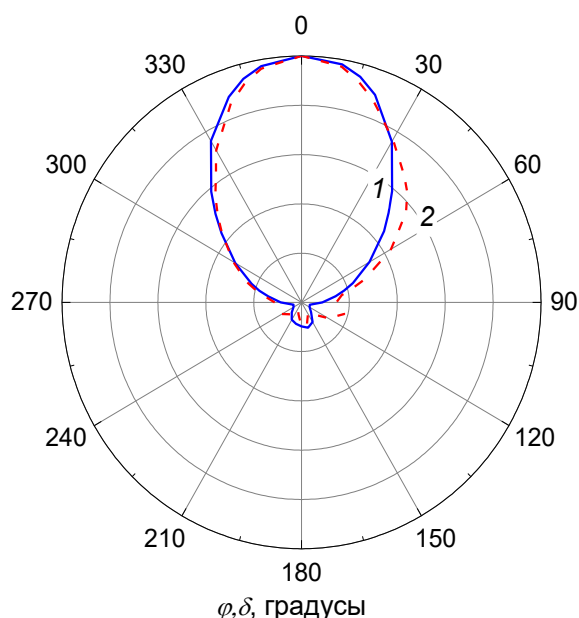


Рисунок 2.43 – ДН антенны КА0.2 по пиковой мощности в плоскостях H (1) и E (2).

2.10 Расширение полосы пропускания антенны для излучения импульсов 0.5 и 1 нс.

В работах [84], [85] была сделана попытка модернизировать КА, расширив ее полосу в область высоких частот. Для этого была модифицирована разработанная ранее антенна КА1-2 [80]. Был уменьшен диаметр коаксиальной линии на входе антенны и изменена геометрия электродов антенны. На рисунке 2.44 приведены осциллограммы импульсов, излученных модифицированной антенной и антенной КА1-2, возбуждаемых биполярным импульсом длительностью 0.5 нс. Амплитуда импульса, излученного модифицированной антенной, увеличилась на 40%. ДН модифицированной антенны КА1-0.5-1 при возбуждении антенны импульсами 1 и 0.5 нс в E - и H - плоскостях показаны на рисунке 2.45. По сравнению с антенной

КА1-2 ширина ДН на полувысоте при возбуждении биполярным импульсом 1 нс увеличилась на 10° в H -плоскости и на 20° в E -плоскости. ДН при возбуждении антенны импульсом 0.5 нс уже.

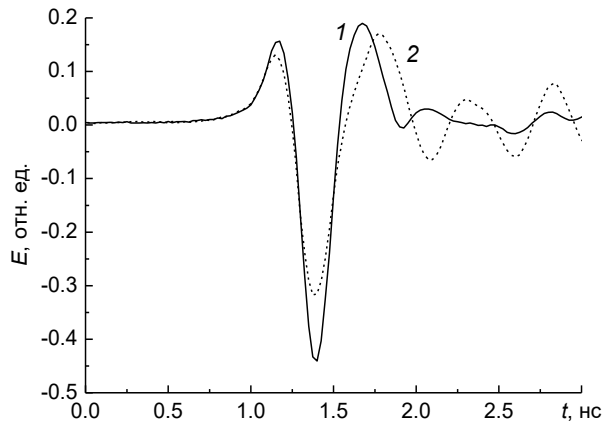


Рисунок 2.44 – Осциллограммы импульсов, излученных антеннами КА1-0.5-1 (1) и КА1-2 (2) при возбуждении биполярным импульсом длительностью 0.5 нс

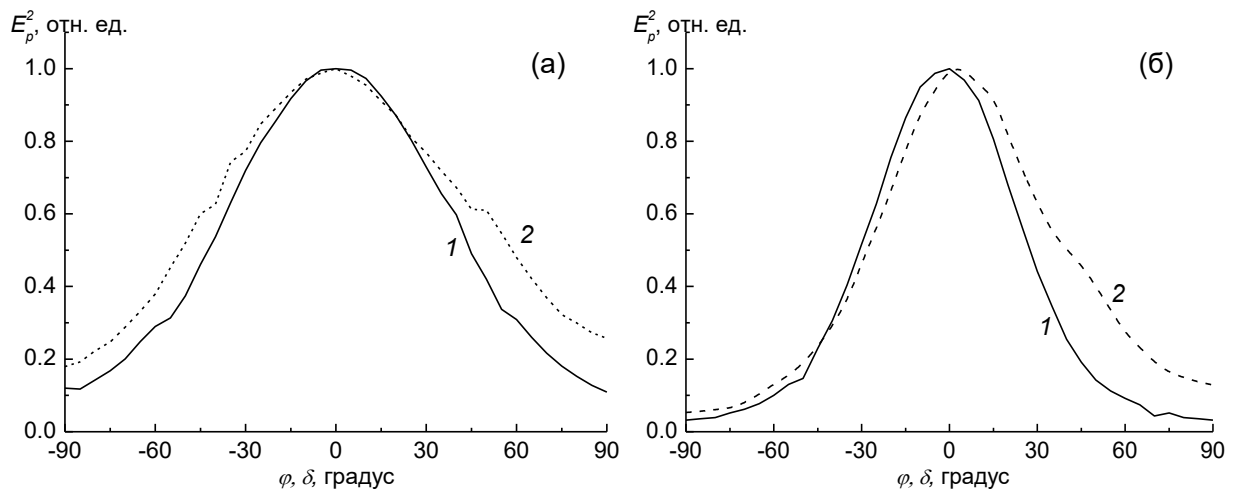


Рисунок 2.45 – ДН антенны КА1-0.5-1 в плоскостях H (1) и E (2) при возбуждении биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс (а) и 0.5 нс (б).

На рисунке 2.46 приведен КСВН антенны КА1-0.5-1. Видно, что в области частот, где лежит основная энергия импульса длительностью 0.5 нс (около 2 ГГц), КСВН больше 2. Поэтому была разработана другая конструкция КА1-0.5-2 (Рисунок 2.47) с более низким уровнем КСВН (Рисунок 2.48). Эта антенна использовалась для излучения как 1 нс, так и 0.5 нс биполярных импульсов. Расширение полосы согласования удалось достичь уменьшением емкости в области коаксиально-полоскового перехода и изменением геометрии электродов антенны подобно тому как это было сделано в КА0.2.

Осциллограммы импульсов, излученных антенной КА1-0.5-2 (кривая 1) и антенной КА1-2 (кривая 2) при возбуждении биполярным импульсом длительностью 0.5 нс, показаны на

рисунке 2.49. Амплитуда импульса, излученного антенной КА1-0.5-2, увеличилась на 14 % по сравнению с КА1-2.

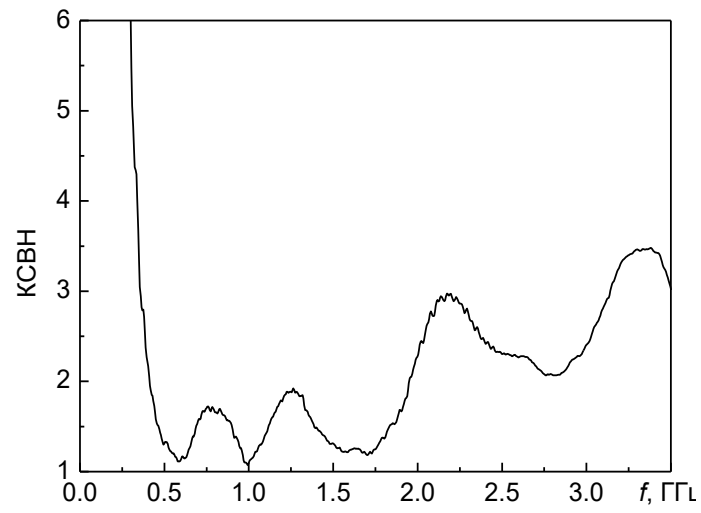


Рисунок 2.46 – КСВН антенны КА1-0.5-1

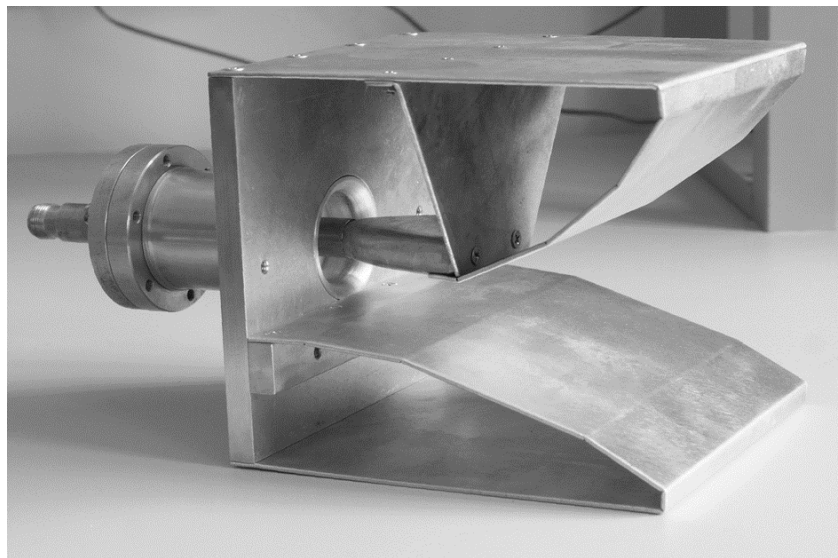


Рисунок 2.47 – Внешний вид антенны КА1-0.5-2

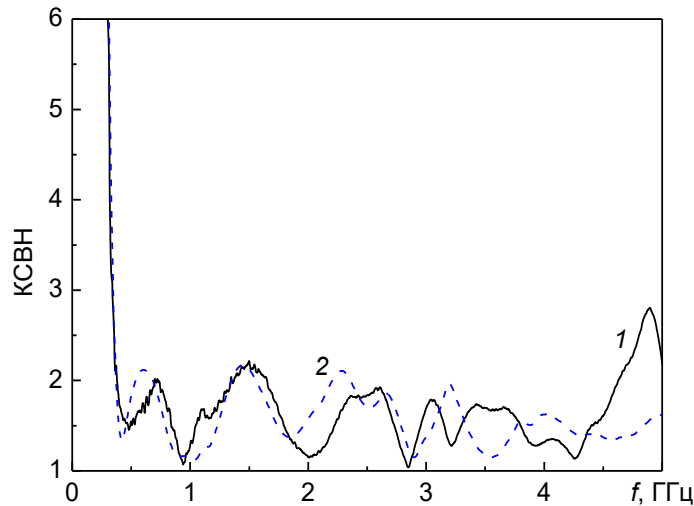


Рисунок 2.48 – КСВН антенны КА1-0.5-2, кривая 1 – измерение, кривая 2 – расчет.

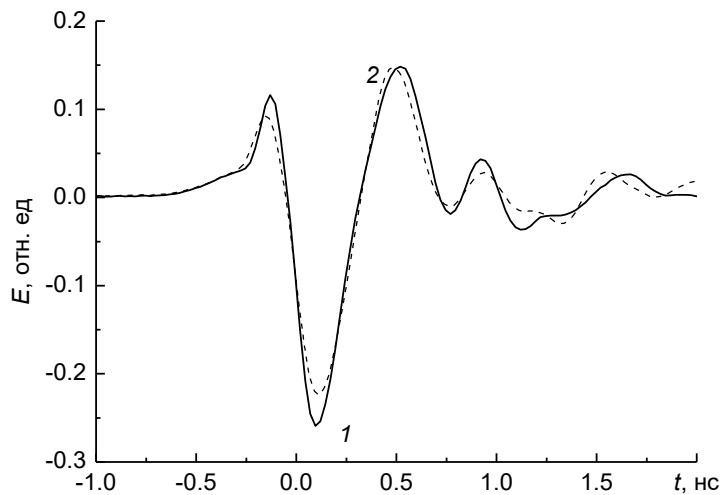


Рисунок 2.49 – Осциллограммы импульсов, излученных антеннами КА1-0.5-2 (кривая 1) и КА1-2 (кривая 2) при возбуждении биполярным импульсом длительностью 0.5 нс

Чтобы оценить энергетическую эффективность антенны КА1-0.5-2 измерили отраженную от антенны энергию W_{ref} при возбуждении биполярными импульсами напряжения длительностью 1 нс и 0.5 нс. Получили $k_w(1 \text{ нс}) = 0.9$ и $k_w(0.5 \text{ нс}) = 0.94$. Отраженная энергия, рассчитанная с использованием соотношения (2.4), составила $k_w(1 \text{ нс}) = 0.9$ и $k_w(0.5 \text{ нс}) = 0.91$, что близко к результатам измерений.

Диаграмму направленности антенны в E - и H - плоскостях измеряли по пиковой мощности (E_p^2) при возбуждении антенны биполярными импульсами длительностью 1 и 0.5 нс. Ширина ДН на полувисоте при возбуждении биполярным импульсом длительностью 1 нс у антенны КА1-0.5-2 была примерно такой же, как и у КА1-0.5-1: 98° в H -плоскости и 108° в E -плоскости (Рисунок 2.50 а). При возбуждении антенны КА1-0.5-2 импульсом длительностью 0.5 нс ширина ДН на полувисоте составила 83° в H -плоскости и 69° в E -плоскости (Рисунок 2.50 б).

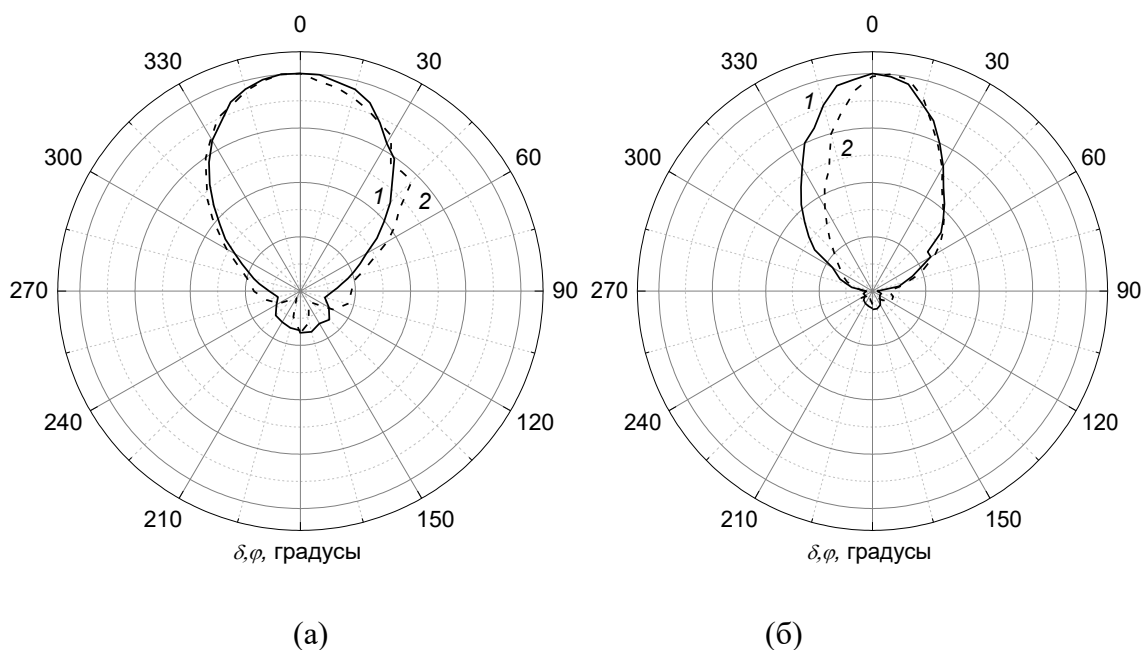


Рисунок 2.50 – Диаграммы направленности антенны КА1-0.5-2 в H - (кривые 1) и E - (кривые 2) плоскостях при возбуждении биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс (а) и 0.5 нс (б)

Таблица 2 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

2.11 Источники мощного СШП-излучения с КА

Был разработан ряд источников мощного СШП-излучения, использующих одиночные КА (Рисунок 2.51). В качестве источника высоковольтных СШП-импульсов напряжения использовался генератор монополярных импульсов (ГМИ) Синус-160 с формирователем биполярных импульсов (ФБИ) [78]. На выходе ГМИ формировался монополярный импульс длительностью 4.5 нс и амплитудой 150-180 кВ на нагрузке 50 Ом. Далее монополярный импульс

поступал на ФБИ, на выходе которого получали биполярный импульс напряжения. Для увеличения электрической прочности КА помещалась в диэлектрический контейнер, который заполнялся газом SF_6 с избыточным давлением для предотвращения электрического разряда в антенне.

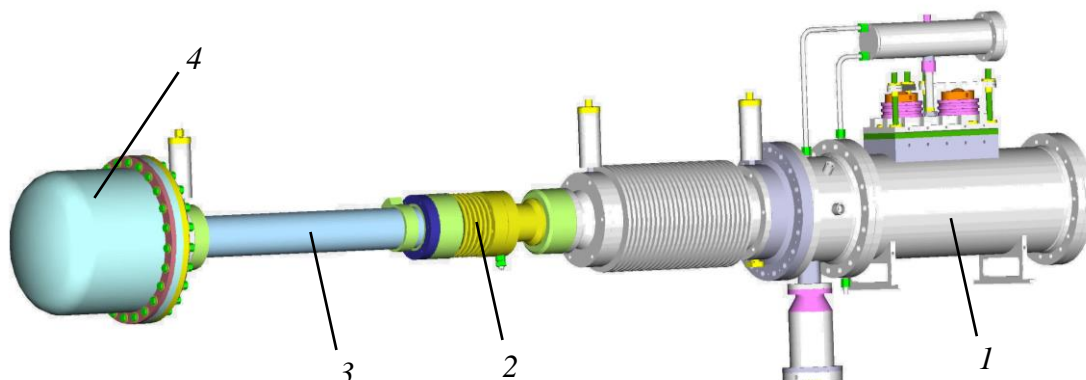


Рисунок 2.51 – Внешний вид источника с КА: 1 – генератор монополярных импульсов Синус-160, 2 – формирователь биполярных импульсов, 3 – фидер, 4 – передающая СШП-антенна в диэлектрическом контейнере.

Принципиальная схема ФБИ, предложенная В.В. Кремневым, показана на рисунке 2.52. ФБИ, использованные в экспериментах, созданы А.М. Ефремовым. В состав схемы входят 3 линии $FL_0 - FL_2$, обостряющий S_2 и срезающий S_3 разрядники, разделительная индуктивность L и нагрузка R . Линии $FL_0 - FL_2$ имеют электрическую длину τ и волновое сопротивление ρ . Сопротивление нагрузки R равно 2ρ . Формирующая линия FL_0 заряжается через зарядную индуктивность L от ГМИ до напряжения $-U_0$. При срабатывании обостряющего разрядника S_2 отрицательный импульс с амплитудой $-U_0/2$ распространяется по линии FL_1 , которая на конце нагружена последовательно соединенными линией FL_2 и нагрузкой R с общим сопротивлением 3ρ . Преломленная в нагрузку волна напряжения формирует отрицательная полуволну биполярного импульса с амплитудой $-U_0/2$. Через время 2τ , когда отраженная волна достигнет начала линии FL_1 , а преломленная в FL_2 - ее конца, сработает срезающий разрядник S_3 . Теперь по линии FL_1 распространяется положительная волна снятия напряжения, а по линии FL_2 отраженная от разомкнутого конца и удвоенная положительная волна. Эти две волны напряжения преломляются на выходе FL_1 и входе FL_2 , складываются и формируют на нагрузке положительную полуволну биполярного импульса с амплитудой $U_0/2$. Через время 4τ переходной процесс заканчивается. Таким образом, на нагрузке возникает биполярный импульс с амплитудой $\pm U_0/2$ и длительностью 4τ .

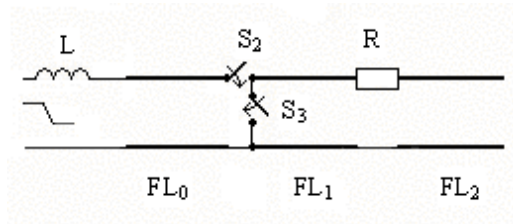


Рисунок 2.52 – Принципиальная схема ФБИ с разомкнутой линией

Используя один ГМИ, созданный в отделе физической электроники ИСЭ СО РАН, и меняя только ФБИ, получили набор высоковольтных биполярных импульсов напряжения с длительностями 0,2, 0,5 (Рисунок 2.53), 1, 2 (Рисунок 2.54) и 3 нс. Некоторые параметры источников СШП-излучения приведены в таблице 3

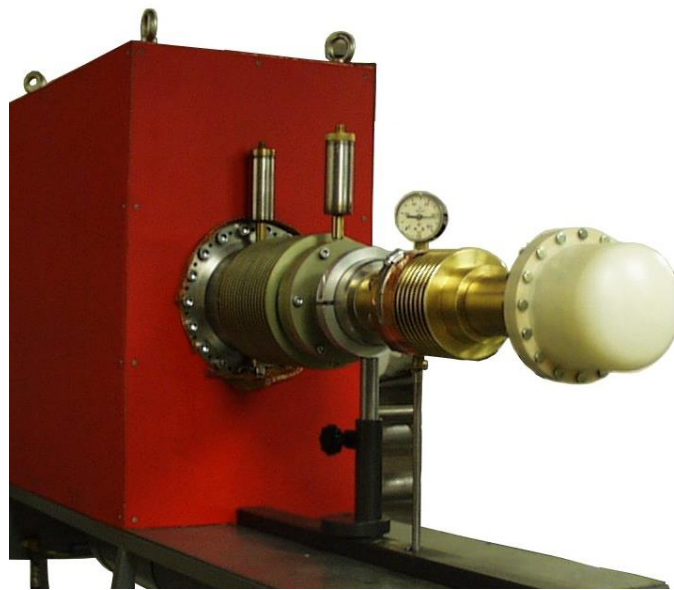


Рисунок 2.53 – Мощный источник с антенной КА0.5

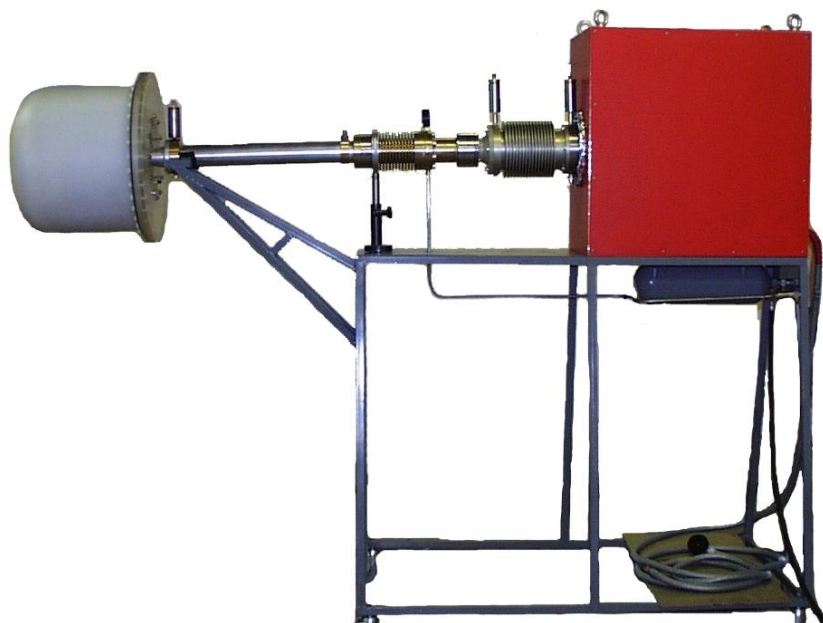


Рисунок 2.54 – Мощный источник с антенной КА2

Осциллограмма импульса, излученного источником с антенной КА2 (Рисунок 2.54) приведена на рисунке 2.55. Эффективный потенциал достиг 400 кВ.

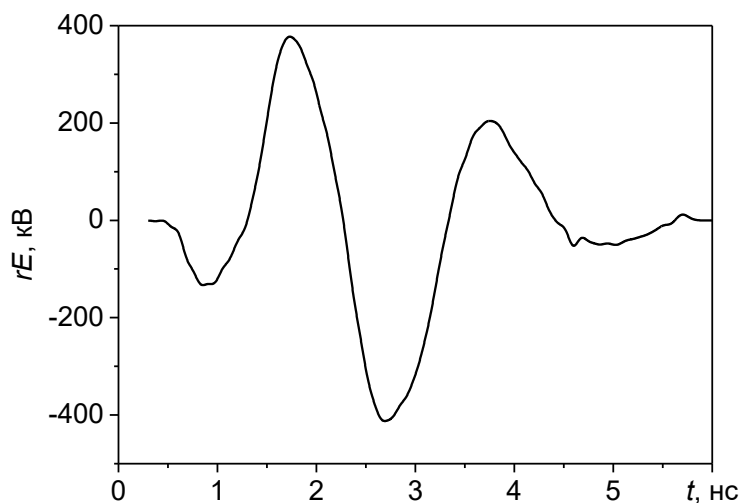


Рисунок 2.55 – Осциллограмма импульса, излученного СШП-источником с антенной КА2

Таблица 3 Параметры мощных источников СШП-излучения с КА

	КА0.2 [83]	КА0.5 [70]	КА1 [80]	КА2 [78]	КА3 [72]
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

2.12 Выводы

Использование в конструкции антенн комбинации электрического и магнитного излучателей позволило расширить их полосу согласования в область низких частот. Комбинация магнитного излучателя с ТЕМ-рупором улучшила согласование и расширила полосу пропускания в области высоких частот. По соотношению геометрических размеров к ширине полосы пропускания и величине обратной мощности комбинированная антенна с ТЕМ-рупором является оптимальным выбором в качестве элемента СШП-решеток [63].

Разработанные и использованные в измерениях временных характеристик регулярные несимметричные ТЕМ-антенны обеспечивают малоискажающую регистрацию СШП электромагнитных импульсов при условии, что пространственная длина импульса не превышает двойной длины лепестка рупора и направление прихода импульса перпендикулярно плоскости апертуры ТЕМ-антенны.

Разработанная конструкция КА позволяет, используя принцип подобия, масштабировать ее под разные длительности биполярных импульсов напряжения. Полоса пропускания, достаточная для эффективного (~90 %) излучения энергии биполярных импульсов, обеспечивается при размерах антенн, примерно равных половине пространственной длины возбуждающего биполярного импульса напряжения.

Исследованные КА имеют кардиоидную ДН в двух плоскостях с шириной на половинном уровне мощности 75-105°. Относительная ширина согласования $\Delta f/f_0$, где $f_0=(f_H+f_L)/2$ КА лежит в пределах от 1 до 1.7, а отношение верхней и нижней граничных частот КСВН по уровню 2 ($b=f_H/f_L$) для разных КА находится в пределах от 3 до 10.

С использованием КА созданы источники мощного СШП-излучения с длительностями биполярных импульсов напряжения от 0.2 нс до 3 нс (Таблица 3). Источник с антенной КА2, возбуждаемой биполярными импульсами напряжения длительностью 2 нс и амплитудой 230 кВ, позволил получить импульсы СШП-излучения с эффективным потенциалом $rE_p \approx 400$ кВ. Эффективность по пиковой напряженности поля k_E источника излучения с антенной КА3 превосходит k_E источника излучения с антенной на основе комбинации электрического монополя и магнитного диполя, возбуждаемой биполярным импульсом длительностью 3 нс [16], в 4.5 раза.

3. РЕШЕТКИ КОМБИНИРОВАННЫХ АНТЕНН, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ БИПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ОДИНАКОВОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В общем случае, использование антенных решеток позволяет получать заданные характеристики излучателя (ДН, КНД, уровень боковых лепестков и др) изменяя число элементов и распределения амплитуд и фаз возбуждающих их токов. Также решетки дают возможность реализовать электронное сканирование волновым пучком. Отдельной задачей при разработке антенных решеток является конструирование распределительной системы.

3.1 Моделирование решеток и уровень бокового излучения

Под моделированием решеток здесь будем понимать расчет их ДН. Для этого использовались два метода:

- 1) Прямое сложение импульсов, излученных одиночной антенной (элементом решетки) с учетом изменения задержек и формы импульса от угла;
- 2) Умножение ДН одиночной антенны (элемента решетки) на множитель решетки, рассчитанный для длины волны, соответствующей центральной частоте в спектре импульса излучения.

Для примера на рисунке 3.1 приведены ДН для вертикальной решетки 4×1 [86]. Видно, что в пределах основного лепестка расчетные и измеренная ДН хорошо согласуются. Но при $\delta = 30^\circ$ у ДН, рассчитанной с помощью множителя решетки, хорошо видны нули ДН, что отличается от измеренной ДН. В дальнейшем, если особо не оговорено, под расчетной ДН будем подразумевать ДН, рассчитанную методом сложения импульсов.

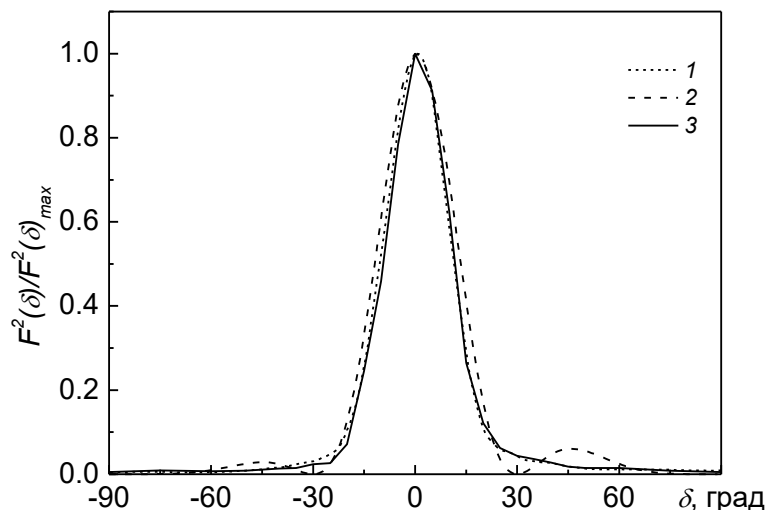


Рисунок 3.1 – Расчетные (1, 2) и измеренная (3) ДН вертикальной решетки 4×1 по пиковой мощности в E -плоскости: 1 – расчет сложением импульсов, 2 – расчет с множителем решетки, 3 – измерение

В расчетах импульс излученный элементом решетки (КА) моделировался производной суммы двух гауссовых функций:

$$E(t, \tau) = \left(\frac{1}{\tau} - 1\right) e^{-\left(\frac{4t}{\tau} - 4\right)^2} - \left(\frac{1}{\tau} - 0.5\right) e^{-\left(\frac{4t}{\tau} - 2\right)^2}, \quad (3.1)$$

а ДН полагали кардиоидной, что соответствует результатам измерений:

$$F(\delta) = 1 + \sin\left(\delta + \frac{\pi}{2}\right). \quad (3.2)$$

ДН характеризуются шириной основного лепестка и уровнем боковых лепестков. Однако, в случае возбуждения решетки коротким биполярным импульсом нет явно выраженных боковых лепестков и правильнее говорить о боковом излучении (Рисунок 3.2).

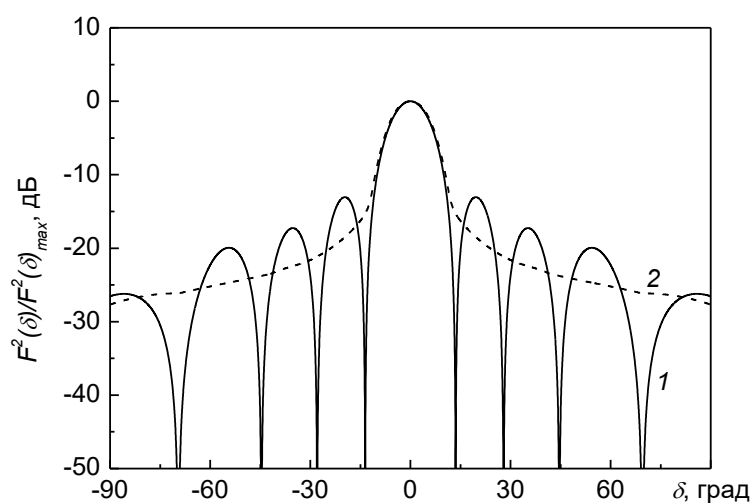


Рисунок 3.2 – Расчетные ДН 4-х элементной линейной решетки при возбуждении синусоидальным сигналом – 1 и биполярным импульсом – 2

В решетках, возбуждаемых синусоидальными сигналами, для снижения уровня боковых лепестков применяют различные амплитудные распределения на апертуре: косинус на пьедестале, косинус в квадрате на пьедестале, Дольфа-Чебышева и др (Рисунок 3.3). В случае возбуждения элементов решетки биполярным импульсом использование неравноамплитудных распределений также дает уменьшение бокового излучения, но в значительно меньшей степени (Рисунок 3.4), на 2-6 дБ по сравнению 9-17 дБ для синусоидального сигнала. Это связано, как с изначально более низким уровнем бокового излучения для решетки, возбуждаемой биполярным импульсом, так и более высоким уровнем бокового излучения при использовании неравноамплитудных распределений. При этом ширина ДН на полувысоте у неравноамплитудных распределений увеличивается на 3-6° (Рисунок 3.4). Кроме того, использование неравноамплитудных распределений приводит к значительному, в 1.4 раза и более, снижению пиковой напряженности поля в главном направлении диаграммы. Поэтому

оптимальным для решеток, возбуждаемых биполярными импульсами, оказывается равноамплитудное распределение. Далее будем исследовать решетки только с равноамплитудным распределением.

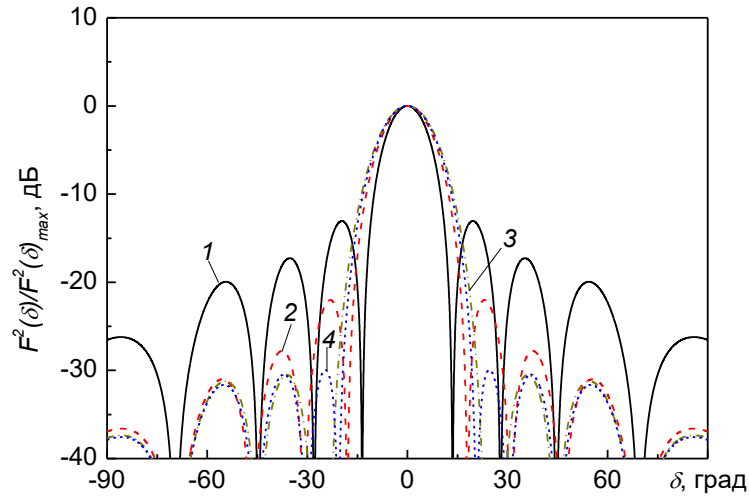


Рисунок 3.3 – Расчетные ДН 8-ми элементной линейной решетки возбуждаемой синусоидой с равноамплитудным распределением – 1, распределениями косинус на пьедестале – 2, косинус в квадрате на пьедестале – 3 и Дольфа-Чебышева – 4

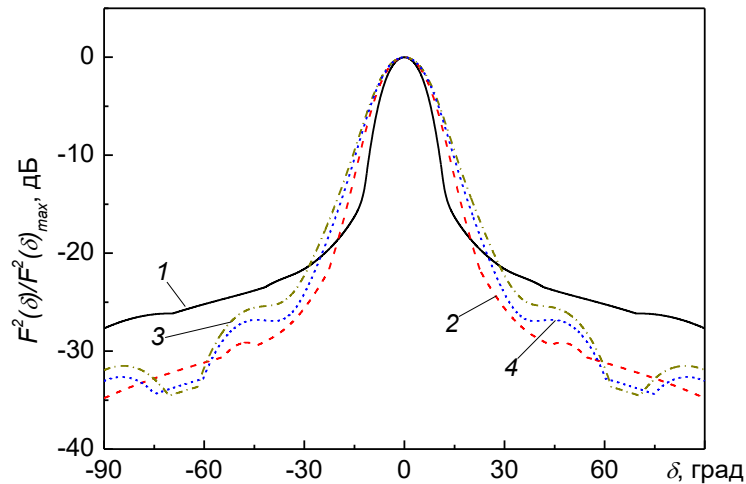


Рисунок 3.4 – Расчетные ДН 8-ми элементной линейной решетки возбуждаемой биполярным импульсом с равноамплитудным распределением – 1, распределениями косинус на пьедестале – 2, косинус в квадрате на пьедестале – 3 и Дольфа-Чебышева – 4

3.2 Оптимизация структуры решеток

Результаты исследований по оптимизации структуры решеток приведены в работах [18], [87], [86]. С использованием антенны КА1-1 были исследованы варианты построения линейных и прямоугольных 4-х элементных решеток с равноамплитудным распределением импульсов. На рисунке 3.5 показаны схематические изображения горизонтальной (а) и вертикальной (б) линейных решеток. Стрелочками обозначена плоскость поляризации вектора \mathbf{E} излучаемого импульса, h – поперечный размер элемента, равный 15 см, d_h и d_v – расстояние между центрами элементов по горизонтали и вертикали соответственно. На рисунке 3.6 представлены варианты прямоугольной 2×2 решетки. Элементы решетки закреплялись на диэлектрической пластине. В случае, когда $d = h$, элементы решетки гальванически связаны между собой.

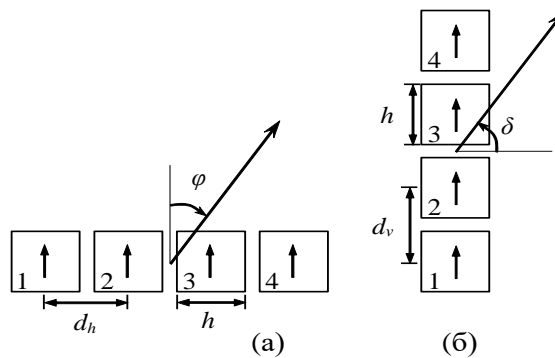


Рисунок 3.5 – Конфигурации линейных решеток

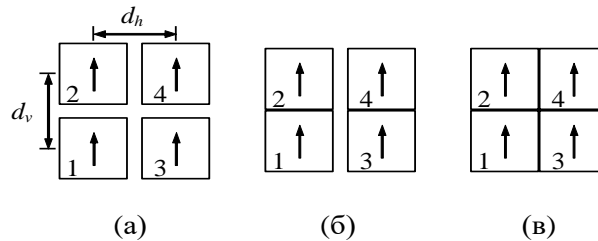


Рисунок 3.6 – Конфигурации прямоугольных решеток

Сравнения значений эффективного потенциала излучения рассматриваемых решеток показало, что для вертикальной решетки с $d_v = h$ и $d_v = 1.2h$ эффективные потенциалы излучения примерно равны. Для горизонтальной решетки с $d_h = 1.2h$ эффективный потенциал излучения больше, чем для решетки с $d_h = h$, на 7%. Для прямоугольной решетки эффективный потенциал излучения для варианта, приведенного на рисунке 3.6 б, больше, чем для вариантов на рисунке 3.6 а и рисунке 3.6 в на 2% и 5% соответственно.

Кривые зависимостей эффективного потенциала излучения от расстояния между элементами решеток 1×4 (Рисунок 3.5 а) и 2×2 (Рисунок 3.6 б) в H -плоскости приведены на рисунке 3.7. Из рисунка видно, что сначала значение эффективного потенциал излучения возрастает с увеличением расстояния между элементами решетки, а затем начинает уменьшаться.

Для обеих решеток максимум эффективного потенциала излучения достигается примерно при $d_h = 1.5h$. При расстояниях $d_h > 2.4h$ слабое уменьшение эффективного потенциала излучения решетки 2×2 обусловлено влиянием ДН элемента решетки при расстоянии до приемной антенны 4 м. Учитывая требование минимизации размеров, для рассмотренных решеток 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. При этом эффективный потенциал излучения относительно максимального значения уменьшается на 2.5%.

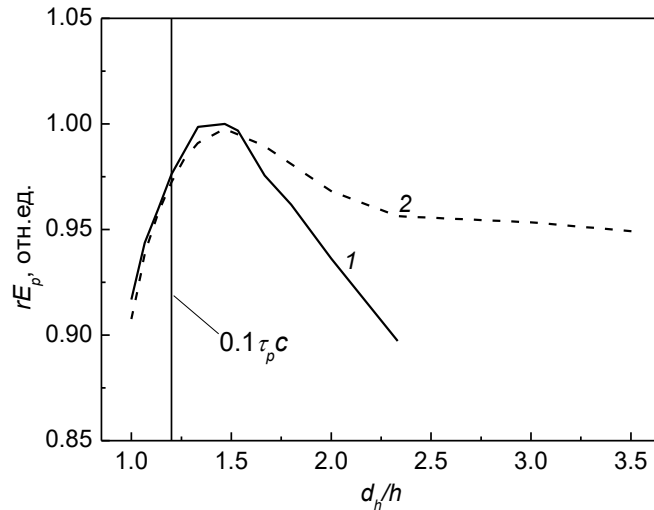


Рисунок 3.7 – Зависимость эффективного потенциала излучения от расстояния между элементами решеток в H -плоскости для решетки 1×4 (кривая 1) и решетки 2×2 (кривая 2)

Кроме того, для решеток с замкнутыми элементами $d = h$ и для решеток с $d = 1.2h$ были проведены измерения отраженной энергии. Измерения проводились двумя способами: используя метод рефлектометрии и измерения КСВН элементов решетки с последующим использованием формулы (2.4).

На рисунке 3.8 приведены зависимости отраженной энергии для вертикальной решетки (Рисунок 3.5 б). Кривые 1 и 2 получены в экспериментах с разомкнутой и замкнутой решеткой соответственно. Кривые 3 и 4 рассчитаны с использованием КСВН для разомкнутой и замкнутой решетки соответственно. Различие между отраженными энергиями, измеренными во временной области и рассчитанными с помощью формулы (2.4), по-видимому, связано с малым временем измерений ($\Delta t = 8$ нс) отраженного импульса. В вертикальной решетке измеренная суммарная отраженная энергия для варианта с $d_v = h$ меньше, чем для варианта с $d_v = 1.2h$, на 17%. Суммарная отраженная энергия, рассчитанная с использованием измеренных КСВН, для разомкнутой и замкнутой решеток примерно одинакова.

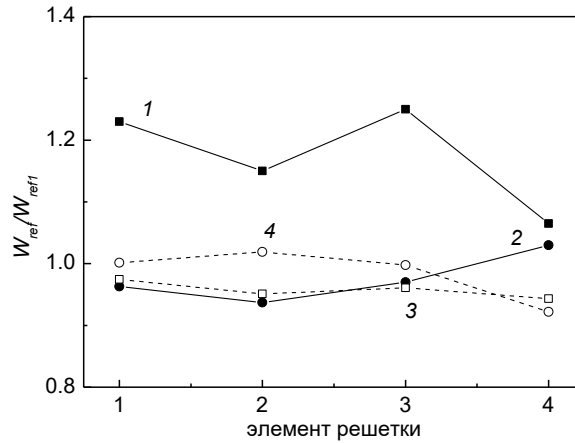


Рисунок 3.8 – Отношение отраженной энергии элемента в вертикальной решетке к отраженной энергии одиночной антенны; прямое измерение разомкнутой – 1 и замкнутой – 2 решеток, расчет по формуле (2.4) для разомкнутой – 3 и замкнутой – 4 решеток

Зависимости отраженной энергии для горизонтальной решетки (Рисунок 3.5 а) приведены на рисунке 3.9. Кривые 1 и 2 получены в экспериментах с разомкнутой и замкнутой решеткой соответственно. Кривые 3 и 4 рассчитаны с использованием КСВН для разомкнутой и замкнутой решетки соответственно. Из рисунка следует, что для обоих вариантов решетки значительно увеличилась отраженная энергия внутренних элементов, что указывает на их взаимодействие в H -плоскости. В горизонтальной решетке измеренная суммарная отраженная энергия для разомкнутого и замкнутого вариантов близки. Суммарная отраженная энергия, рассчитанная с использованием КСВН, для разомкнутой решетки меньше, чем для замкнутой, на 3%.

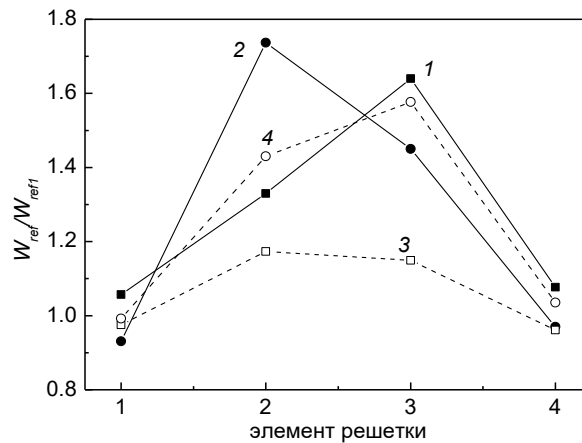


Рисунок 3.9 – Отношение отраженной энергии элемента в горизонтальной решетке к отраженной энергии одиночной антенны; прямое измерение разомкнутой – 1 и замкнутой – 2 решеток, расчет по формуле (2.4) для разомкнутой – 3 и замкнутой – 4 решеток

Зависимости отраженной энергии для прямоугольных решеток 2×2 (Рисунок 3.6), приведены на рисунке 3.10. Кривые 1, 2 и 3 получены в экспериментах с решетками а, б и в (Рисунок 3.6) соответственно. Кривые 4, 5 и 6 рассчитаны с использованием КСВН для решеток а, б и в (Рисунок 3.6) соответственно. Измеренная суммарная отраженная энергия для варианта решетки, приведенного на рисунке 3.6 б, меньше, чем для вариантов на рисунке 3.6 а и рисунке

3.6 в, на 4.5% и 10% соответственно. Суммарная отраженная энергия, рассчитанная с использованием КСВН, для варианта решетки на рисунке 3.6 б меньше, чем для вариантов на рисунке 3.6 а и рисунке 3.6 в, на 2% и 10% соответственно. Таким образом, в прямоугольной решетке с равноамплитудным распределением импульсов оптимальным по энергетической эффективности излучения является вариант, в котором в E -плоскости элементы соединены гальванически ($d_v = h$), а в H -плоскости элементы разнесены ($d_h = 1.2h$).

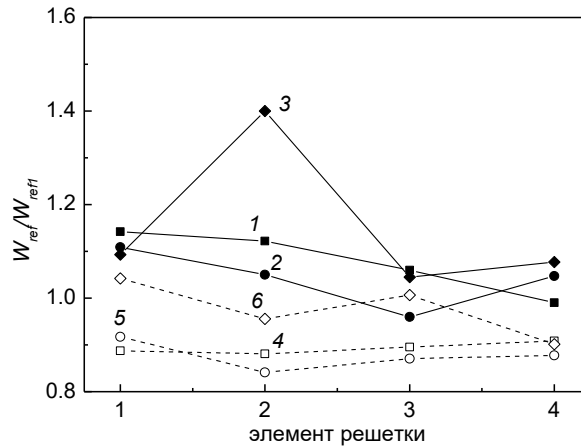


Рисунок 3.10 – Отношение отраженной энергии элемента в прямоугольной решетке к отраженной энергии одиночной антенны

На рисунке 3.11 приведены зависимости отраженной энергии от расстояния между элементами в горизонтальной решетке d_h/h . Кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют номерам элементов в решетке на рисунке 3.5 а. Из рисунка следует, что с ростом расстояния между элементами энергия, отраженная от внутренних (2 и 3) элементов уменьшается. Энергия, отраженная от внешних элементов (1 и 4), практически не зависит от расстояния между ними. Максимальный уровень отраженной энергии возникает при гальванической связи между элементами. Это хорошо заметно на графике по кривым для внутренних элементов. Резкий спад кривой при $d_h=h$ соответствует размыканию элементов. Зависимости отраженной энергии от расстояния между элементами в прямоугольной решетке 2×2 (вариант б, Рисунок 3.6) приведены на рисунке 3.12. Кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют номерам элементов в решетке. Минимальный уровень отраженной энергии соответствует расстоянию между элементами равному $d_h = (1.07-1.2)h$. Также как и в предыдущем случае, максимальный уровень отраженной энергии возникает при гальванической связи между элементами.

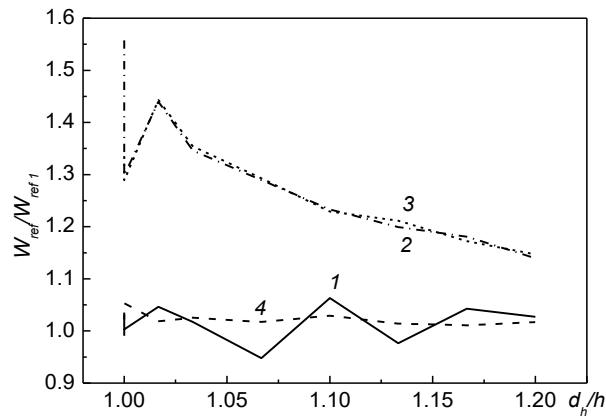


Рисунок 3.11 – Отношение отраженной энергии элемента в горизонтальной решетке к отраженной энергии одиночной антенны в зависимости от расстояния между элементами, 1, 2, 3 и 4 соответствуют номерам элементов в решетке

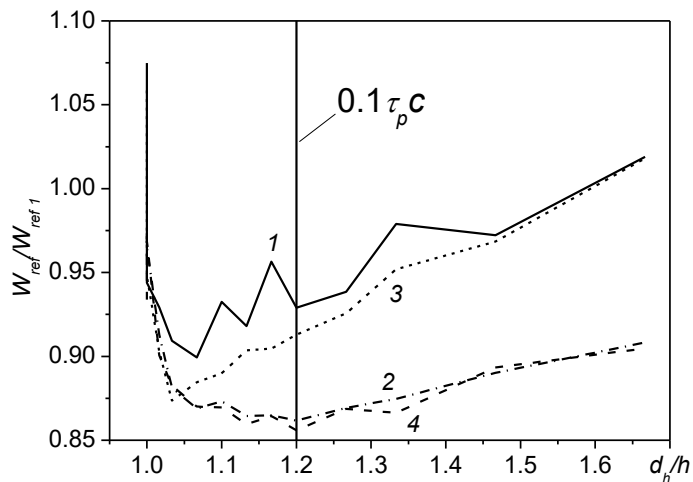


Рисунок 3.12 – Отношение отраженной энергии элемента в прямоугольной решетке к отраженной энергии одиночной антенны в зависимости от расстояния между элементами, 1, 2, 3 и 4 соответствуют номерам элементов в решетке

3.3 Характеристики решеток и источников излучения

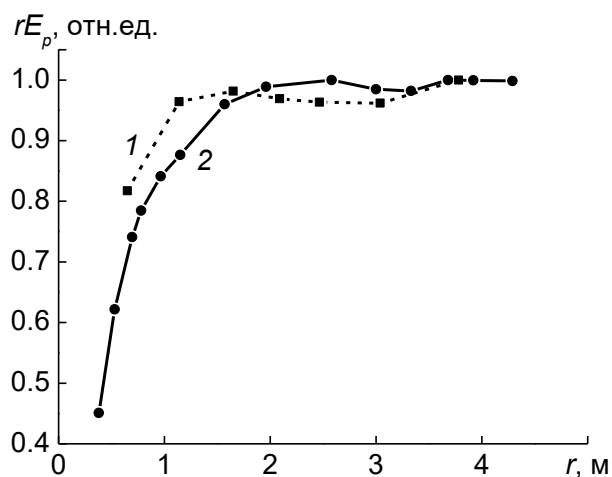
3.3.1 Решетка, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 3 нс

На рисунке 3.13 представлена 4-элементная решетка (2×2) [64]. В качестве элементов решетки использовались антенны КАЗ, которые были закреплены на диэлектрической пластине и объединены в вертикальные секции по два гальванически связанных между собой элемента. Расстояние между секциями равно 50 см. Апертура решетки составляет 95×90 см². Решетка запитывалась через делитель мощности, соединенный с элементами решетки кабелем с кордельной изоляцией РК50-17-51. При возбуждении высоковольтными импульсами для повышения электрической прочности в кабели закачивался газ SF₆ под давлением 5 атм.



Рисунок 3.13 – Антенная решетка 2×2

Для определения границы дальней зоны были проведены измерения зависимости величины rE_p от расстояния r между решеткой и приемной антенной (Рисунок 3.14). В качестве приемных использовались ТЕМ-антенна (кривая 1) и резистивный диполь [67] (кривая 2). Горизонтальный участок кривой соответствует дальней зоне. Различие в поведении кривых объясняется разницей размеров апертур приемных антенн. Из рисунка видно, что расстояния большие 3 м можно считать дальней зоной. Все измерения проводились с помощью ТЕМ-антенны на расстояниях более 3.5 м.

Рисунок 3.14 – Зависимость rE_p от расстояния при использовании ТЕМ-антенны (1) и резистивного диполя (2)

Ширина ДН на половинном уровне мощности составляет примерно 35° (Рисунок 3.15). Коэффициент направленного действия решетки в главном направлении $D_0 = 18$. Эффективность по пиковой напряженности поля для решетки составила 8.3.

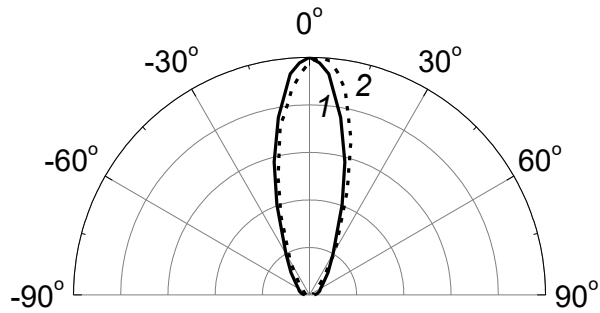


Рисунок 3.15 – Диаграммы направленности решетки в плоскостях H (1) и E (2)

При возбуждении решетки высоковольтным биполярным импульсом напряжения амплитудой 85 кВ и длительностью 3 нс получили электромагнитные импульсы излучения с эффективным потенциалом 530 кВ (Рисунок 3.16). Суммарной время работы составило более 2×10^6 импульсов на частоте повторения 100 Гц [64].

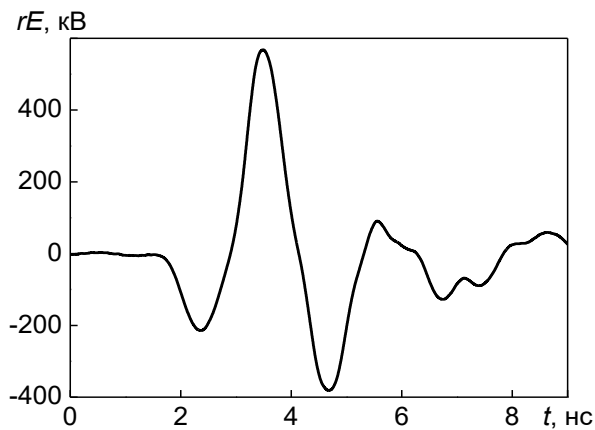


Рисунок 3.16 – Осциллограмма импульса, излученного антенной решеткой

3.3.2 Решетки, возбуждаемые биполярным импульсом напряжения длительностью 2 нс

Первым был разработан и исследован мощный источник с 16-элементной решеткой (4×4) [88], [78] (Рисунок 3.17). В качестве элемента решетки использовались антенны КА2. Решетка состояла из четырех вертикальных секций размерами 120×30 см² по четыре излучающих элемента в каждой, которые были закреплены на диэлектрической пластине. Соседние элементы в вертикальной секции гальванически связаны между собой, в то время как сами секции гальванически не связаны. Для согласования выходного волнового сопротивления ФБИ 50 Ом и суммарного волнового сопротивления фидера антенной решетки 3.125 Ом разработан волновой трансформатор сопротивлений. Конструкция трансформатора представляет собой маслонеполненную коаксиальную линию длиной 650 мм, волновое сопротивление ρ_w которого меняется вдоль оси z по закону $\rho_w = 50 \exp(-4.62z)$. Выход трансформатора через делитель мощности соединялся с элементами антенной решетки с помощью кабелей РК-50-17-17 с

полиэтиленовой изоляцией. Для регистрации выходного импульса в одном из кабелей был установлен емкостный делитель напряжения.

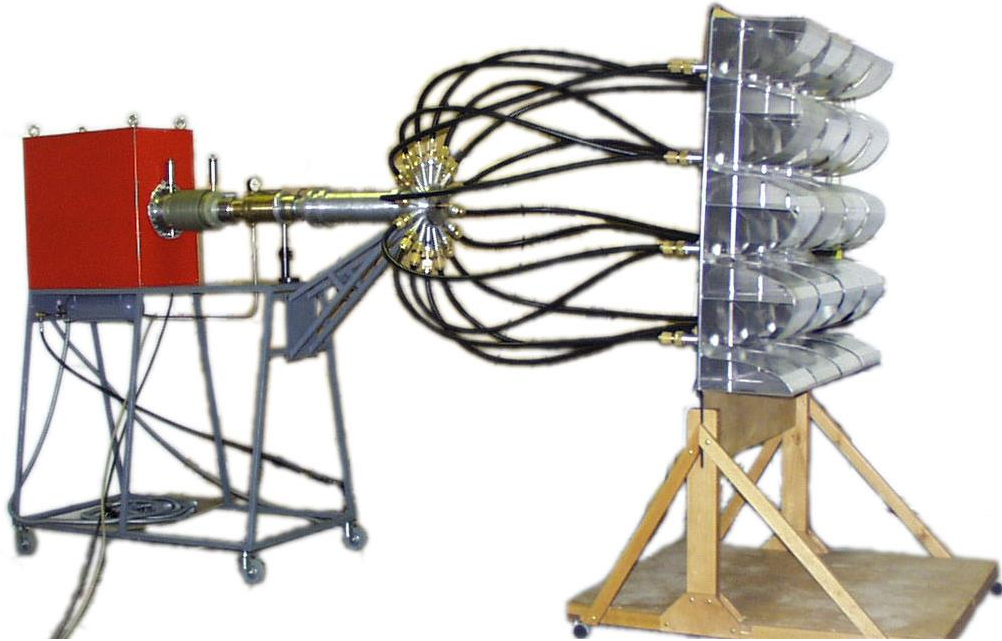


Рисунок 3.17 – Источник мощных СШП-импульсов с 16-элементной антенной решеткой

На рисунке 3.18 приведены КСВН для элементов решетки (кривая 2) и для сравнения антенны КА2 (кривая 1). Из графиков видно, что КСВН элемента решетки в области 200-700 МГц уменьшился по сравнению с одиночной антенной.

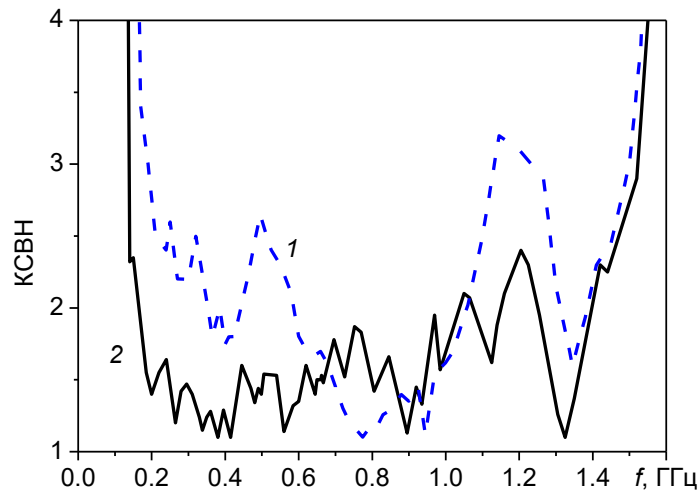


Рисунок 3.18 – КСВН антенны КА2 – 1 и элемента решетки – 2

Была измерена зависимость rE_p от расстояния между приемной антенной и решеткой (Рисунок 3.19). При расстоянии $r > 7$ м кривая слабо зависит от r , т.е. поле изменяется пропорционально $1/r$, что является показателем дальней зоны. ДН решетки по пиковой мощности в E - и H - плоскостях для вертикально поляризованного электрического поля приведены на рисунке 3.20. ДН в E - и H - плоскостях симметричны и их ширина по уровню половинной мощности составляет $\approx 20^\circ$.

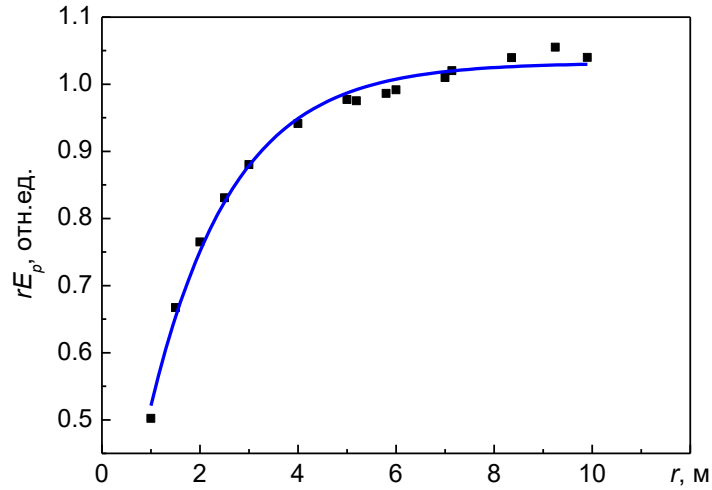


Рисунок 3.19 – Зависимость rE_p от расстояния r между приемной антенной и решеткой

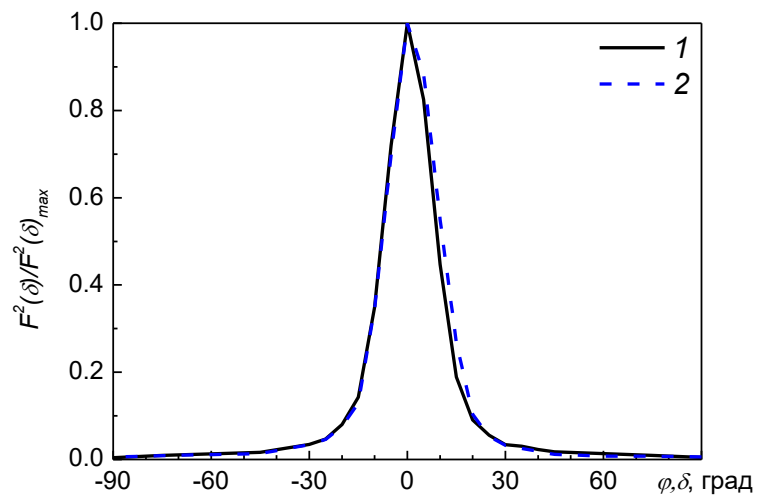


Рисунок 3.20 – ДН решетки в H (1) и E (2) плоскостях

Осциллограмма импульса излучения приведена на рисунке 3.21. При амплитуде биполярного импульса на входе в трансформатор сопротивлений 230 кВ эффективный потенциал излучения достигал 1.67 МВ при частоте повторения импульсов 100 Гц.

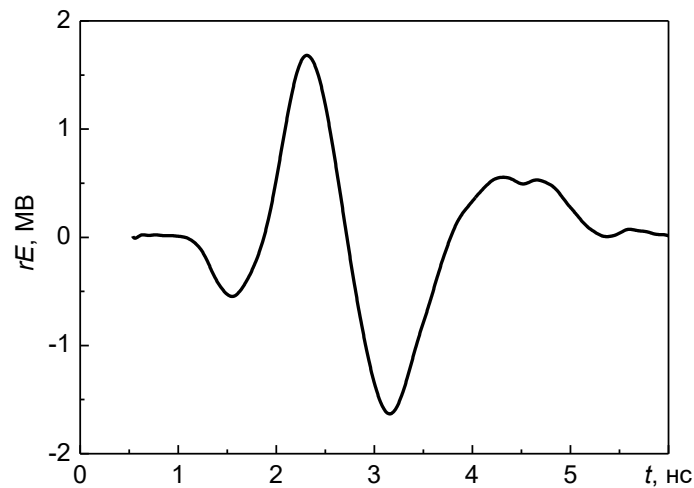


Рисунок 3.21 – Осциллограмма импульса излученного решеткой

В дальнейшем был разработан экспортный вариант мощного источника СШП-излучения с 9-элементной решеткой (3×3) [89] Рисунок 3.22. В отличие от предыдущего источника (Рисунок 3.17) здесь волновое сопротивление на выходе ФБИ составляло 12.5 Ом. Поэтому волновой трансформатор представлял собой коаксиальную линию с сопротивлением, изменяющимся от 12.5 до 5.56 Ом. Кроме того, для электрической изоляции вместо масла использовался газ SF₆. Сопротивление волнового трансформатора рассчитывалось с помощью выражения для компенсированного экспоненциального перехода [90]

$$\rho(x) = \rho_0 \exp\left\{\ln \frac{\rho_L}{\rho_0} \left(\frac{L-x}{L} - 0.133 \sin\left(2\pi \frac{L-x}{L}\right)\right)\right\}, \quad (3.3)$$

где L – длина перехода, ρ_0 и ρ_L начальное и конечное сопротивление перехода. На рисунке 3.23. приведена расчетная характеристика S_{21} волнового трансформатора. В полосе от 0.2 до 1 ГГц расчётные потери не превышают 1%.

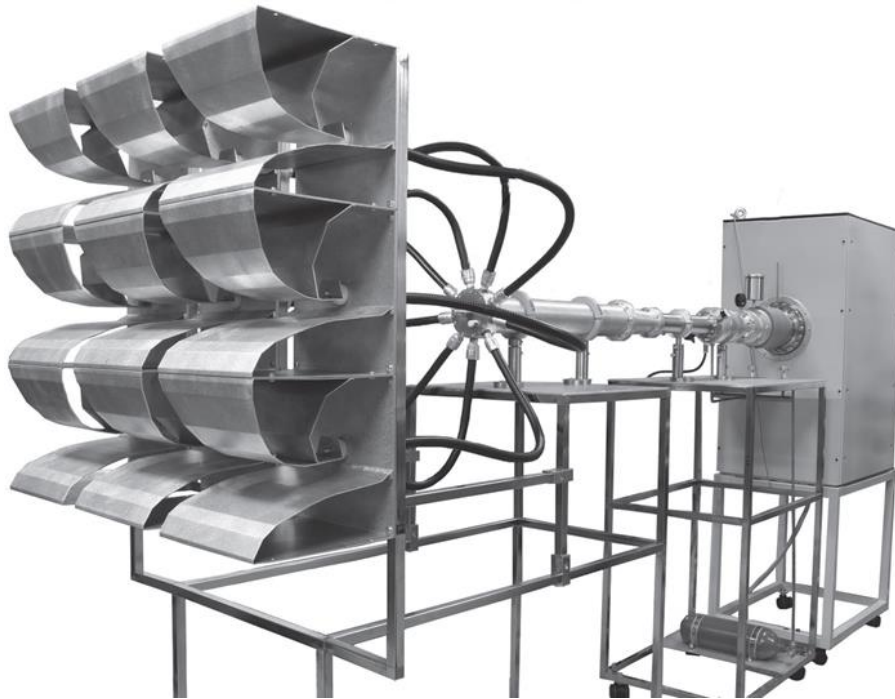


Рисунок 3.22 – Источник СШП-излучения с 9-элементной антенной решеткой

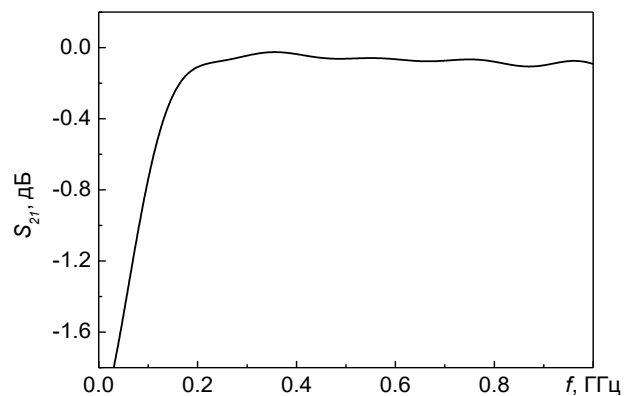


Рисунок 3.23 – Расчетная характеристика S_{21} волнового трансформатора

Было проведено численное моделирование характеристики S_{21} делителя мощности. Результаты представлены на рисунке 3.24. Расчетная характеристики S_{21} (кривая 1) близка к идеальной (кривая 2), отличия не превышают 0.01 дБ. Кривая 2 соответствует уменьшению амплитуды импульса напряжения в девятиканальном делителе мощности без потерь в 3 раза.

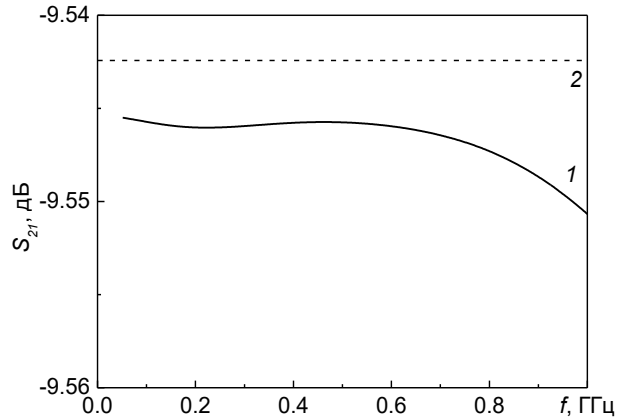


Рисунок 3.24 – Расчетная характеристика S_{21} делителя мощности (1), и характеристика идеального делителя без потерь (2)

Для соединения элементов антенной решетки с делителем мощности использовался коаксиальный кабель марки РК50-17-51 с кордельной изоляцией. Конструкция кабелей позволила закачивать внутрь фидерной системы газ SF_6 под давлением 5 атм, что увеличило ее электрическую прочность.

На рисунке 3.25 приведены осциллограмма низковольтного импульса напряжения на входе волнового трансформатора (кривая 1) и осциллограмма, усредненного по всем девяти каналам импульса напряжения на выходе делителя мощности, умноженная на 3 (кривая 2). Волновой трансформатор и делитель мощности уменьшают амплитуду первого лепестка импульса на 4%. В остальном форма импульса остается практически без изменений.

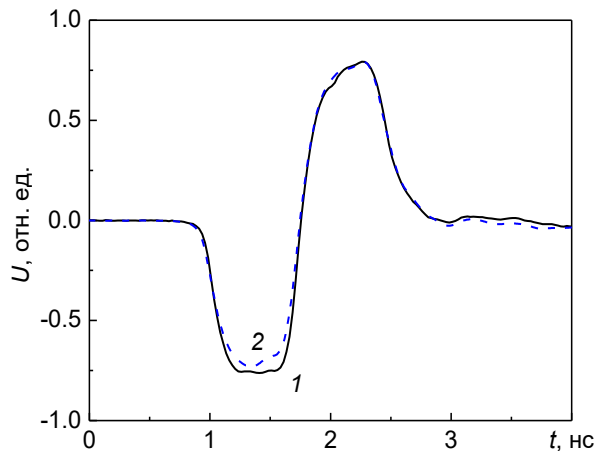


Рисунок 3.25 – Импульсы на входе (1) и на выходе (2) 9-канального делителя мощности

В решетке, как и в описанном выше источнике, используются антенны КА2, только теперь они объединены в вертикальные секции по три элемента в каждой. Соседние элементы в

вертикальной секции гальванически связаны между собой. Расстояние между секциями равно 60 мм. Апертура решетки составляет $102 \times 90 \text{ см}^2$. При амплитуде биполярного импульса напряжения $\sim 100 \text{ кВ}$ эффективный потенциал излучения составил $\sim 1.1 \text{ МВ}$ (Рисунок 3.26). Эффективность излучателя по пиковой напряженности поля $rE_p/U_g = 10$.

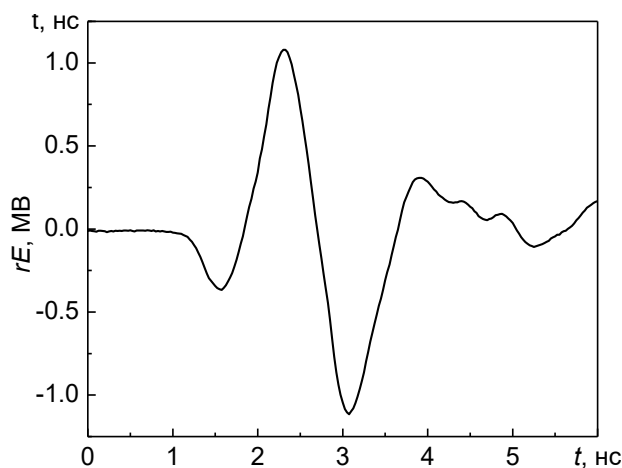


Рисунок 3.26 – Осциллограмма импульса излучения источника с 9-элементной антенной решеткой

3.3.3 Решетки, возбуждаемые биполярным импульсом напряжения длительностью 1 нс

На рисунке 3.27 приведена 16-элементная решетка (4×4) [91], [80]. Элементами решетки служили антенны КА1-2. В отличие от описанных выше эта решетка представляет собой 16 гальванически не связанных между собой элементов, закрепленных на диэлектрической пластине на одинаковых расстояниях друг от друга в вертикальном и горизонтальном направлениях. Расстояние между центрами соседних элементов равно 18 см. Крепление элементов решетки дает возможность поворачивать их на 90° , что позволяет излучать импульсы не только с вертикальной поляризацией (Рисунок 3.28 а), но и с взаимно перпендикулярными векторами поляризации (Рисунок 3.28 б, в). Направление поляризации электрического поля показано на рисунках стрелками. Обозначим антенные решетки на рисунке 3.28 а–в соответственно АР1–АР3. Элементы решетки с разной поляризацией возбуждались с относительной задержкой 2 нс обеспечиваемой с помощью кабельных фидеров с полиэтиленовой изоляцией разной длины.

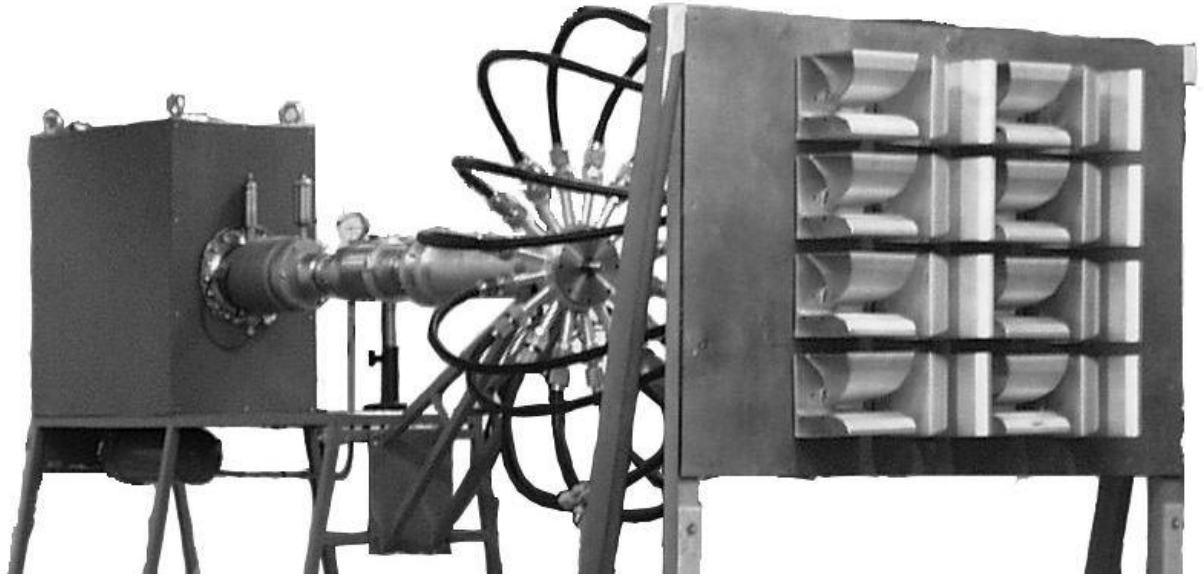


Рисунок 3.27 – Источник СШП-излучения с 16-элементной антенной решеткой

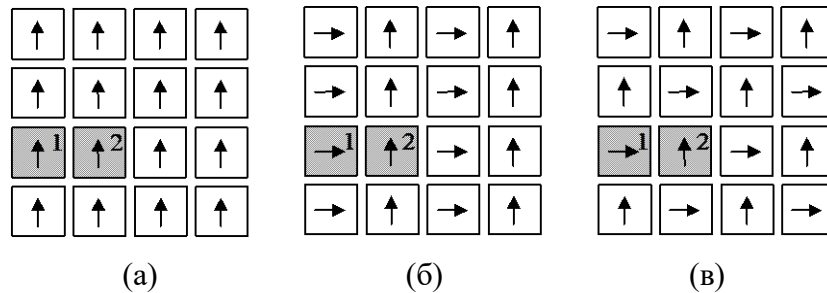


Рисунок 3.28 – Варианты расположения элементов в решетке

ДН решеток в E - и H - плоскостях для вертикально (а, б, г) и горизонтально (в) поляризованного электрического поля по пиковой мощности приведены на рисунке 3.29. Для всех исследованных решеток ДН в E - и H - плоскостях симметричны (Рисунок 3.29 а, в, г), а их ширина по уровню половинной мощности составляет $\approx 20^\circ$. Для решетки типа (б) у подрешетки с вертикальной поляризацией максимум диаграммы в H -плоскости смещен на $\Delta\varphi \approx 2.5^\circ$ (Рисунок 3.29 б). Это смещение также обусловлено взаимодействием элементов в решетке. На рисунке 3.30 приведены варианты конфигурации решетки типа (б). Соответствующее смещение в H -плоскости максимума ДН для подрешетки с вертикальной поляризацией равно 2.5° для конфигураций на рисунке 3.30 а и 3.30 б и -2.5° для конфигурации на рисунке 3.30 в. Смещение ДН для решетки типа (б) и уменьшение E_p для решетки типа (в) объясняется переизлучением в противофазе поля, наведенного на соседних перпендикулярно ориентированных элементах. Отметим, что для решетки типа (б) для обеих поляризаций существенно возрастает уровень бокового излучения (Рисунок 3.29 б, в), что затрудняет ее применение. Решетка типа (в) характеризуется низким уровнем бокового излучения (Рисунок 3.29 г), а также совпадением максимумов диаграмм в двух плоскостях для обеих поляризаций, что делает ее более приемлемой

для формирования разнесенных по времени волновых пучков с ортогональными поляризациями. Недостатком этой решетки является более низкая энергетическая эффективность.

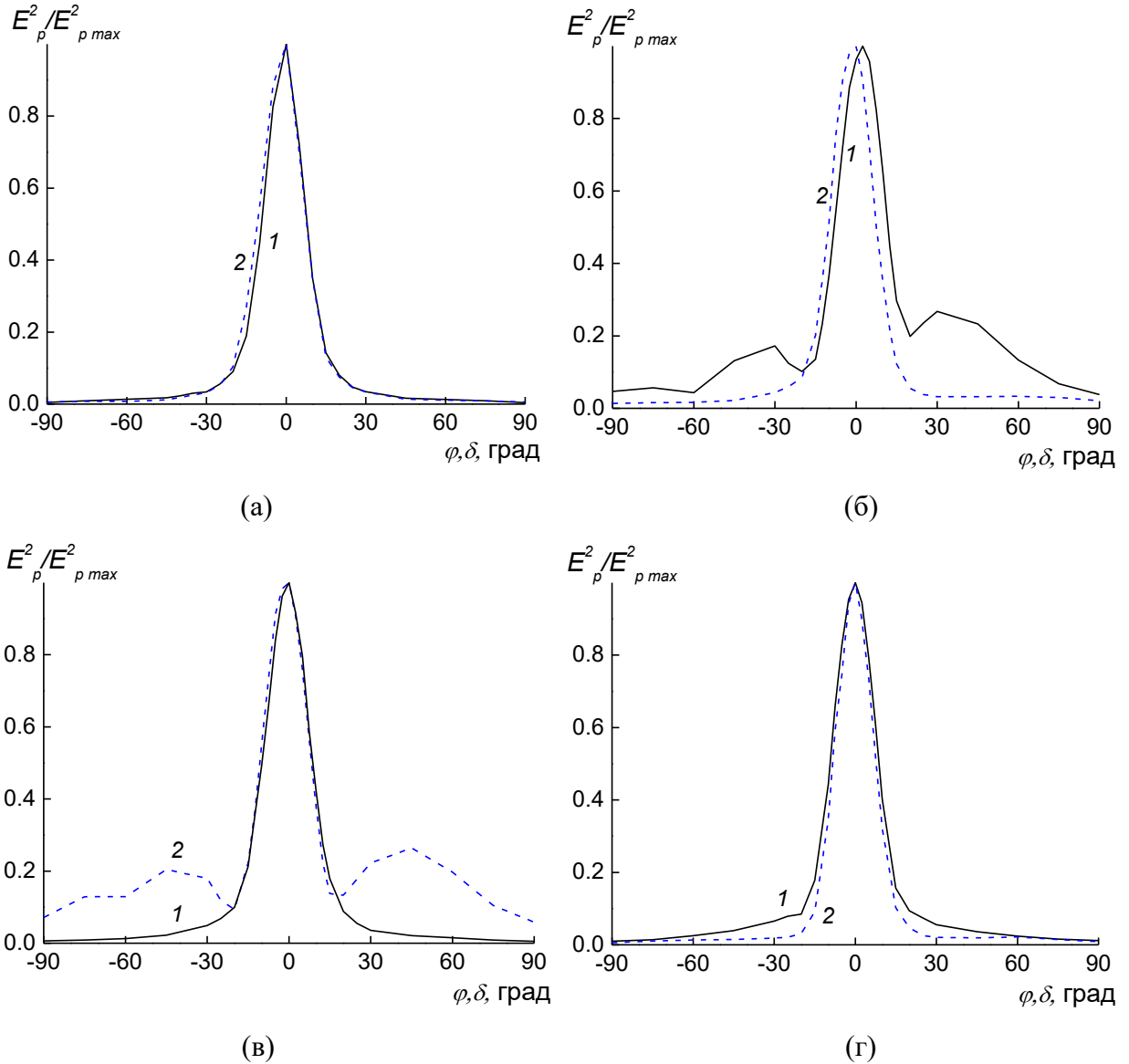


Рисунок 3.29 – ДН решеток в двух плоскостях для различных поляризаций: а – решетка (а) с вертикальной поляризацией, б – решетка (б) с вертикальной поляризацией, в – решетка (б) с горизонтальной поляризацией, г – решетка (в) с вертикальной поляризацией; кривые 1 – H -плоскость, кривые 2 – E -плоскость

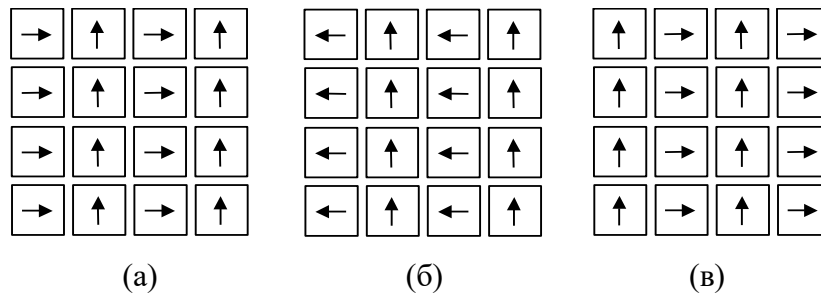


Рисунок 3.30 – Варианты конфигурации решетки типа (б) (Рисунок 3.28)

Решетка возбуждалась высоковольтным биполярным импульсом длительностью 1 нс и амплитудой 200 кВ. На рисунке 3.31 приведены характерные осциллограммы излученных решеткой типа AP2 импульсов с вертикальной и горизонтальной поляризацией и разнесенных по времени на 2 нс.

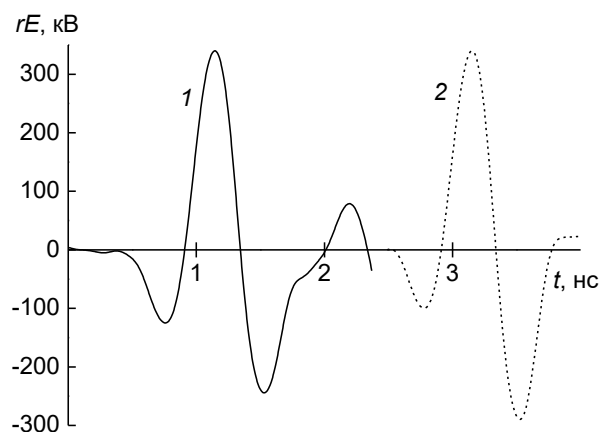


Рисунок 3.31 – Осциллограммы излученных решеткой типа AP2 импульсов с вертикальной (1) и горизонтальной (2) поляризацией электрического поля

В таблице 4 приведены амплитуды биполярных импульсов на входе элементов решетки U и эффективные потенциалы rE_p для различных типов решеток. Увеличение амплитуд биполярного импульса в случае варианта решетки AP2 обусловлено изменением режима работы ФБИ. При этом длительность импульса уменьшилась на $\sim 10\%$.

Таблица 4 Параметры импульсов напряжения и излучения решетки

Тип решетки	U , кВ	Вертикальная поляризация, rE_p , кВ	Горизонтальная поляризация, rE_p , кВ
AP1	+44/-33	+780/-600	–
AP2	+55/-40	+340/-240	+340/-280
AP3	+44/-33	+320/-260	+290/-220

Для увеличения эффективного потенциала излучения была разработана 64-элементная (8×8) решетка (Рисунок 3.32) [81]. В качестве элемента решетки использовалась антенна КА1-3. Элементы располагались на одинаковом расстоянии по вертикали и горизонтали на сплошной металлической пластине. Расстояние между центрами элементов равно 0.18 м. Апертура решетки составила $1.41 \times 1.41 \text{ м}^2$. Это позволяло измерять ДН в двух плоскостях при повороте элементов решетки на 90 градусов.



Рисунок 3.32 – 64-элементная решетка

Для передачи биполярного импульса напряжения от генератора к элементам антенной решетки была разработана конструкция 64-канального делителя мощности с одновременной трансформацией сопротивления. Структурно 64-канальный делитель мощности состоит из трех последовательно соединенных ступеней четырехканальных делителей (1, 2 и 3 на рисунке 3.33). На входе первой ступени (1) волновое сопротивление равно волновому сопротивлению на выходе генератора биполярных импульсов 12.5 Ом. В начале плеча первой ступени делителя волновое сопротивление равно $12.5 \cdot 4 = 50$ Ом. Суммарное сопротивление фидеров 16 элементов решетки, на которое нагружено каждое плечо первой ступени, равно $50/16 = 3.125$ Ом, а суммарное сопротивление фидеров 64 элементов равно $50/64 \approx 0.78$ Ом. С целью минимизации отражений для трансформации сопротивления использовался компенсированный экспоненциальный переход, сопротивление в котором рассчитывалось по формуле (3.3).

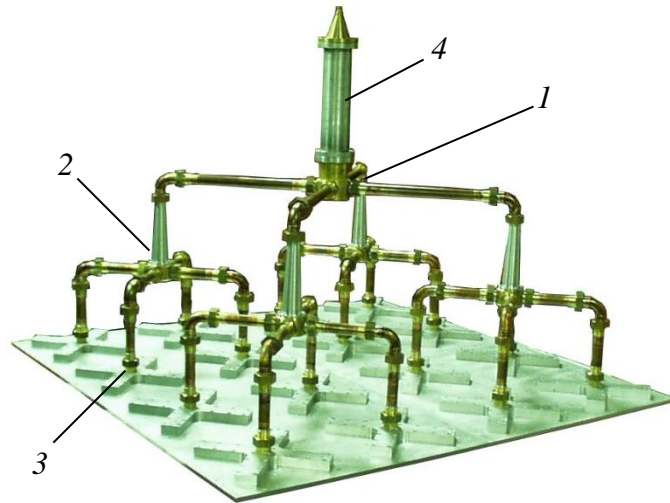


Рисунок 3.33 – 64-канальный делитель мощности

Для увеличения электрической прочности линии передачи заполнены трансформаторным маслом. Общая длина одного плеча делителя составляет 1.2 м. Для согласования входного сопротивления делителя с волновым сопротивлением измерительных приборов, использовался волновой трансформатор с 50 до 12.5 Ом (4 на рисунке 3.33) длиной 0.315 м. На рисунке 3.34 приведены нормированные осциллограммы импульсов напряжения на входе U_g и выходе U_d одного из каналов делителя. Из рисунка видно, что форма импульса искажается незначительно. А неравномерность амплитуд на выходах делителя не превышает 5%. Однако амплитуда импульса на выходе делителя в 6.5 раз меньше амплитуды на входе, тогда как в идеальном случае она должна уменьшаться в 4 раза. В основном это связано с потерями в диэлектрике. Оценки показывают, что потери мощности в фидерной системе, включая волновой трансформатор (4 на рисунке 3.33) достигают 60% от входной мощности.

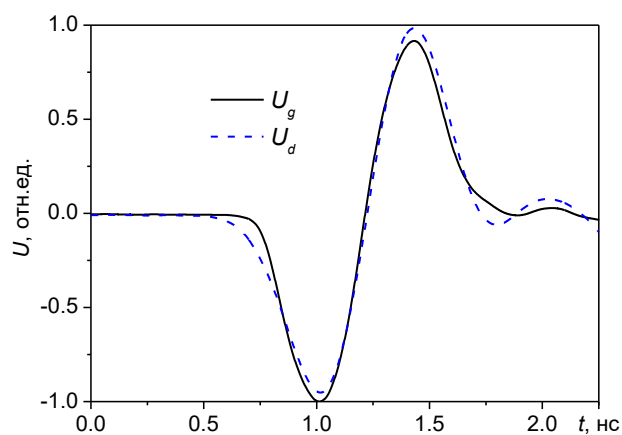


Рисунок 3.34 – Нормированные осциллограммы импульсов напряжения на входе U_g и выходе U_d 64-канального делителя мощности

В работе [92] было показано, что использование в передающей линии вакуумного масла вместо трансформаторного, приводило к уменьшению потерь мощности. Низковольтные испытания фидерной системы 64-элементной антенной решетки показали (Рисунок 3.35) [93],

что использование вакуумного масла ВМ1 позволило уменьшить потери мощности до 30%. На рисунке 3.35 приведены осциллограммы импульсов напряжения на выходе фидерной системы 64-элементной решетки при использовании трансформаторного (кривая 1) и вакуумного (кривая 2) масла. Для сравнения приведена осциллограмма импульса напряжения в предположении отсутствия потерь (кривая 3).

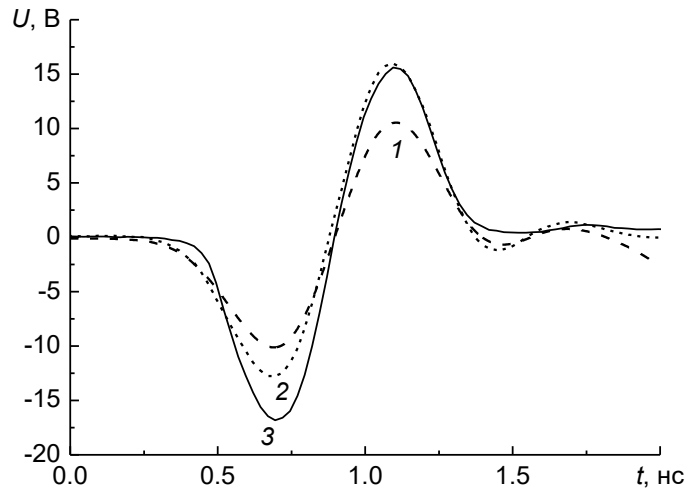


Рисунок 3.35 – Осциллограмма импульсов напряжения с одного из выходов 64-канального делителя мощности

На рисунке 3.36 приведена ДН 64-элементной решетки, измеренная на расстоянии 13 м, где характеристики излучения практически соответствуют дальней зоне. Ширина ДН на половинном уровне пиковой мощности составляет 10° в обеих плоскостях. Уровень кроссполаризованного излучения составляет менее 0.5%.

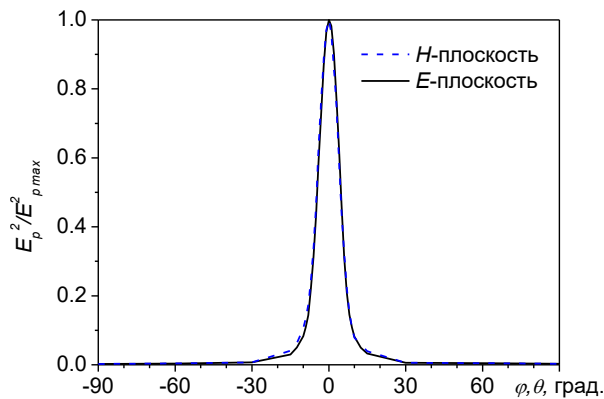


Рисунок 3.36 – ДН 64-элементной решетки в E - и H -плоскостях

Среднеквадратичное отклонение (СКО) формы импульса в пределах $\pm 5^\circ$ относительно формы импульса в главном направлении (0°) приведено на рисунке 3.37. Оно достигает на краях углового диапазона 20%. Таким образом, в пределах ширины главного лепестка ДН форма излученного импульса практически не изменяется.

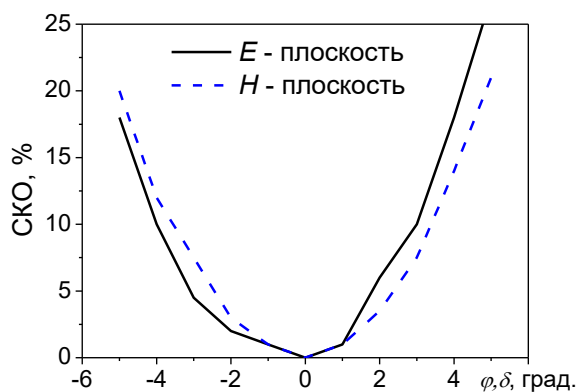


Рисунок 3.37 – Среднеквадратичное отклонение формы импульса

64-элементная решетка была использована в составе мощного источника СШП-излучения (Рисунок 3.38) [94], [95]. Решетка возбуждалась высоковольтным импульсом напряжения с амплитудами - 205 кВ и + 180 кВ и длительностью 1 нс. Излученный импульс регистрировался с помощью ТЕМ-рупора, установленного на расстоянии 10.5 м в максимуме ДН. На рисунке Рисунок 3.39 представлена осциллограмма излученного импульса. Из-за особенностей помещения, в котором проводились измерения, на импульс после штриховой линии накладываются отражения от окружающих металлических предметов. В этих измерениях произведение пиковой напряженности поля на расстояние достигало 4.1 МВ.



Рисунок 3.38 – Внешний вид источника СШП-излучения с 64-элементной решеткой

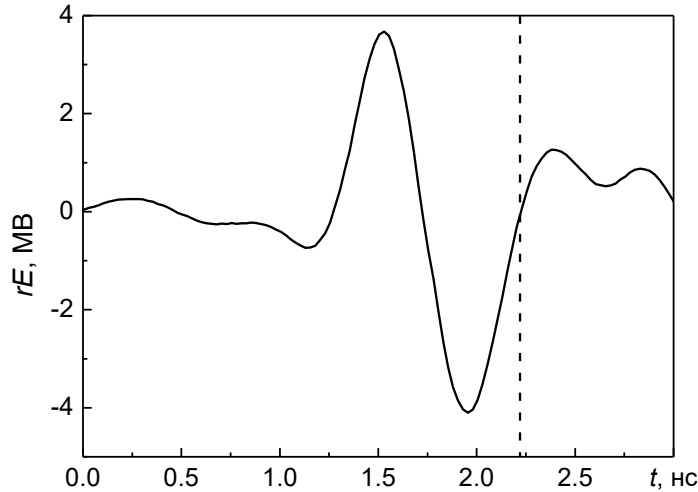


Рисунок 3.39 – Осциллограмма импульса излученного 64-элементной решеткой

Для определения эффективного потенциала излучения необходимо определить границу дальней зоны. Используя соотношение (2.5) получаем $r = 26.7$ м. Так как измерения rE_p для 64-элементной антенной решетки выполнялись на расстоянии 10.5 м, то на основе выполненных ранее исследований решетки 4×4 , возбуждаемой биполярным импульсом длительностью 2 нс [78], где выполнялся критерий $rE_p \approx const$, была проведена экстраполяция зависимости $rE_p(r)$ для 64-элементной антенной решетки вплоть до границы дальней зоны (Рисунок 3.40). На этом рисунке точками показаны результаты измерений для 64-элементной решетки [81]. Из приведенных данных следует, что эффективный потенциал излучения, определяемый в дальней зоне, превышает величину $rE_p(r = 10.5 \text{ м})$ на 5.8% и составляет $rE_p = 4.3$ МВ.

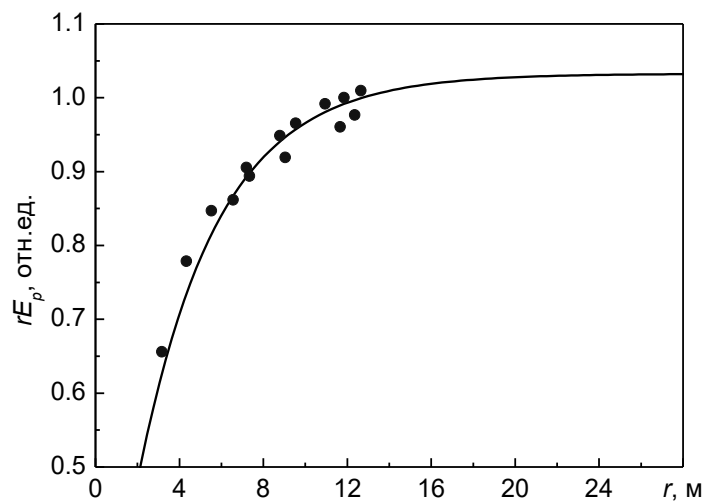


Рисунок 3.40 – Зависимости величины rE_p от расстояния r между приемной антенной и решеткой

3.3.4 Решетка, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 0.5 нс

Для источника СШП-излучения с субнаносекундной (0.5 нс) длительностью биполярных импульсов была разработана 16-элементная (4×4) решетка [96]. В качестве элементов решетки использовалась модифицированная антенна КА0.5. В отличие от одиночной антенны изолятором на входе в элемент решетки служил диэлектрик питающего кабеля (полиэтилен). Элементы решетки закреплялись на диэлектрической пластине с расстоянием между центрами элементов – 9 см. Усредненный КСВН элемента решетки приведен на рисунке 3.41 (кривая 2). Отличие от КСВН одиночной антенны (Рисунок 3.41, кривая 1) обусловлено другой конструкцией антенного входа.

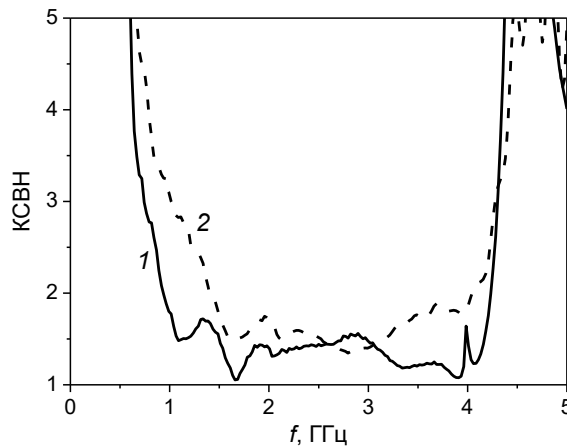


Рисунок 3.41 – КСВН одиночной антенны КА0.5 (1) и элемента решетки (2)

На рисунке 3.42 приведены ДН решетки, ширина по половинному уровню мощности составляет $\sim 20^\circ$ в обеих плоскостях. В отличие от одиночной антенны КА0.5 (Рисунок 2.36) ДН решетки симметричны в обеих плоскостях. КНД решетки в главном направлении составляет $D_0 \approx 54$, а эффективность по пиковой мощности $k_p = 0.36$. Из измерений следует, что КНД решетки примерно равен произведению КНД элемента на число элементов в решетке. Эффективность по пиковой мощности рассчитывалась в приближении, что энергетическая эффективность элемента решетки такая же, как и у одиночной антенны ($k_w = 0.9$). Отметим, что эффективность по пиковой мощности решетки меньше эффективности по пиковой мощности элемента решетки. Это обусловлено более резким изменением формы импульсов излучения решетки от угла (Рисунок 2.37). Коэффициент по пиковой напряженности поля для антенно-фидерной системы (волновой трансформатор – делитель мощности – кабельные фидеры – антенная решетка) составляет $k_E \approx 3.1$.

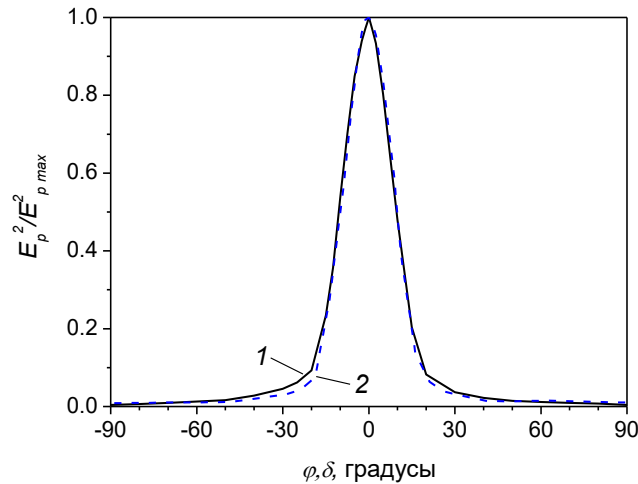


Рисунок 3.42 – ДН решетки в плоскостях H (1) и E (2)

Были проведены измерения для нахождения дальней зоны излучения решетки. Расстояние до границы дальней зоны оцененное по формуле (2.5), равно $r \approx 3$ м. На рисунке 3.43 приведена зависимость произведения rE_p от расстояния между решеткой и приемной антенной. В качестве приемных использовались антенна КА0.5 (кривая 1) и ТЕМ-антенна с апертурой 40×8 см² (кривая 2). Горизонтальный участок кривой соответствует дальней зоне. Различие в поведении кривых объясняется разницей размеров апертур антенн. Теоретическая оценка границы дальней зоны согласуется с результатами измерений с приемной комбинированной антенной. Из рисунка видно, что расстояния большие 6 м можно считать дальней зоной для ТЕМ-антенны с большой апертурой. Все измерения излучения решетки проводились с помощью ТЕМ-антенны на расстояниях более 6 м.

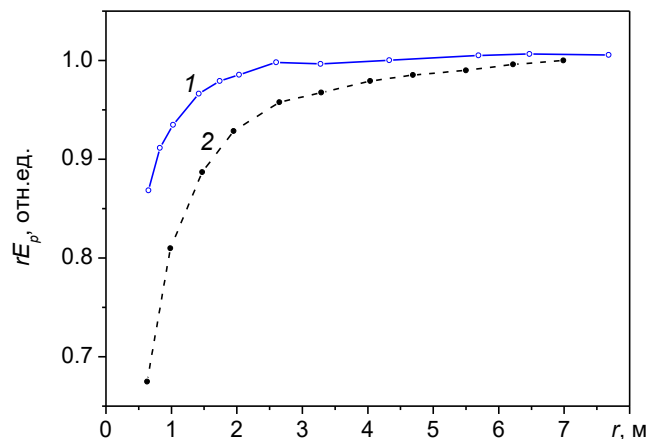


Рисунок 3.43 – Зависимость произведения rE_p от расстояния. 1 – комбинированная антенна, 2 – ТЕМ-антенна

При использовании 16-элементной решетки антенн КА0.5 в составе мощного источника СШП-излучения (Рисунок 3.44) получены электромагнитные импульсы (Рисунок 3.45) с эффективным потенциалом $rE_p = 700$ кВ.

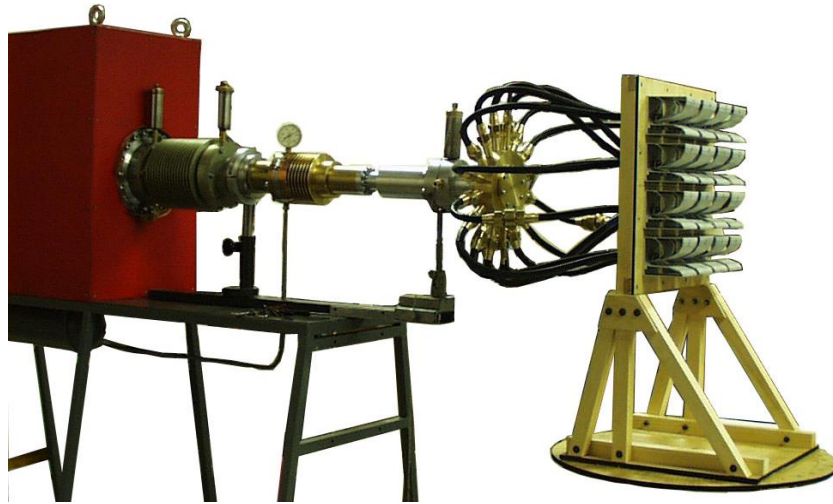


Рисунок 3.44 – Внешний вид источника СШП-излучения субнаносекундной длительности с 16-элементной решеткой

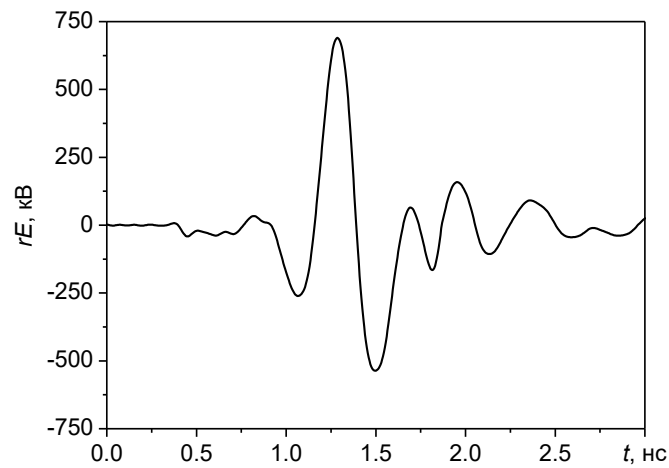


Рисунок 3.45 – Осциллограмма импульса излученного 16-элементной решеткой антенн КА0.5

3.3.5 Решетка, возбуждаемая биполярным импульсом напряжения длительностью 0.2 нс
 16-элементная (4×4) решетка для источника СШП-излучения с длительностью биполярных импульсов напряжения 0.2 нс была разработана на основе антенны КА0.2 [97], [98]. Элементы решетки объединены в вертикальные секции по четыре элемента в каждой. Соседние элементы в вертикальной секции гальванически связаны между собой. Расстояние между секциями равно 4.4 см. Апертура решетки составила $17.2 \times 16 \text{ см}^2$. В качестве фидеров использовались кабели с кордельной изоляцией.

По сравнению с антенной КА0.2 у элемента решетки была изменена конструкция ввода, что привело к ухудшению КСВН в области частот 4–6 ГГц [82] (Рисунок 3.46, кривая 1). В решетке КСВН элемента на частотах 1.5–2.5 ГГц уменьшился до ~ 1.5 , а нижняя граница по уровню КСВН = 2 сдвинулась в область низких частот с 1.38 ГГц до 1.29 ГГц (Рисунок 3.46, кривая 2). Аналогичный результат наблюдался ранее для 16-элементной решетки, возбуждаемой биполярным импульсом длительностью 2 нс.

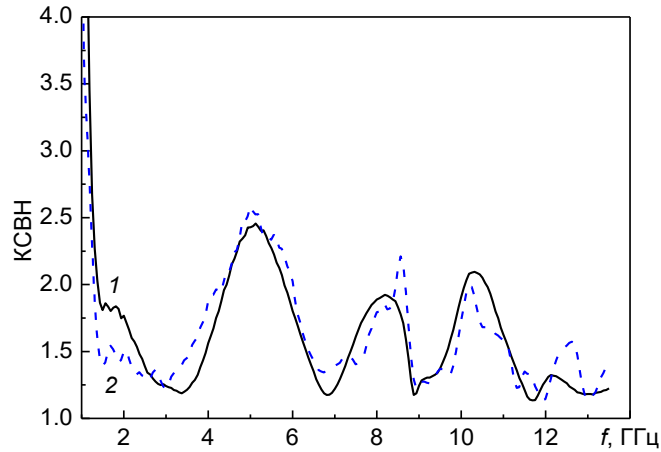


Рисунок 3.46 – Усредненный КСВН элемента вне (1) и в составе решетки (2)

Расстояние до границы дальней зоны, оцененное по формуле (2.5), $r \approx 1.9$ м. На рисунке 3.47 приведена зависимость величины rE_p от расстояния между решеткой и приемными антеннами двух типов. В качестве приемных использовались компактная комбинированная антенна, аналогичная элементу решетки, и ТЕМ-антенна. Горизонтальный участок кривой соответствует дальней зоне. Полученная оценка границы дальней зоны соответствует результатам измерений с помощью комбинированной антенны (кривая 1). Разница в поведении кривых объясняется большей апертурой ТЕМ-антенны, которая влияет на измерения при малых расстояниях. Из рисунка видно, что расстояния большие 4 м можно считать дальней зоной для ТЕМ-антенны. Все измерения проводились с помощью ТЕМ-антенны на расстояниях более 6 м.

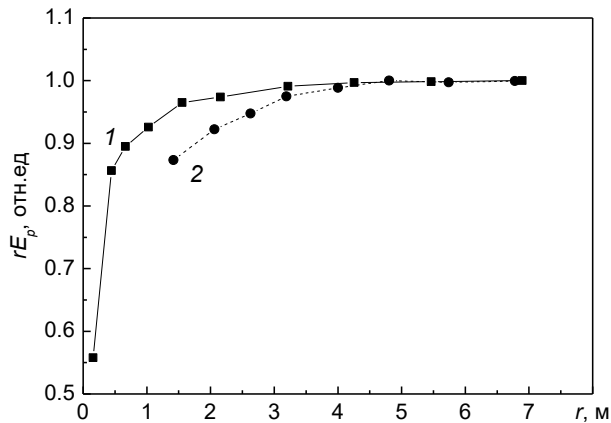


Рисунок 3.47 – Зависимость величины rE_p от расстояния до приемных комбинированной (1) и ТЕМ (2) антенн

ДН антенной решетки по пиковой мощности представлены на рисунке 3.48. Ширина ДН на полувысоте в горизонтальной H -плоскости (кривая 1, сплошная линия) равна 18° , а в вертикальной E -плоскости (кривая 2, пунктирная линия) – 20.5° . Рассчитанный по результатам низковольтных измерений коэффициент направленного действия решетки $D_0 = 50$. Эффективность по излученному полю $k_E = 3$.

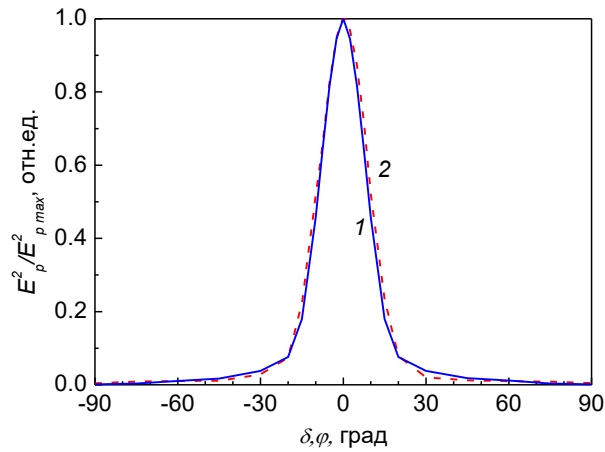


Рисунок 3.48 – ДН 16-элементной решетки по пиковой мощности в плоскостях H (1) и E (2)

Искажение формы импульса оценивалось как среднеквадратичное отклонение импульса по формуле (2.10). На рисунке 3.49 приведены зависимости среднеквадратичного отклонения формы импульса, излученного решеткой КА, от угла в H - (кривая 1) и E - (кривая 2) плоскостях. Видимое различие формы импульсов проявляется при $\sigma > 0.2$. На половинном уровне пиковой мощности излучения ($\pm 10^\circ$) величина $\sigma \approx 0.2$.

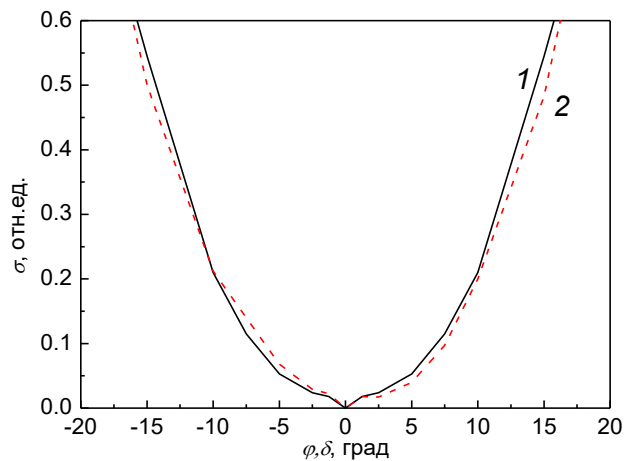


Рисунок 3.49 – Зависимость среднеквадратичного отклонения формы импульса, излученного решеткой в плоскостях H (1) и E (2), от угла

На рисунке 3.50 приведена осциллограмма импульса излученного решеткой при возбуждении биполярным импульсом напряжения с амплитудой 130 кВ и длительностью 230 пс. Эффективный потенциал излучения составил 370 кВ.

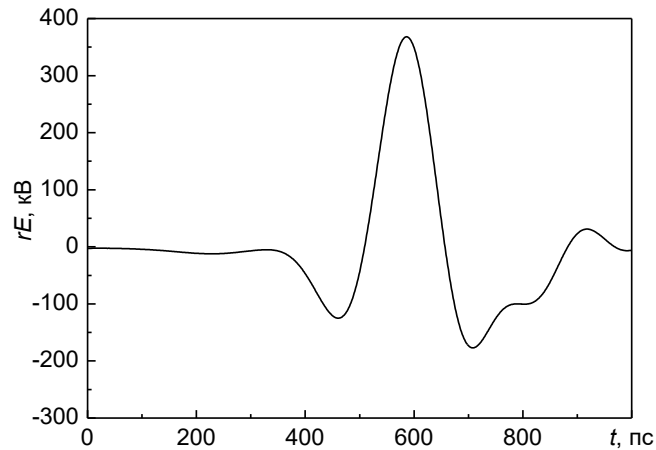


Рисунок 3.50 – Осциллограмма импульса излучения 16-элементной антенной решеткой при возбуждении высоковольтным импульсом напряжения

3.3.6 Антенно-фидерная система

В первых разработанных источниках мощного СШП-излучения для передачи импульсов напряжения к элементам решетки использовались коаксиальные кабели с полиэтиленовой изоляцией. Однако высокое напряжение и большая длительность биполярных импульсов приводили к пробое изоляции кабелей. В частности, в источнике с 16-элементной решеткой и биполярным импульсом напряжения длительностью 2 нс использовался кабель марки РК 50–17–17. Пробой происходил примерно через 1 час работы с частотой повторения импульсов 100 Гц. При этом амплитуда биполярного импульса напряжения в кабеле составляла примерно 55 кВ.

Конструкция делителя мощности для источников с 16-элементной решеткой представляет собой радиальные коаксиальные линии с волновым сопротивлением 50 Ом, расходящиеся от общей линии с сопротивлением 3.125 Ом (Рисунок 3.51). Использовать подобную конструкцию для источника с 64-элементной решеткой представляется невозможным, т.к. для размещения 64 радиальных линий пришлось бы значительно увеличить диаметр подводящей низкоомной коаксиальной линии, что привело бы к появлению высших мод и дополнительным потерям. Поэтому была использована конструкция со ступенчатым делителем мощности (Рисунок 3.33). А для увеличения электрической мощности использовали коаксиальные волноводы с масляной изоляцией. Но из-за достаточно большой общей длины маслonaполненных волноводов получили большие потери мощности.

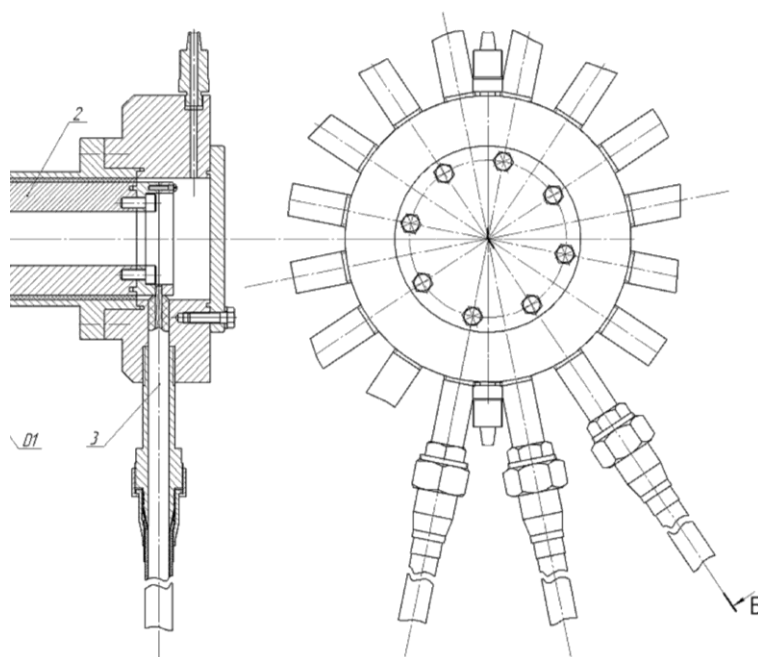


Рисунок 3.51 – Конструкция 16-канального делителя мощности

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 импульсов до 1 ГВт на частоте повторения 100 Гц.

3.4 Управление диаграммой направленности излучения

Решетки позволяют не только уменьшить ширину ДН, но и изменять направление главного лепестка ДН, осуществлять электрическое сканирование луча. В этом разделе приведены результаты исследований линейных решеток в режиме сканирования волновым пучком.

В работах [99], [100] были исследованы 4-элементные решетки, конфигурация которых приведена на рисунке 3.5. В качестве элемента решетки использовалась антенны КА1-1. Соответственно, для возбуждения решеток использовался биполярный импульс длительностью 1 нс. Импульсы напряжения поступали на вход 4-х канального делителя мощности, а затем по кабелям на антенны. В отличие от классических решеток с узкополосными сигналами сканирование лучом, в которых осуществляется изменением фазовых сдвигов сигналов на элементах решетки, для СШП-импульсов используются временные задержки. 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.

При работе решетки в режиме сканирования исследовалось изменение положения максимума ДН. Экспериментальные (сплошные кривые) и расчетные (штриховые кривые) ДН горизонтальной решетки в H -плоскости представлены на рисунке 3.52. Все ДН нормированы на максимальное значение ДН без сканирования ($F^2(\varphi=0)$), т.е. в режиме синхронного возбуждения элементов решетки. Из полученных результатов следует, что с увеличением угла сканирования уменьшается напряженность электромагнитного поля в максимуме ДН и увеличивается ширина ДН. Кроме того, появляется различие между заданным углом главного направления ДН и измеренным. Это различие не превышает 5° при заданных углах сканирования до 45° . Однако при заданном угле 60° экспериментально измеренный угол максимума ДН решетки составил 43.5° . Для расчета ДН решетки в режиме сканирования была разработана программа, моделирующая сложение импульсов излучения с учетом ДН антенн и задержек их возбуждения в решетке. Как видно из рисунка 3.52, расчетные и экспериментальные ДН хорошо согласуются за исключением ДН для заданного угла 60° .

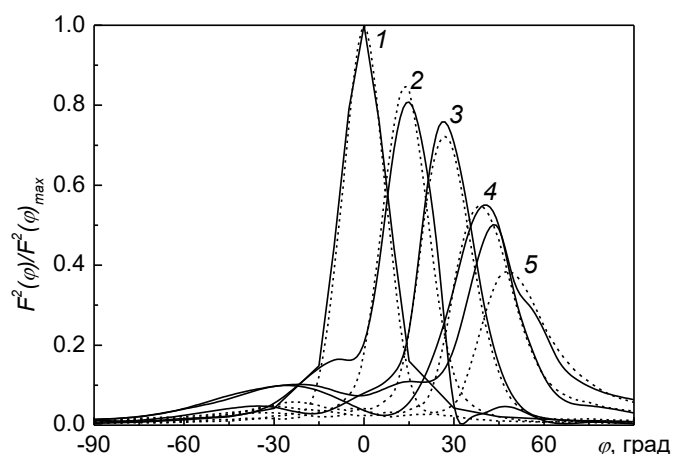


Рисунок 3.52 – Расчетные (штриховые кривые) и экспериментальные (сплошные кривые) ДН горизонтальной решетки по пиковой мощности в H -плоскости для заданных углов сканирования, равных 0° ; 15° ; 30° ; 45° ; 60° (кривые 1 – 5)

На рисунке 3.53 представлены экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) ДН вертикальной решетки по пиковой мощности в E -плоскости, соответствующие сканированию в области положительных углов места δ . Все ДН нормированы на максимальное значение $F^2(\delta=0)$ решетки без сканирования. В исследованиях вертикальной антенной решетки использован тот же набор фидеров, что и для горизонтальной решетки, но шаг вертикальной решетки меньше, чем у горизонтальной, что привело к увеличению заданных углов сканирования δ_0 . Вместо углов 15° ; 30° ; 45° ; 60° получили 17° ; $34,5^\circ$; 53° ; 79° . Как и для горизонтальной решетки, здесь с увеличением угла сканирования также уменьшается напряженность электромагнитного поля в максимуме ДН и увеличивается ширина ДН. Различие

между заданным углом главного направления диаграммы и измеренным не превышает 5° при заданных углах сканирования до 53° .

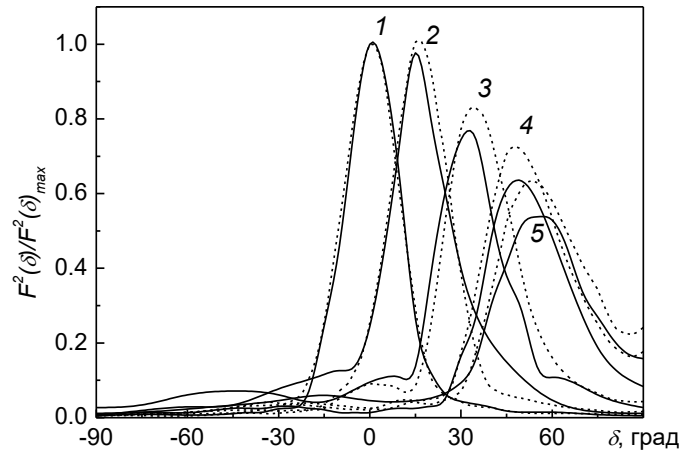


Рисунок 3.53 – Расчетные (штриховые кривые) и экспериментальные (сплошные кривые) ДН вертикальной решетки по пиковой мощности в Е-плоскости для заданных углов сканирования, равных 0° ; 17° ; $34,5^\circ$; 53° ; 79° (кривые 1 – 5)

В работах [101], [102] представлен четырехканальный источник мощных импульсов СШП-излучения с решеткой, описанной в пункте 3.3.1. Использование четырех независимых формирователей позволило провести исследования по отклонению максимума волнового пучка от нормали к решетке. Для этого у двух формирователей, возбуждающих вертикальную линейку антенн, время перехода напряжения через нуль сдвигалось на 200 или 300 пс относительно двух других формирователей. К сожалению, размеры безэховой камеры позволяли измерять фрагмент ДН шириной не более 20° . Также был проведен расчет ДН решетки. На рисунке 3.54 приведены ДН решетки с синхронным возбуждением элементов. Видно, что и расчетная и экспериментальные ДН хорошо согласуются.

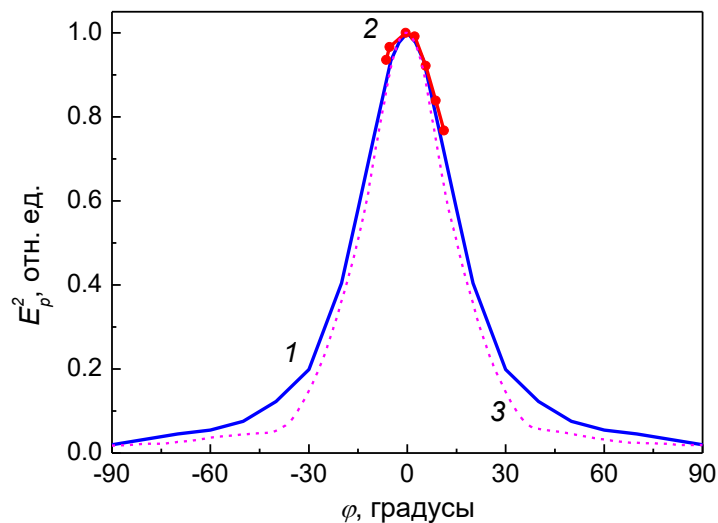


Рисунок 3.54 – ДН решетки 2×2 , измеренные на низком (1) и высоком (2) напряжениях, и расчетная (3)

На рисунке 3.55 приведены ДН решетки с задержкой возбуждения двух элементов на 200 пс. Здесь экспериментальные (кривая 1) и расчетные (кривая 2) максимумы ДН согласуются и угол отклонения равен 5.5° . Однако, при задержке возбуждения двух элементов на 300 пс (Рисунок 3.56) положение максимумов экспериментальной (кривая 1, 12°) и расчетной (кривая 2, 8°) ДН отличается. Возможно, это связано с изменением длительности первого полупериода импульса напряжения, возбуждавшего элементы решетки, что не учитывалось в расчетах.

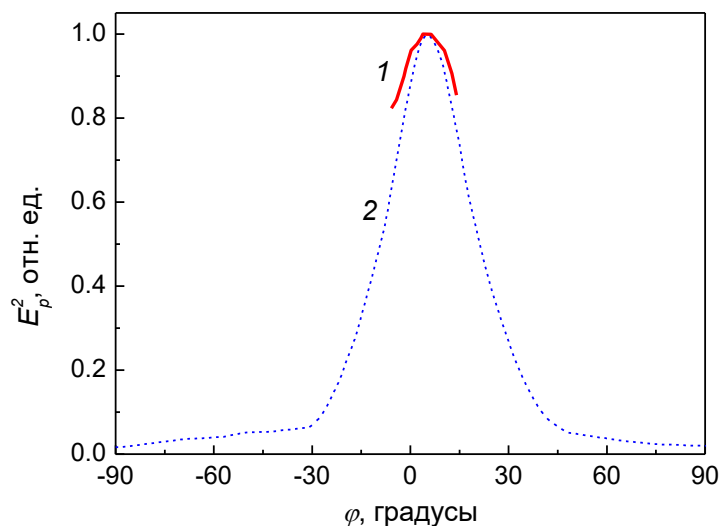


Рисунок 3.55 – Экспериментальная (1) и расчетная (2) ДН решетки 2×2 с задержкой возбуждения двух элементов на 200 пс

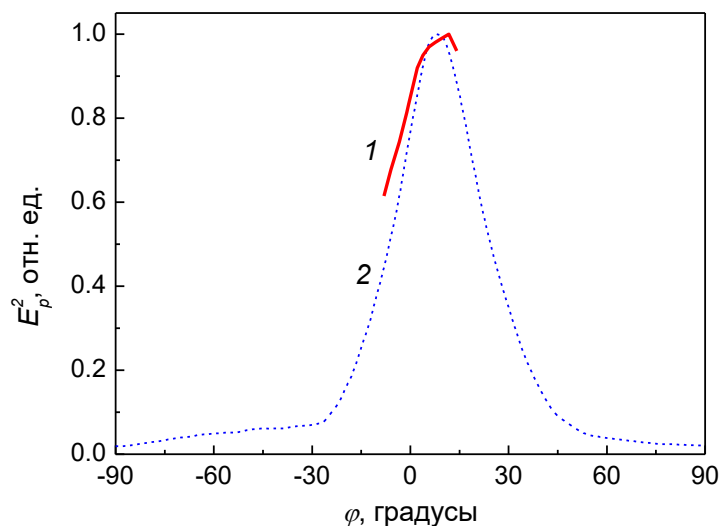


Рисунок 3.56 – Экспериментальная (1) и расчетная (2) ДН решетки 2×2 с задержкой возбуждения двух элементов на 300 пс

3.5 Предельный эффективный потенциал излучения (сравнительные оценки характеристик антенн и решеток)

В работе [103] была получена формула для оценки предельного эффективного потенциала излучения:

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

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.

Представляет интерес [63] сравнить одиночные антенны IRA [25], HIRA [28], ТЕМ [104], КА и решетки КА по выбранному критерию. Ниже будут рассмотрены решетки КА 2×2 , возбуждаемые биполярным импульсом длительностью 3 нс, решетки КА 4×4 и 3×3 , возбуждаемые биполярным импульсом длительностью 2 нс, решетки КА 4×4 и 8×8 , возбуждаемые биполярным импульсом длительностью 1 нс, а также решетки КА 4×4 , возбуждаемые биполярными импульсами длительностью 0.5 нс и 0.2 нс. Оценивались: энергия и спектр излучения для IRA и HIRA (в таблице 5 скобках приведены оценки энергии электрических импульсов на входе антенн), а также энергия и спектр импульса напряжения на входе ТЕМ и КА. В последнем случае полагали эффективность антенн по энергии равной 100%. Полоса частот оценивалась по уровню -10 дБ, а ω_0 выбиралось как среднее значение в этой полосе. Ширина спектра для исследуемых антенн находилась в пределах 100–200%.

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 5 приведены исходные данные и результаты расчетов: τ_p – длительность биполярного импульса напряжения, W – полная излученная энергия, f_L и f_H – верхняя и нижняя граничные частоты спектра импульса излучения, a – радиус минимальной сферы, в которую помещается антенна или решетка, U_{gmax} – максимальное значение напряжения импульса на входе антенны/решетки, rE_p – измеренный эффективный потенциал излучения.

Коэффициент эффективности rE_{exp}/rE_{θ} для одиночных антенн IRA, HIRA, ТЕМ и КА равен соответственно 0.5, 0.45, 0.35 и 0.26. 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. Результаты полученных оценок эффективности rE_{exp}/rE_{θ} приведены также на рисунке 3.57.

В таблице 5 приведены также оценки эффективности по пиковой напряженности поля $k_E = rE_p / U_{g\ max}$ и по площади $k_S = rE_p / S$, где S – площадь апертуры антенны/решетки. Здесь $k_E = 21.5$ 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 5 Параметры антенн и решеток

	КА	IRA [25]	HIRA [28]	TEM [104]	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

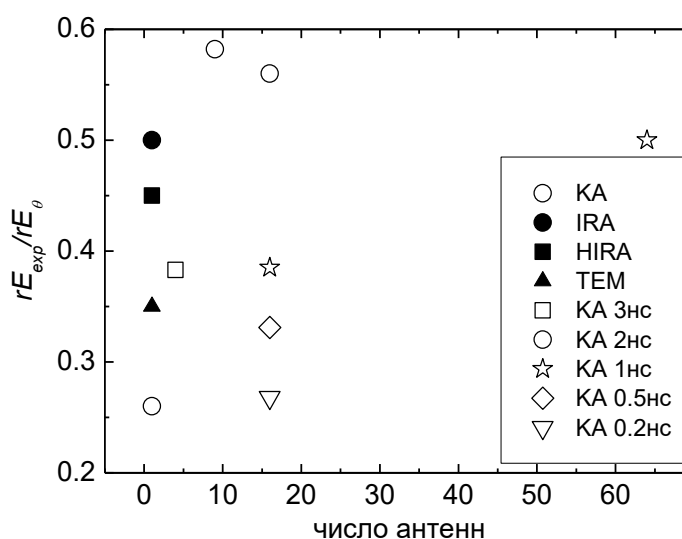


Рисунок 3.57 – Зависимость отношения измеренного эффективного потенциала к предельному в зависимости от количества КА в решетке

3.6 Выводы

При возбуждении решетки КА биполярным импульсом напряжения с точки зрения получения максимального эффективного потенциала оптимальным является использование равноамплитудного распределения.

Для решеток КА замыкание элементов в вертикальной плоскости приводит к уменьшению отраженной от входа элемента энергии.

Нижняя граница полосы согласования элемента решетки сдвигается в сторону низких частот по сравнению с нижней границей полосы согласования одиночной антенны.

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.

При близких значениях эффективных потенциалов излучения (~ 500 КВ) источников [64] и [17] значение энергии, используемой для генерации биполярного импульса в СШП-источнике [64], уменьшена в четыре раза по сравнению с источником [17]. Это достигнуто благодаря увеличению эффективности по полю используемых КАЗ в 2.2 раза по сравнению с антенной на основе комбинации электрического монополя и магнитного диполя, а также оптимальной компоновке решетки и уменьшению времени перепада напряжения биполярного импульса в 1.5 раза.

В решетках с элементами, повернутыми на 90° относительно друг друга и излучающих импульсы с взаимно перпендикулярными векторами поляризации, для получения диаграмм направленности с максимумом на оси, перпендикулярной плоскости решетки элементы с одинаковой ориентацией следует располагать по диагоналям.

Для подвода импульсов напряжения к элементам решетки оптимальным с точки зрения уменьшения потерь мощности при достаточной электрической прочности оказалось использование кордельных кабелей, заполненных газом SF_6 под давлением 5 атм.

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

Относительные эффективные потенциалы мощных источников СШП-излучения на основе решеток КА и одиночных широкоапертурных отражательных антенн типа IRA и HIRA сопоставимы. При этом отношение эффективного потенциала излучения к площади апертуры, при одинаковой длительности СШП-импульса ~ 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 антенн.

4. СИНТЕЗ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Предложен и реализован способ расширения спектра импульса излучения путем сложения электромагнитных импульсов в свободном пространстве при возбуждении прямоугольных решеток комбинированных антенн биполярными импульсами напряжения разной длительности.

4.7 Моделирование сложения в свободном пространстве импульсов излучения

Ширина спектра СШП электромагнитных импульсов определяется характеристиками излучателя и возбуждающего импульса напряжения. Рассмотрим увеличение ширины спектра синтезированного импульса на примере импульсов, излучаемых разработанными ранее КА, возбуждаемыми биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс. Для моделирования импульса, излученного КА, используем производную суммы двух гауссовых функций (3.1). В работе [105] показано, что формула (3.1) достаточно хорошо моделирует реальные импульсы $E(t)$, излученные комбинированными антеннами, и их спектры $S(f)$. Импульсы, рассчитанные по формуле (3.1), приведены на рисунке 4.1 а, а их спектры показаны на рисунке 4.1 б.

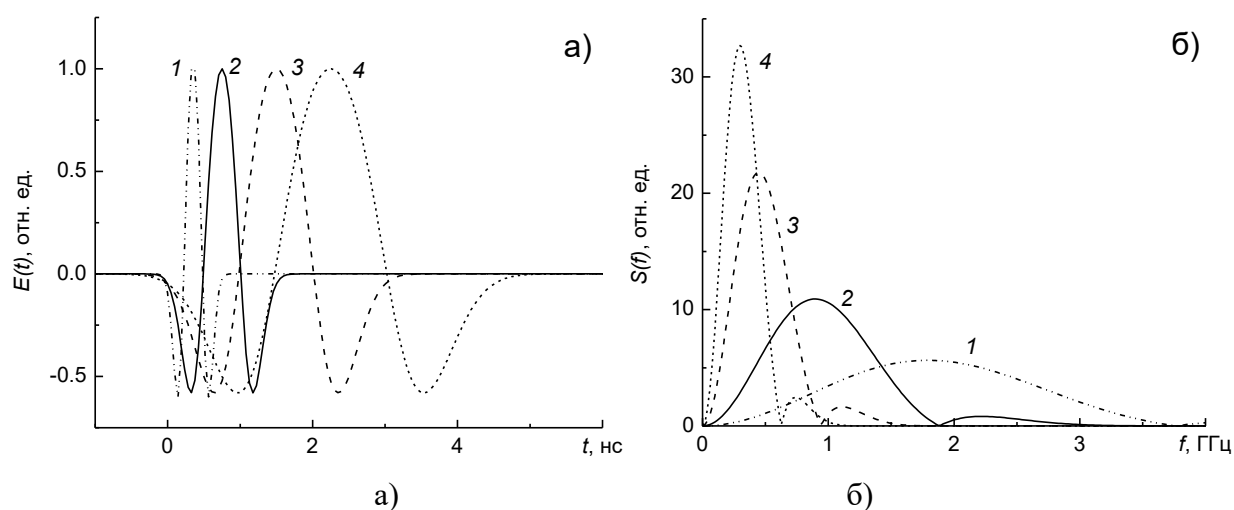


Рисунок 4.1 – Импульсы излучения (а) при возбуждении антенн биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 нс (1), 1 нс (2), 2 нс (3) и 3 нс (4) рассчитанные по формуле (3.1) и их спектры (б)

При сложении импульсов излучения результат определяется как характеристиками импульсов, так и их временными задержками относительно друг друга. Таким образом, изменяя задержку между импульсами излучения с разной длительностью (шириной спектра) можем получать импульсы с разными характеристиками: длительностью, амплитудой и шириной спектра.

Будем оптимизировать синтезированный импульс по двум параметрам: максимальной амплитуде поля и максимальной ширине спектра. Заметим, что спектр импульса можно характеризовать следующими параметрами:

- 1) ширина спектра $\Delta f = f_H - f_L$, где f_L – нижняя, а f_H – верхняя граничные частоты спектра излучения по уровню -10 дБ;
- 2) относительная ширина спектра $\Delta f / f_0$, где $f_0 = (f_H + f_L) / 2$ – средняя частота спектра излучения;
- 3) отношение верхней и нижней граничных частот $b = f_H / f_L$.

Первоначально рассмотрим сложение электромагнитных импульсов при возбуждении антенн биполярными импульсами длительностью 2 и 3 нс ([106], [107]). Для анализа характеристик синтезированного импульса построим зависимости пиковой напряжённости поля и ширины спектра по уровню -10 дБ от задержки между импульсами (Рисунок 4.2).

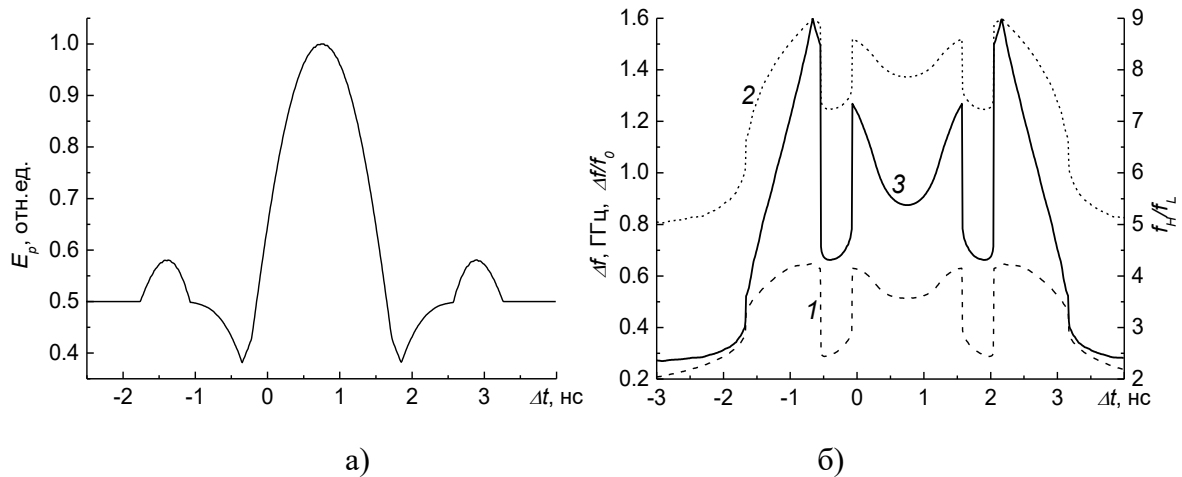


Рисунок 4.2 – Зависимость пиковой напряжённости поля (а) и зависимости спектра суммарного импульса по уровню -10 дБ (б) от задержки между импульсами. 1 – ширина спектра $\Delta f = f_H - f_L$, 2 – относительная ширина спектра $\Delta f / f_0$, 3 – отношение верхней и нижней граничных частот $b = f_H / f_L$

Максимальная пиковая напряжённость поля реализуется при задержке $\Delta t = 0.76$ нс, соответствующей синхронизации амплитуд импульсов (Рисунок 4.3). При этом амплитуды импульсов складываются, но отношение верхней и нижней граничных частот суммарного импульса по сравнению с импульсами, излученными при возбуждении антенн биполярными импульсами длительностью 2 и 3 нс, увеличивается незначительно, примерно на 10%.

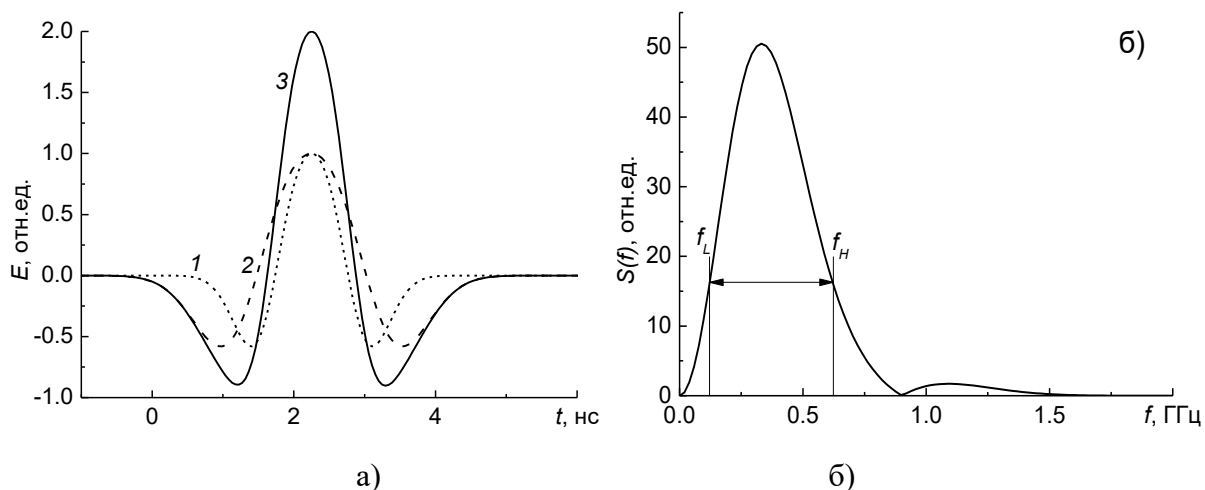


Рисунок 4.3 – Синхронизация импульсов по максимуму амплитуды. а) 1 – импульс излучения при возбуждении антенны биполярным импульсом длительностью 2 нс, 2 – импульс излучения при возбуждении антенны биполярным импульсом длительностью 3 нс, 3 – суммарный импульс излучения. б) спектр суммарного импульса излучения

Из рисунка 4.2 (б) видно, что для всех трех параметров, характеризующих спектр импульса, максимальные значения приходятся на задержки -0.66 и 2.16 нс. На рисунке 4.4 приведен суммарный импульс для задержки $\Delta t = -0.66$ нс и его спектр. По сравнению с одиночным импульсом отношение верхней и нижней граничных частот суммарного импульса увеличилось в 1.85 раза и составило более трех октав. При этом амплитуда поля суммарного импульса уменьшилась по отношению к амплитуде исходных импульсов излучения на 7%.

В таблице 6 приведены частотные характеристики для одиночных импульсов (Рисунок 4.1) и суммарных импульсов для задержек 0.76 и -0.66 нс (Рисунок 4.3 и Рисунок 4.4). Из таблицы видно, что большой вклад в расширение полосы суммарного импульса с задержкой $\Delta t = -0.66$ нс вносит сдвиг нижней граничной частоты f_L до 83.5 МГц.

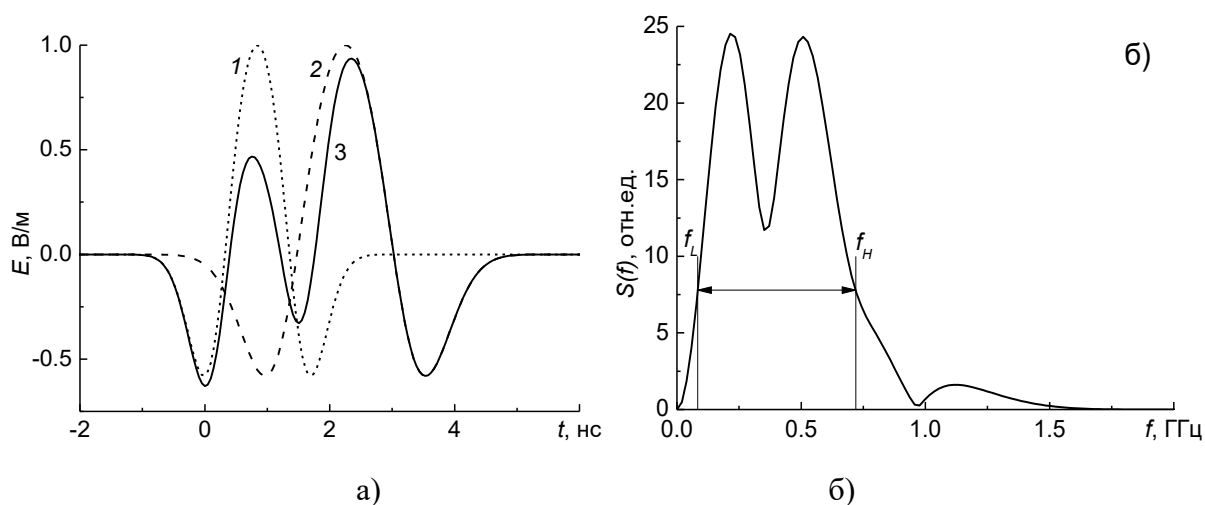
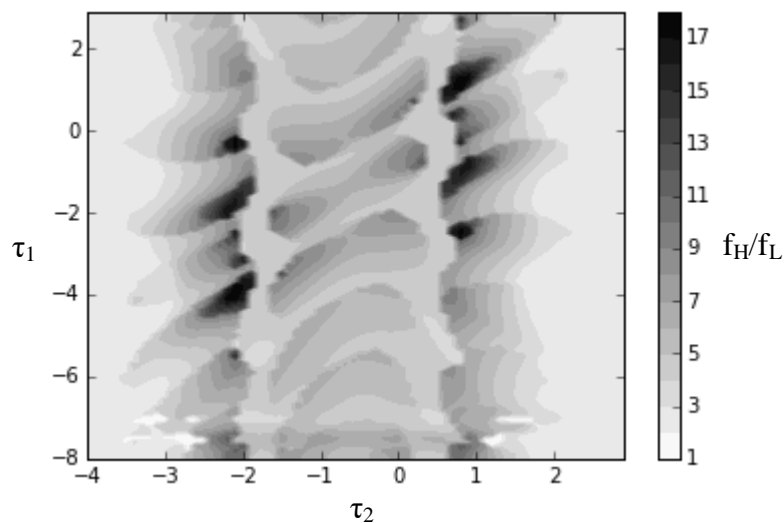


Рисунок 4.4 – Сложение импульсов с задержкой -0.66 нс. а) 1 – импульс излучения при возбуждении антенны биполярным импульсом длительностью 2 нс, 2 – импульс излучения при возбуждении антенны биполярным импульсом длительностью 3 нс, 3 – суммарный импульс излучения. б) спектр суммарного импульса излучения

Таблица 6 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, 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, по максимуму амплитуды	0.124	0.766	0.445	0.612	1.37	6.18
0.5+1+2+3 нс, по макс. ширине спектра (Basin-Hopping)	0.084	1.728	0.906	1.64	1.81	20.47
0.5+1+2+3 нс, по макс. ширине макс. спектра (перебор)	0.081	1.78	0.93	1.7	1.83	22

Для того, чтобы найти оптимальные, с точки зрения отношения граничных частот спектра, задержки для случая сложения трех импульсов 1 нс, 2 нс и 3 нс был построен рельеф функции $b(\tau_1, \tau_2) = f_H/f_L$, где τ_1 и τ_2 – задержки импульсов 1 нс и 2 нс относительно импульса 3 нс (Рисунок 4.5). Из рисунка видно, что в некоторых случаях отношение крайних частот достигает 17, что составляет перекрытие по частоте более 4 октав. На рисунке Рисунок 4.6 и в таблице 6 приведены результаты сложения импульсов 1 нс, 2 нс и 3 нс с задержками $\tau_1 = -4$ нс и $\tau_2 = -2.2$ нс. Отношение граничных частот для спектра этого импульса составило 17.05.

Рисунок 4.5 – Рельеф функции $b(\tau_1, \tau_2) = f_H/f_L$

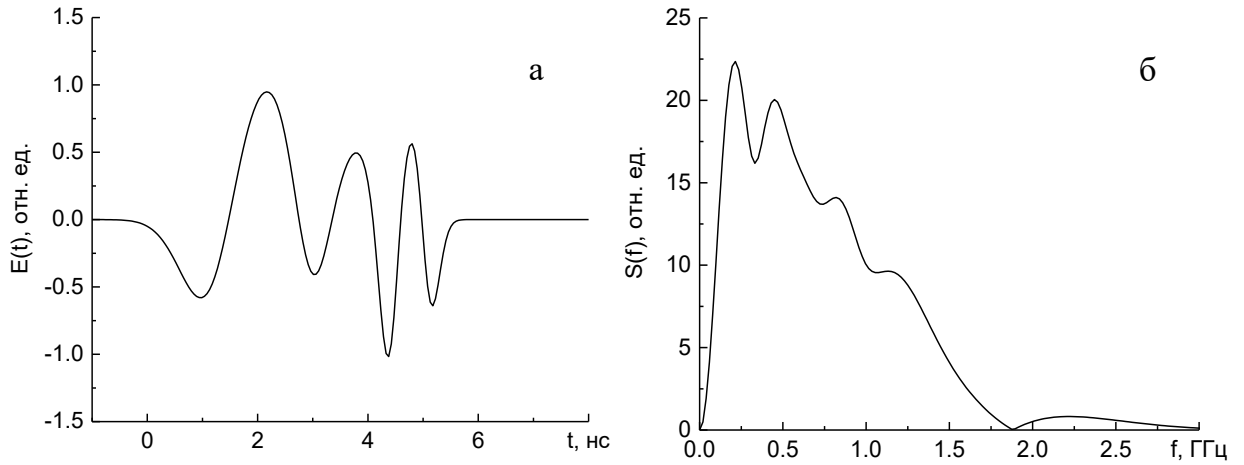


Рисунок 4.6 – Форма импульса, полученного путем сложения импульсов 1 нс, 2 нс и 3 нс с задержками -4 нс и -2,2 нс (а), и его спектр (б)

Рассмотрим сложение электромагнитных импульсов при возбуждении антенн биполярными импульсами длительностью 0.5, 1, 2, 3 нс. В случае четырех импульсов с разной длительностью мы имеем дело с тремя задержками, поэтому визуальное отображение и анализ результатов становятся затруднительными. В этой связи была написана программа для расчета и отображения зависимости ширины спектра от задержек (Рисунок 4.7), которая позволяет в трехмерном массиве значений $b(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = f_H/f_L$ выбирать сечения по одной из задержек.

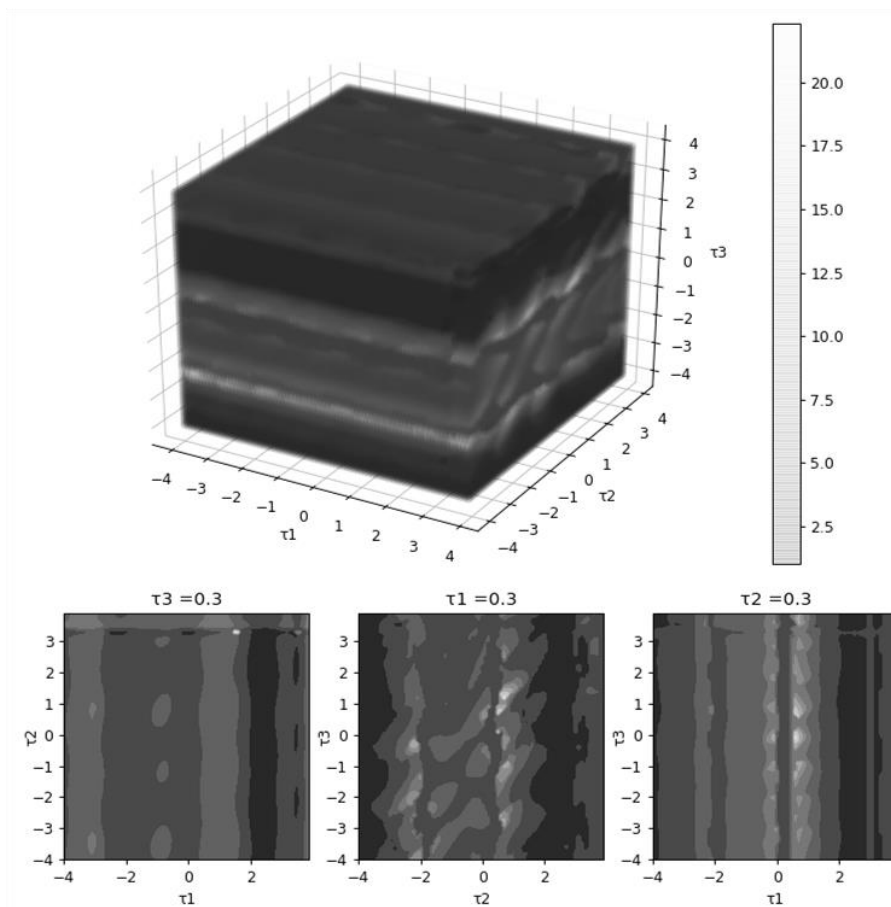


Рисунок 4.7 – Скриншот окна программы для визуализации зависимости отношения верхней и нижней граничных частот $b(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = f_H/f_L$ от временных задержек

Анализ массива значений $b(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = f_H/f_L$ показал, что он имеет сложную структуру с множеством локальных экстремумов. Использование методов оптимизации Basin–Hopping [108], дифференциальной эволюции [109], SHG (simplicial homology global optimization) [110] не позволило гарантированно находить глобальный максимум. Максимум ширины спектра находили методом перебора (равномерного поиска). Шаг перебора задержек был выбран равным 0.05 нс, т.к. это соответствует временной нестабильности источника высоковольтных импульсов. На рисунке 4.8 показан результат сложения импульсов с задержками, найденными методом Basin–Hopping, а на рисунке 4.9 – результат сложения импульсов с задержками, найденными методом перебора с шагом 0.05 нс. Уже с таким шагом метод перебора показал результат лучше, чем метод Basin–Hopping. По сравнению с одиночным импульсом отношение верхней и нижней граничных частот суммарного импульса увеличилось в 4.7 раза. В Таблице 6 приведены частотные характеристики для суммарных импульсов при различных задержках.

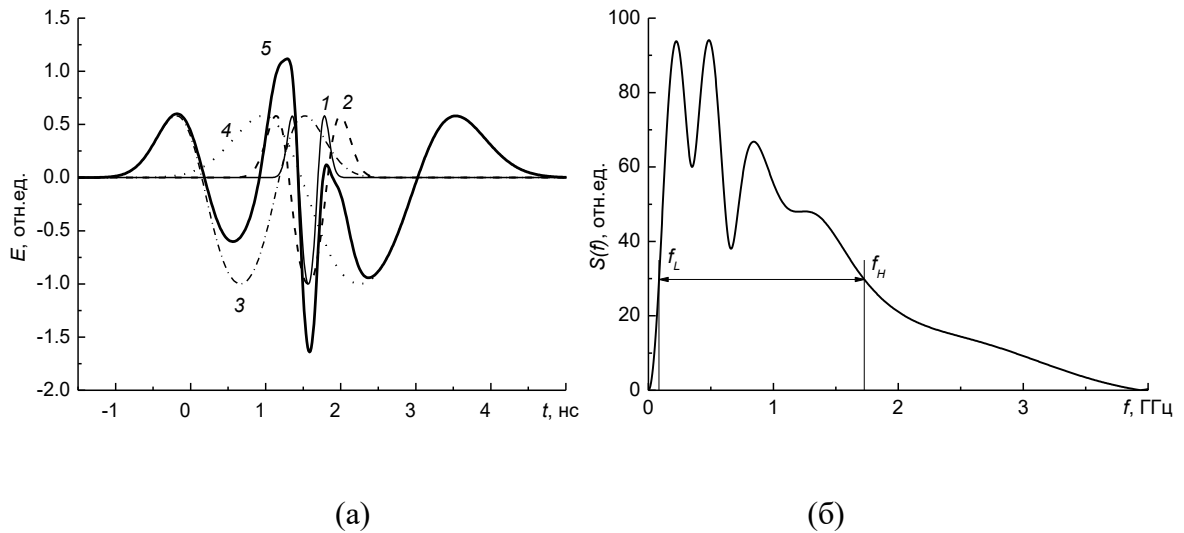


Рисунок 4.8 – Сложение импульсов с задержками, найденными методом Basin–Hopping 1.193 нс (0.5 нс), 0.817 нс (1 нс) и -0.835 нс (2 нс) относительно импульса длительностью 3 нс. а) импульсы излучения от одиночных антенн (кривые 1–4) и суммарный импульс (кривая 5); б) спектр суммарного импульса излучения ($f_H/f_L = 20.47$)

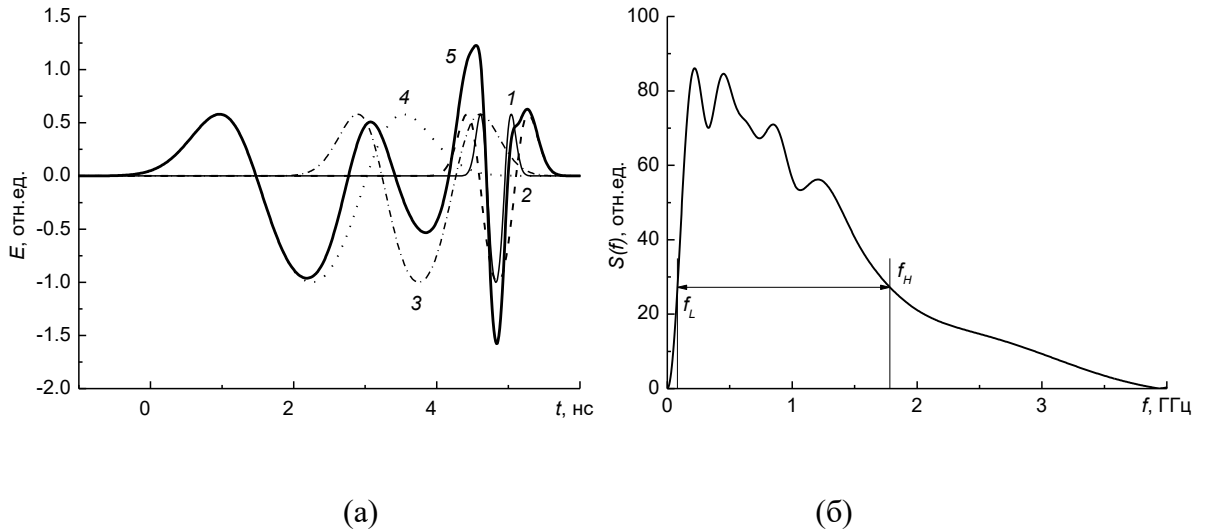


Рисунок 4.9 – Сложение импульсов с задержками, найденными методом перебора с шагом 0.05 нс и равными 4.45 нс (0.5 нс), 4.1 нс (1 нс) и -2.25 нс (2 нс) относительно импульса длительностью 3 нс. а) импульсы излучения от отдельных антенн (кривые 1–4) и суммарный импульс (кривая 5); б) спектр суммарного импульса излучения ($f_H/f_L = 22$)

ДН решеток, элементы которых возбуждались импульсами разной длительности, рассчитывались так же, как это делалось в пункте 3.1. При синхронизации импульсов длительностью 1 и 2 нс по максимуму поля ($\Delta t = 0.76$ нс) ДН не будет отличаться от диаграммы решетки, синхронно возбуждаемой ($\Delta t = 0$ нс) импульсами с одинаковой длительностью (Рисунок 4.10, кривая 1). Однако для суммарного импульса с максимальной шириной спектра ($\Delta t = -0.66$ нс) направление максимума ДН будет зависеть от конфигурации решетки. Рассмотрим решетку комбинированных антенн 2×2 , в которой два элемента возбуждаются биполярным импульсом напряжения длительностью 2 нс и два элемента возбуждаются биполярным импульсом длительностью 3 нс. Две возможные конфигурации приведены на рисунке 4.11. Цифрами 2 и 3 отмечены элементы решетки, возбуждаемые биполярными импульсами длительностью соответственно 2 и 3 нс. Для конфигурации решетки, изображенной на рисунке 4.11 а, максимум ДН смещен на угол 50° (Рисунок 4.10, кривая 2). Чтобы вернуть максимум ДН в главное направление (перпендикулярно плоскости решетки) необходимо использовать конфигурацию решетки, изображенную на рисунке 4.11 б. В этом случае (Рисунок 4.10, кривая 3) ДН практически не отличается от ДН для импульсов излучения, синхронизованных по максимуму поля.

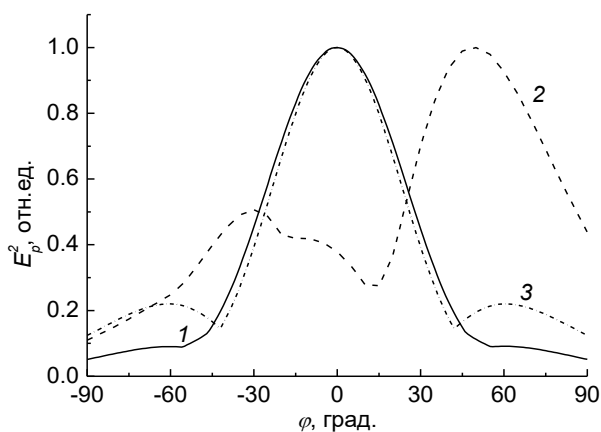


Рисунок 4.10 – ДН решеток 2×2 в H -плоскости. 1 – при синхронном возбуждении ($\Delta t = 0$ нс) импульсами с одинаковой длительностью, 2 – при возбуждении импульсами 2 и 3 нс с $\Delta t = -0.66$ нс (4.11 а), 3 – при возбуждении импульсами 2 и 3 нс с $\Delta t = -0.66$ нс (4.11 б)

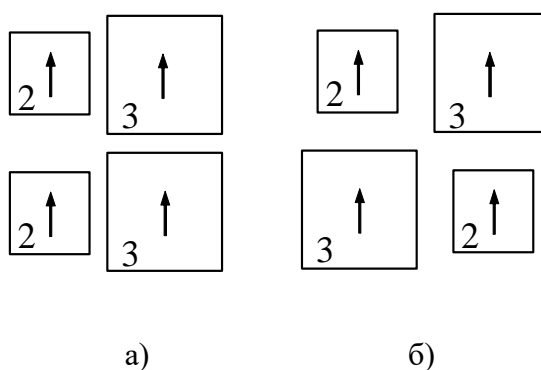


Рисунок 4.11 – Варианты конфигурации решетки 2×2 . Стрелками показана плоскость поляризации вектора \mathbf{E}

Также было проведено моделирование ДН при возбуждении решеток четырьмя импульсами длительностью 0.5, 1, 2, и 3 нс. Лучший результат получен для конфигурации решетки, показанной на рисунке 4.12. Для режима синтеза с максимальной пиковой напряженностью поля получили практически симметричную ДН с максимумом в главном направлении ($\varphi = \delta = 0$) (Рисунок 4.13 а). Для режима синтеза с максимальной шириной спектра получили несимметричные ДН в H - и E -плоскостях (Рисунок 4.13 б кривые 1 и 2) с отклонением максимума диаграммы от главного направления решетки. Зависимость отношения крайних частот спектра излученного импульса от угла для плоскости H показана на рисунке 4.13 б (кривая 3). Среднеквадратичное отклонение формы импульсов относительно формы импульса в главном направлении в плоскости H , не превышает 20% в пределах $\pm 5.5^\circ$ для режима с максимальной амплитудой и $\pm 2.7^\circ$ для режима с максимальным спектром. Расчеты проводились аналогично [82]. Изменение отношения крайних частот в спектре излученного импульса не превышает 20% в диапазоне углов $\pm 25^\circ$ и от -4.7° до $+3.3^\circ$ для режимов с максимальной амплитудой и максимальным спектром соответственно. Для плоскости E получены близкие результаты.

Среднеквадратичное отклонение формы импульсов относительно формы импульса в главном направлении не превышает 20% в пределах $\pm 4.8^\circ$ для режима с максимальной амплитудой и $\pm 2.6^\circ$ для режима с максимальным спектром. Изменение отношения крайних частот в спектре излученного импульса не превышает 20% в диапазоне углов $\pm 22^\circ$ и от -6° до $+3.2^\circ$ для режимов с максимальной амплитудой и максимальным спектром соответственно.

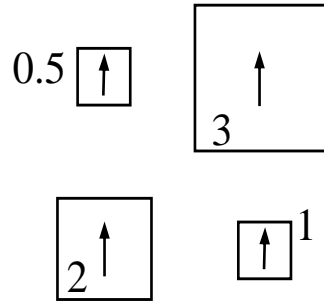


Рисунок 4.12 – Конфигурация решетки 2×2 . Стрелками показана плоскость поляризации вектора напряженности электрического поля, цифрами показана длительность биполярного импульса, возбуждающего элемент решетки

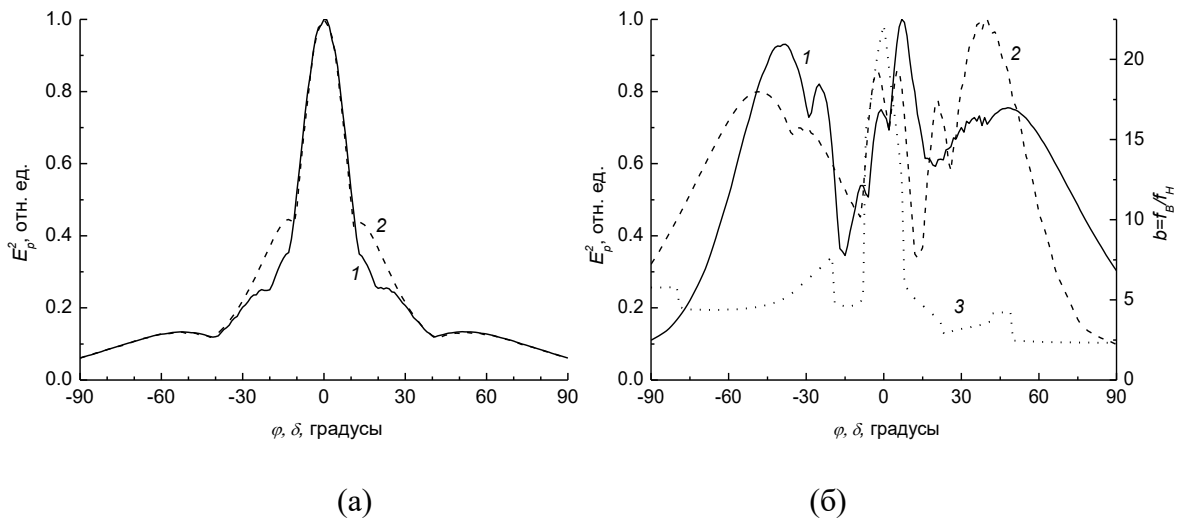


Рисунок 4.13 – ДН в H - (кривые 1) и E - (кривые 2) плоскостях для режима синтеза с максимальной пиковой напряженностью поля (а) и для режима синтеза с максимальной шириной спектра (б). Кривая 3 (б) – зависимость отношения граничных частот спектра от угла для H -плоскости

Моделирование показало, что для решетки 2×2 , элементы которой возбуждаются биполярными импульсами разной длительности (0.5, 1, 2 и 3 нс), в режиме синтеза с максимальной шириной спектра невозможно получить ДН с максимумом в главном направлении решетки. Были проведены численные исследования, которые показали, что разрешить эту проблему можно, используя большее количество элементов в решетке. Например, на рисунке 4.14 а показана конфигурация 7-элементной решетки КА и ее ДН (Рисунок 4.14 б, кривая 1) для режима синтеза с максимальной шириной спектра. Амплитуды импульсов излучения при

возбуждении антенн длительностью 0.5, 1 и 2 нс составляли половину амплитуды импульса излучения при возбуждении антенны длительностью 3 нс. Так как решетка симметричная, то ДН в плоскостях E и H совпадают. Зависимость отношения крайних частот спектра излученного импульса от угла для обеих плоскостей показана на рисунке 4.14 б (кривая 2). Для 7-элементной решетки, приведенной на рисунке 4.14 а, среднеквадратичное отклонение формы импульсов относительно формы импульса в главном направлении, не превышает 20% в пределах $\pm 4.5^\circ$ для режима с максимальной амплитудой и $\pm 3^\circ$ для режима с максимальным спектром. Изменение отношения крайних частот в спектре излученного импульса не превышает 20% в диапазоне углов $\pm 13^\circ$ и $\pm 5^\circ$ для режимов с максимальной амплитудой и максимальным спектром соответственно.

Таким образом, 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.

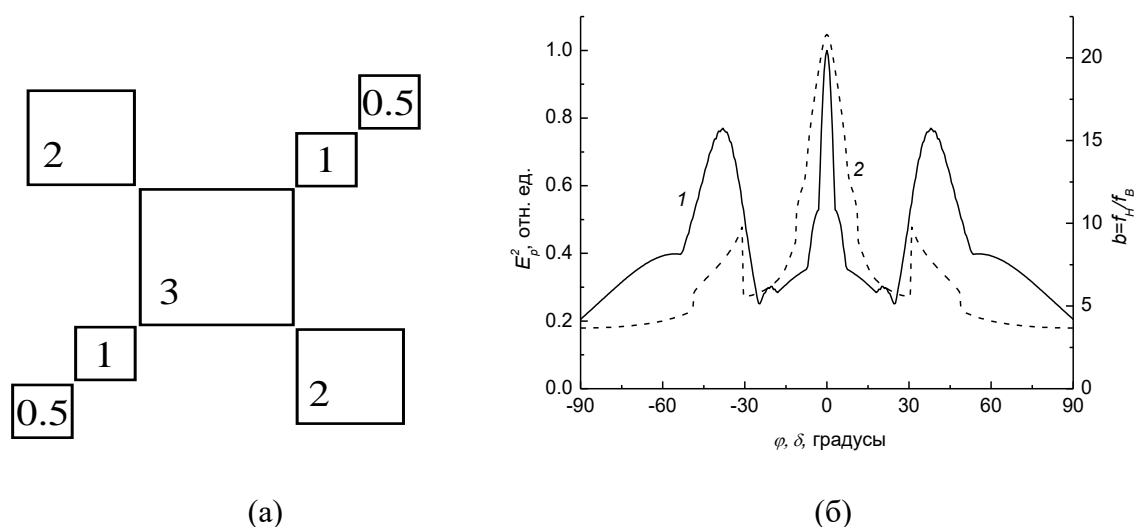


Рисунок 4.14 – Конфигурация 7-элементной решетки (а) и ее ДН в E - и H -плоскостях (кривая 1) и зависимость отношения граничных частот спектра излучения от угла (кривая 2) для режима синтеза с максимальной шириной спектра (б)

4.8 Маломощные источники синтезированного излучения

Для исследования синтеза импульсов излучения на низком напряжении использовались генераторы биполярных импульсов напряжения и модуль запуска производства фирмы “Трим” (<http://trimcom.ru>) (Рисунок 4.15). Модуль запуска позволяет управлять задержками запуска четырех генераторов с временным шагом 10 пс. Биполярные импульсы длительностью 3, 2 и 1 нс имеют амплитуды примерно 60 В, а 0.5 нс – амплитуду примерно 40 В.



Рисунок 4.15 – Устройство синхронизации и низковольтные генераторы 3 и 2 нс

4.8.7 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн низковольтными биполярными импульсами длительностью 3 нс и 2 нс

В эксперименте исследовалась возможность синтеза электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн биполярными импульсами длительностью 3 нс и 2 нс [111]. В качестве элементов решетки использовались антенн КА3 и КА2. На рисунке 4.16 а приведены осциллограммы импульсов с низковольтных генераторов 2 и 3 нс, а на рисунке 4.16 б приведены осциллограммы импульсов, излучённых отдельными комбинированными антеннами. Спектры излученных электромагнитных импульсов приведены на рисунке 4.17.

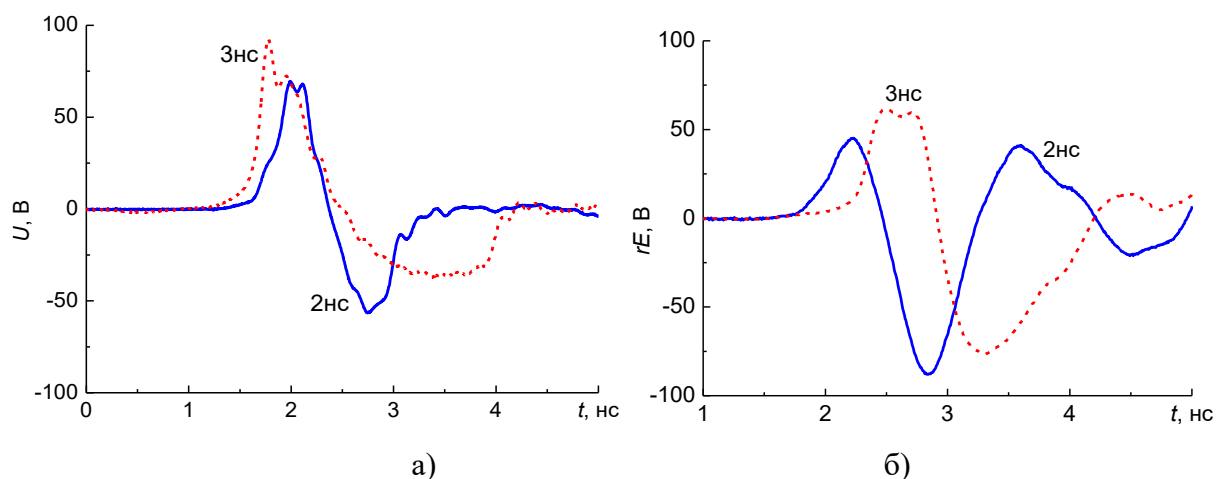


Рисунок 4.16 – Импульсы напряжения генераторов (а) и импульсы, излученные комбинарованными антеннами (б)

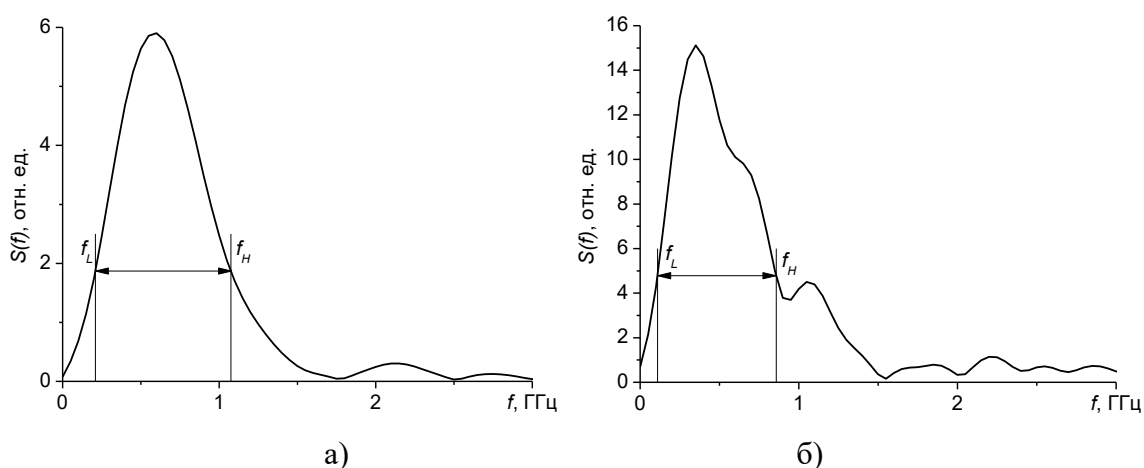


Рисунок 4.17 – Спектры импульсов излучения при возбуждении антенн биполярными импульсами напряжения длительностью 2 нс (а) и 3 нс (б)

Было проведено исследование зависимости формы импульса излучения от положения элемента решетки для излучения импульса 2 нс (Рисунок 4.18). Из полученных результатов (Рисунок 4.19) следует, что изменение d в пределах от 0 до 15 см оказывает слабое влияние на форму и амплитуду излученного импульса в главном направлении.

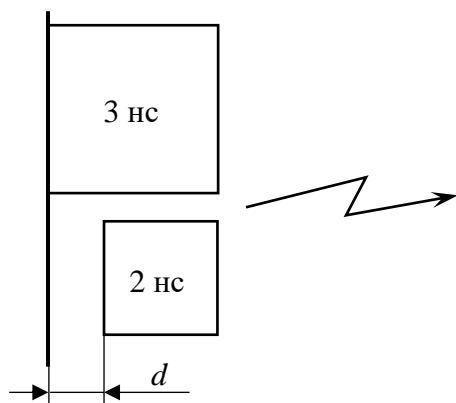


Рисунок 4.18 – Антенная решетка

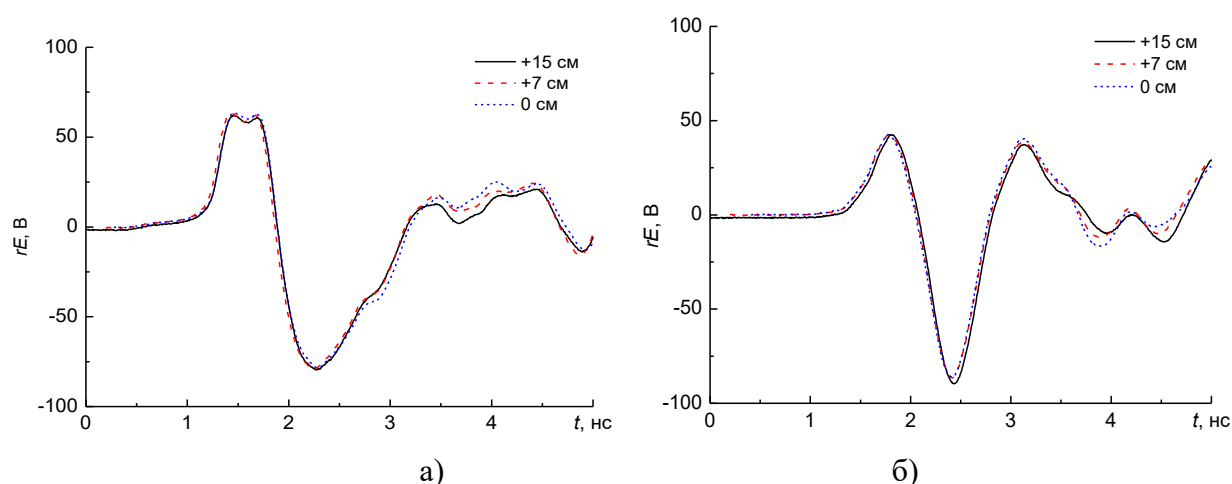


Рисунок 4.19 – Зависимость формы импульса, излученного элементами 3 нс (а) и 2 нс (б) от положения элементов 2 нс относительно плоскости решетки

Как и в описанном выше теоретическом анализе, интерес представляют импульсы, синтезированные с максимальной амплитудой поля и максимальной шириной спектра излучения. На рисунке 4.20 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными на получение максимальной амплитуды. На рисунке 4.21 приведены осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными на получение максимальной ширины спектра, и его спектр. Частотные характеристики низковольтных импульсов сведены в таблице 7.

Для синтезированного импульса с задержкой, оптимизированной для получения максимальной амплитуды поля, отношение граничных частот составило 7, что на ~10% меньше отношения граничных частот спектра импульса излучения длительностью 3 нс. Для синтезированного импульса с задержкой, оптимизированной для получения максимальной ширины спектра, ширина спектра Δf увеличилась в 1.4–1.6 раза, а по отношению крайних частот

b в 1.6–2.4 раза. При этом длительность синтезированного импульса в ~ 1.5 раза больше максимальной длительности одиночного импульса излучения.

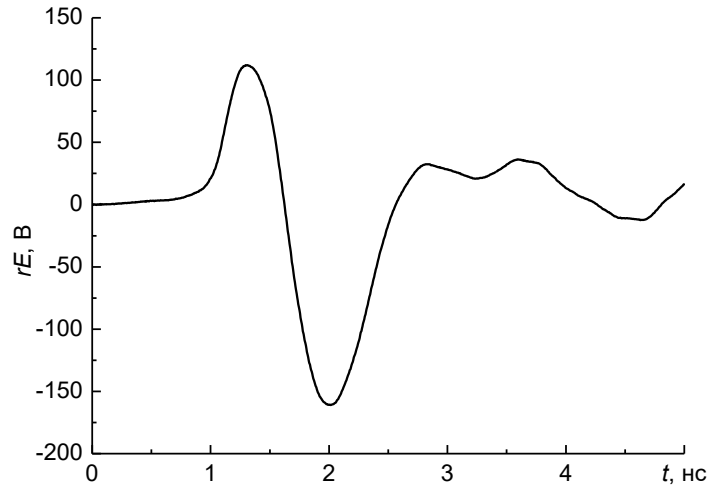


Рисунок 4.20 – Осциллограмма синтезированного импульса при синхронизации по максимуму амплитуды

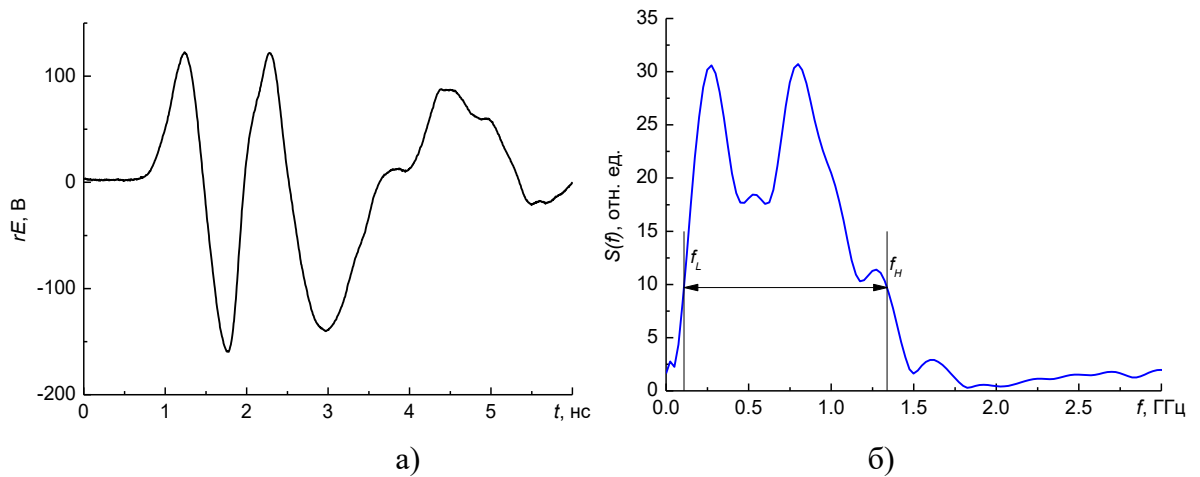


Рисунок 4.21 – Осциллограмма импульса (а), излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра, и его спектр (б)

Таблица 7 Параметры маломощных импульсов излучения

импульс СШП-излучения	f_L , ГГц	f_H , ГГц	f_0 , ГГц	Δf , ГГц	$\Delta f/f_0$	$b = f_H/f_L$
2 нс	0.209	1.075	0.642	0.866	1.35	5.14
3 нс	0.11	0.858	0.484	0.748	1.55	7.8
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

4.8.8 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн низковольтными биполярными импульсами длительностью 1 нс и 0.5 нс.

На рисунке 4.22 приведена фотография четырехэлементной решетки, подключенной к четырехканальному низковольтному генератору биполярных импульсов. Для излучения обоих импульсов, и 1 нс и 0.5 нс, в решетке использовались антенны КА1-0.5-1. Антенны, возбуждаемые импульсами одинаковой длительности, расположены по диагонали для получения максимума диаграммы направленности в главном направлении, перпендикулярном плоскости решетки.

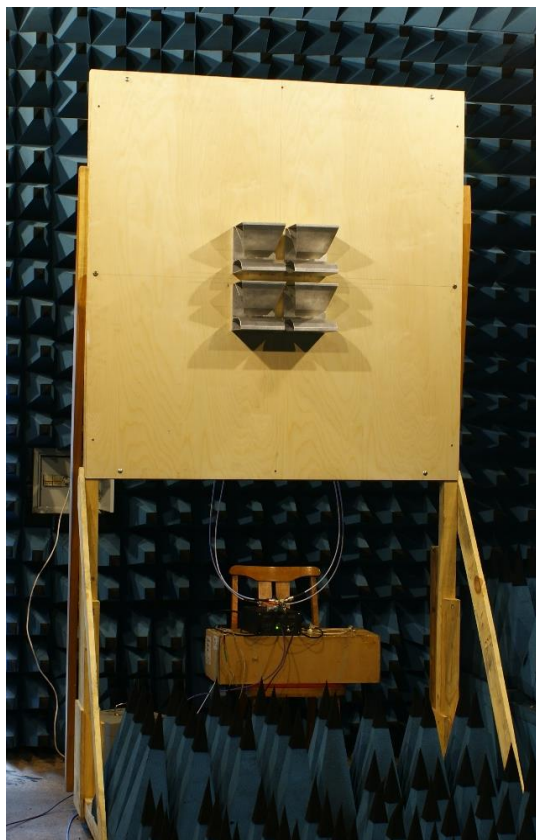


Рисунок 4.22 – Четырехэлементная решетка, подключенная к четырехканальному низковольтному генератору биполярных импульсов

Осциллограммы импульсов, излучённых антеннами КА1-0.5-1, возбуждаемыми низковольтными генераторами 0.5 и 1 нс, приведены на рисунке 4.23 а, а их спектры на рисунке 4.23 б. Измерения проводились на расстоянии от решетки $r = 4.4$ м с помощью приемной ТЕМ-антенны.

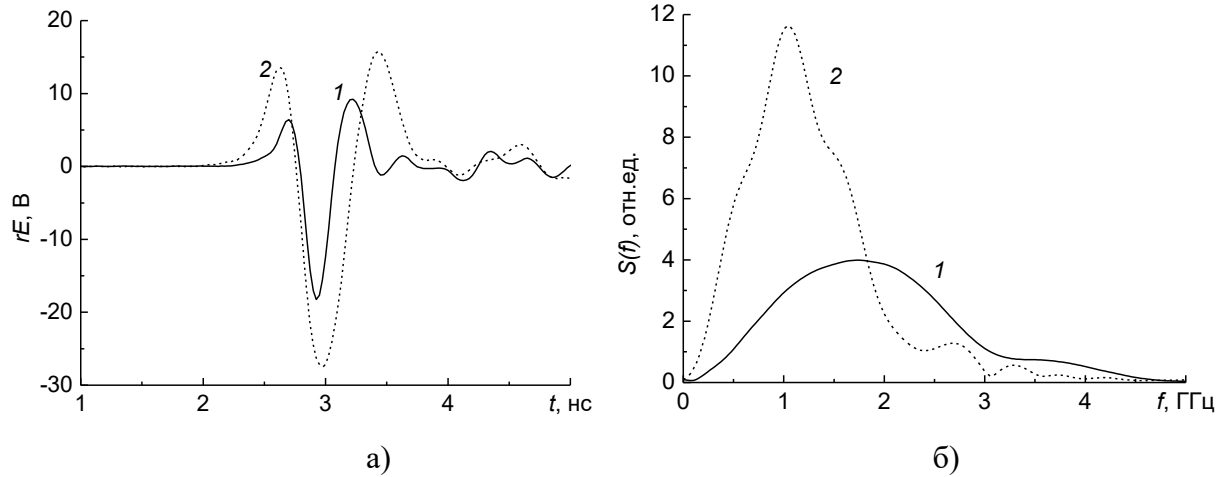


Рисунок 4.23 – Импульсы, излученные комбинированными антеннами при возбуждении биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 нс (1) и 1 нс (2), и их соответствующие спектры (б)

На рисунке 4.24 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получения максимальной амплитуды, и его спектр. Ширина спектра Δf такого импульса почти не отличается от ширины спектра исходных импульсов. На рисунке 4.25 приведены осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получение максимальной ширины спектра, и его спектр. В этом случае ширина спектра Δf синтезированного импульса увеличилась в 1.1–1.7 раза, а по отношению крайних частот b в 2 раза. Частотные характеристики низковольтных импульсов сведены в таблице 8.

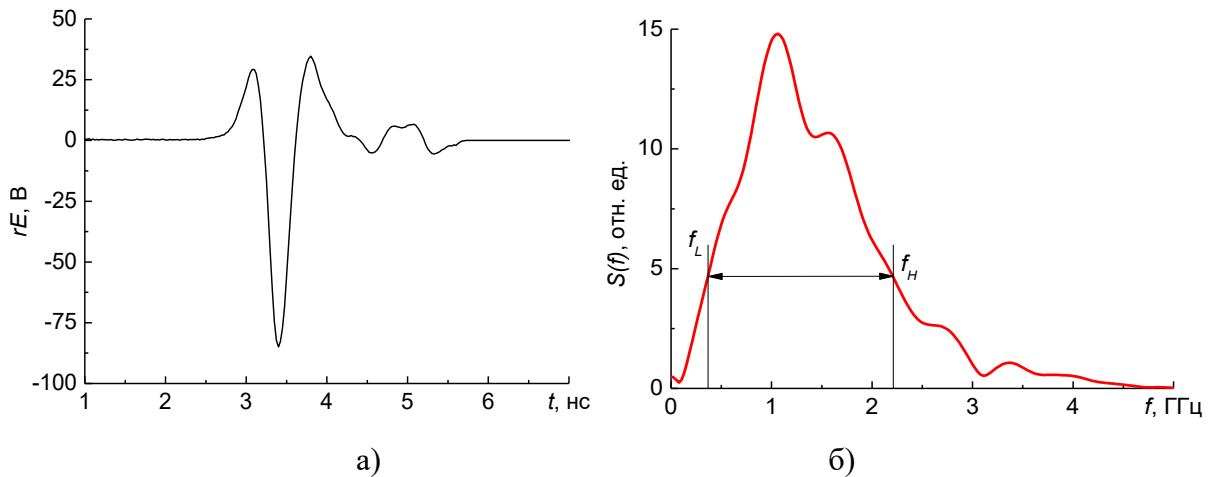


Рисунок 4.24 – Осциллограмма импульса (а), излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной амплитуды, и его спектр (б)

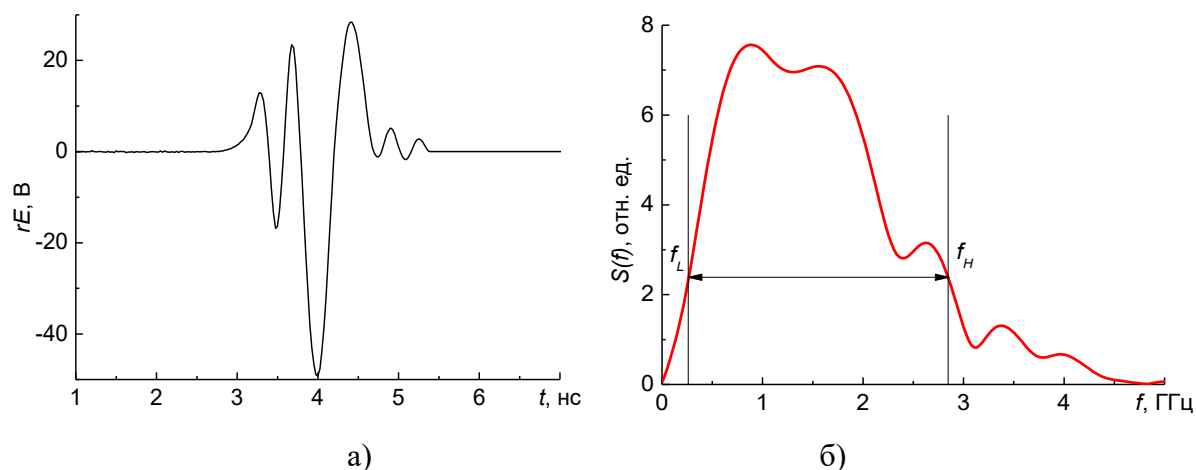


Рисунок 4.25 – Осциллограмма импульса (а), излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра, и его спектр (б)

Таблица 8 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 нс	0.546	2.937	1.742	2.391	1.373	5.379
1 нс	0.357	2.20	1.105	1.496	1.354	5.194
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

4.8.9 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн низковольтными биполярными импульсами длительностью 3 нс, 2 нс, 1 нс и 0.5 нс

Для синтеза импульса излучения из четырех отдельных импульсов с различной длительностью использовалась четырехэлементная решетка с антеннами КА3, КА2 и КА1-0.5-2 (Рисунок 4.26). Антенна КА1-0.5-2 использовалась излучения импульсов 1 и 0.5 нс.



Рисунок 4.26 – Четырехэлементная решетка, возбуждаемая биполярными импульсами длительностью 3 нс, 2 нс, 1 нс и 0.5 нс

Осциллограммы импульсов, излучённых комбинированными антеннами, возбуждаемыми низковольтными биполярными импульсами длительностью 0.5, 1, 2 и 3 нс, приведены на рисунке 4.27 а, а их спектры на рисунке 4.27 б. Измерения проводились на расстоянии от решетки $r = 4.4$ м.

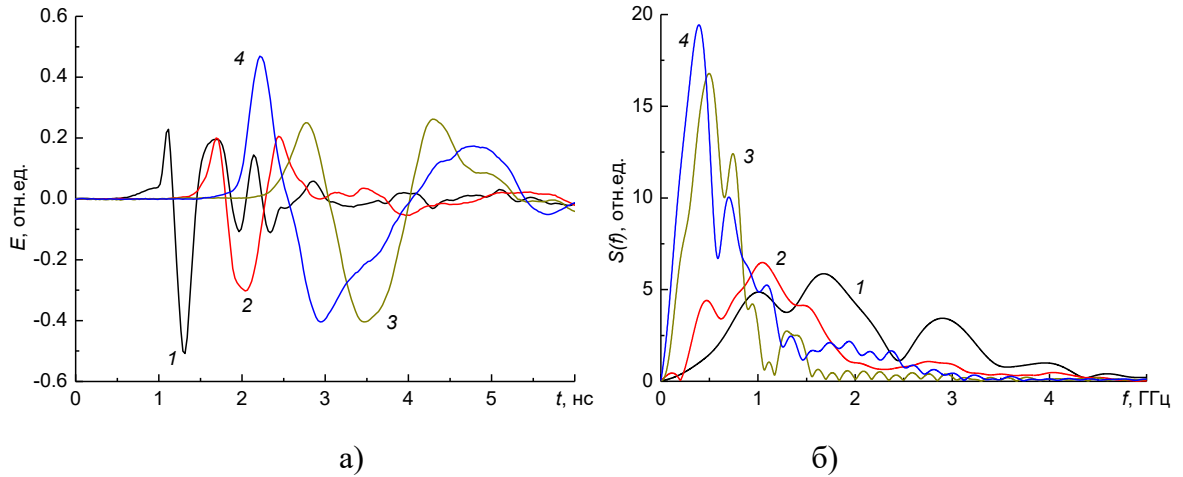


Рисунок 4.27 – Импульсы, излученные комбинированными антеннами при возбуждении антенн биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 нс (1), 1 нс (2), 2 нс (3) и 3 нс (4), и их соответствующие спектры (б)

На рисунке 4.28 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получения максимальной амплитуды, и его спектр. Ширина спектра Δf такого импульса почти не отличается от ширины спектра исходных импульсов. На рисунке 4.29 приведены осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получение максимальной ширины спектра, и его спектр. В этом случае ширина спектра Δf синтезированного импульса увеличена в 1.3–2 раза, а по отношению крайних частот b в 4 раза. Частотные характеристики низковольтных импульсов сведены в Таблице 9.

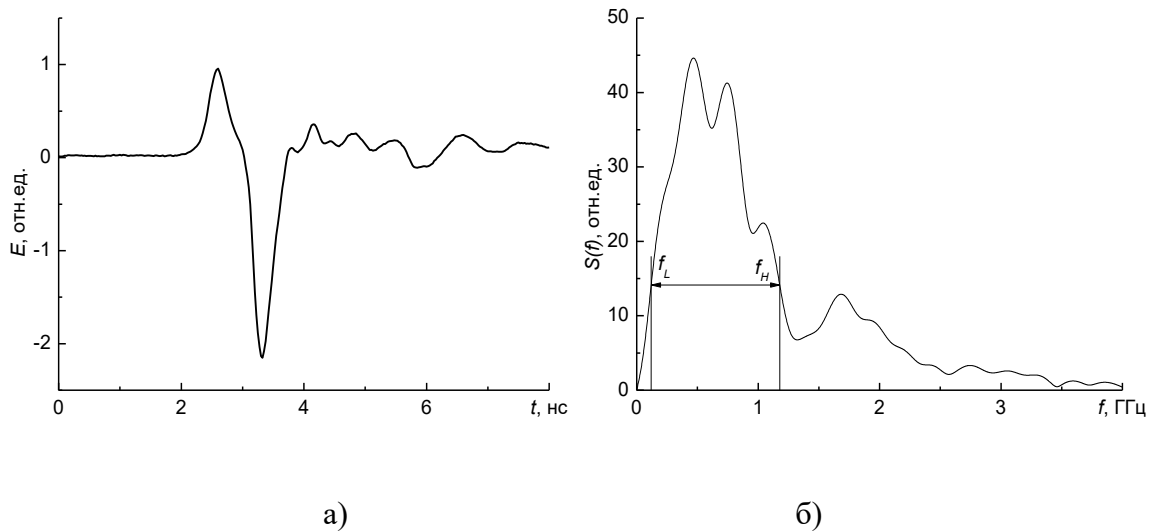


Рисунок 4.28 – Осциллограмма импульса (а), излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной амплитуды, и его спектр (б)

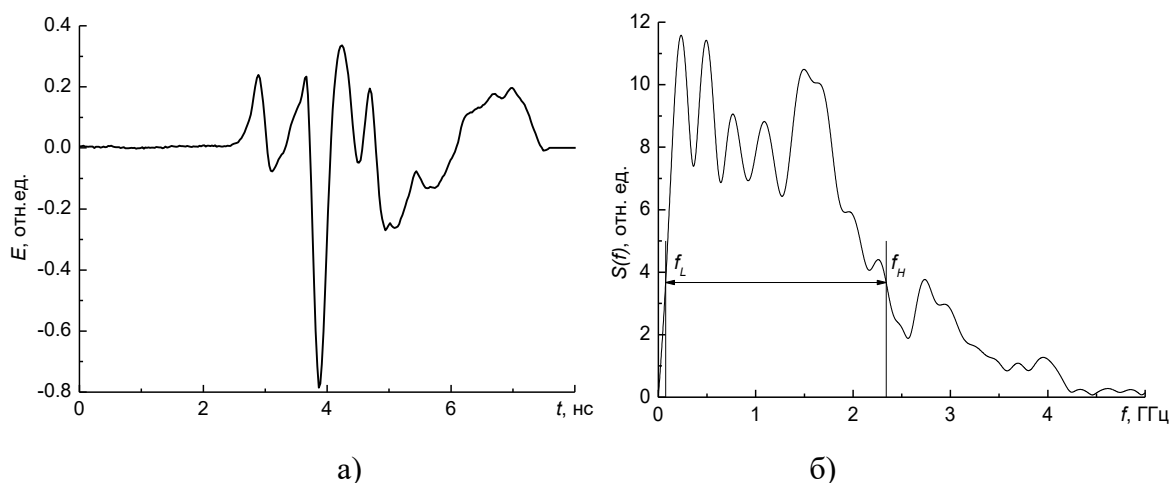


Рисунок 4.29 – Осциллограмма импульса (а), излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра, и его спектр (б)

Таблица 9 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 нс	0.569	2.32	1.444	1.751	1.21	4.08
1 нс	0.31	1.77	1,04	1.46	1.4	5.71
2 нс	0.17	0.86	0.515	0.69	1.34	5.06
3 нс	0.117	0.9	0.508	0.783	1.54	7.69
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

4.9 Мощные источники синтезированного излучения

Для исследований синтеза излучения на высоком напряжении был разработан мощный источник с четырехканальным ФБИ. Внешний вид источника СШП-излучения приведен на рисунке 4.30. Источник состоит из следующих основных частей: генератор монополярных импульсов СИНУС - 160 1 и четырехканальный формирователь биполярных импульсов с разными длительностями 2. Импульсы разной длительности от каждого канала формирователя подводятся к элементам решетки с помощью коаксиальных линий 3 и кабелей РК50-17-51 с кордельной изоляцией, которые не показаны на рисунке. Для повышения электрической прочности в последовательно соединенные коаксиальные линии и кабели закачивался газ SF₆ под давлением 5 атм. Измерения характеристик излучения проводились в безэховой камере. Результаты исследований были опубликованы в работах [112], [84], [85].

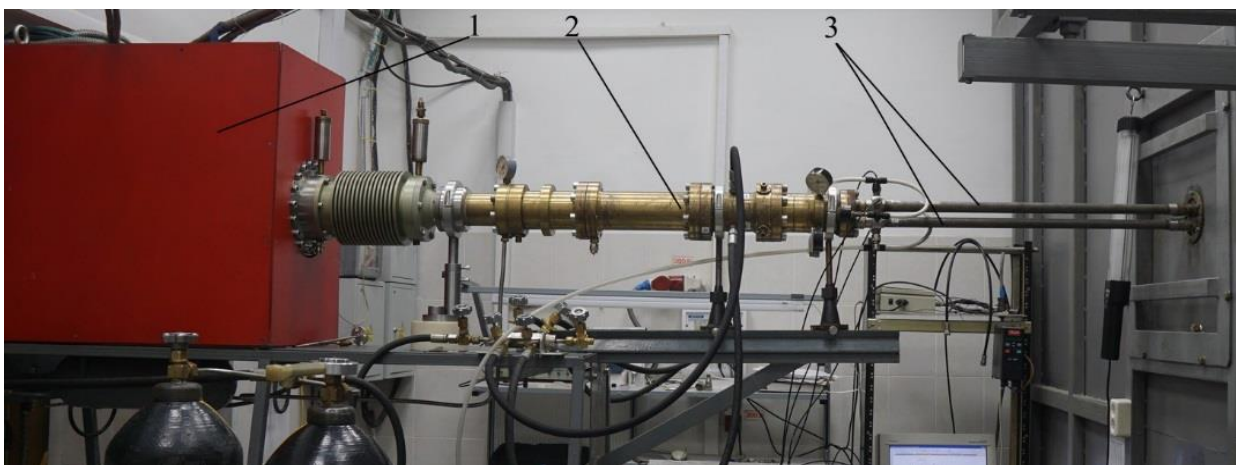


Рисунок 4.30 – Четырехканальный генератор биполярных импульсов. 1 – генератор монополярных импульсов, 2 – четырехканальный формирователь биполярных импульсов с разными длительностями, 3 – передающие линии, 4 – антенная решетка

4.9.1 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн высоковольтными биполярными импульсами длительностью 3 нс и 2 нс

Использовалась решетка, изображенная на рисунке 4.18. Для того, чтобы оценить задержки для синтезированных импульсов при возбуждении решетки высоковольтными биполярными импульсами, были проведены измерения излучения элементов решетки при возбуждении отдельно импульсом длительностью 2 нс и отдельно импульсом длительностью 3 нс с передающими линиями одинаковой длины. Результаты измерений приведены на рисунке 4.31 а. В отличие от модельных импульсов измеренные импульсы отличались по амплитуде на 25%. На рисунке 4.31 б приведены спектры импульсов. Ширины спектров отличались от расчётных спектров (Рисунок 4.1 б) не более чем на 15%.

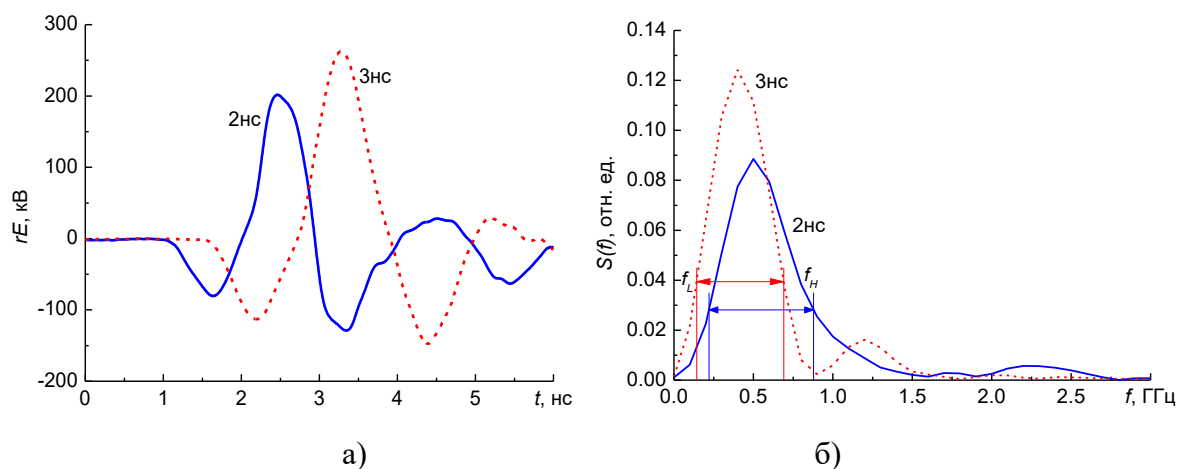


Рисунок 4.31 – Осциллограммы импульсов (а) и их спектры (б)

На основе этих измерений для синтеза импульсов, оптимизированных по амплитуде поля и ширине спектра, были оценены задержки, вносимые в линии передачи импульсов от генератора к элементам решетки. Для синтеза импульса с максимальной амплитудой поля в линии передачи биполярных импульсов длительностью 2 нс была внесена дополнительная временная задержка 0.82 нс. Осциллограмма синтезированного импульса с такой задержкой приведена на рисунке 4.32. Эффективный потенциал излучения равен 500 кВ.

Для синтеза импульса с максимальной шириной спектра была внесена временная задержка 0.3 нс в линии передачи биполярных импульсов длительностью 3 нс. На рисунке 4.33 а приведена осциллограмма импульса синтезированного излучения, а на рисунке 4.33 б его спектр. Эффективный потенциал синтезированного излучения rE_p с расширенной полосой частот составил 220 кВ, а отношение верхней и нижней граничных частот было равно примерно 10. Измеренные частотные характеристики импульсов излучения приведены в таблице 10. В таблице приведены характеристики импульсов излучения при возбуждении КА биполярными импульсами длительностью 2 нс и 3 нс (первая и вторая строка соответственно), а также синтезированных импульсов излучения для режима с максимальной амплитудой поля (третья строка) и максимальной шириной спектра (четвертая строка).

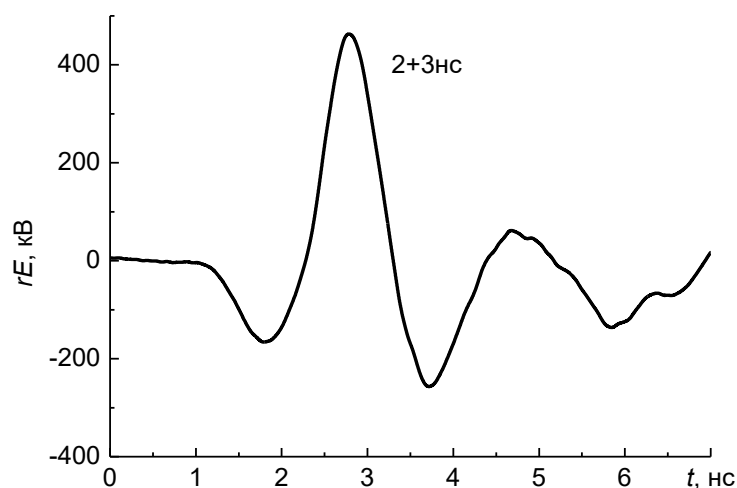


Рисунок 4.32 – Осциллограмма синтезированного импульса излучения по максимуму амплитуды поля

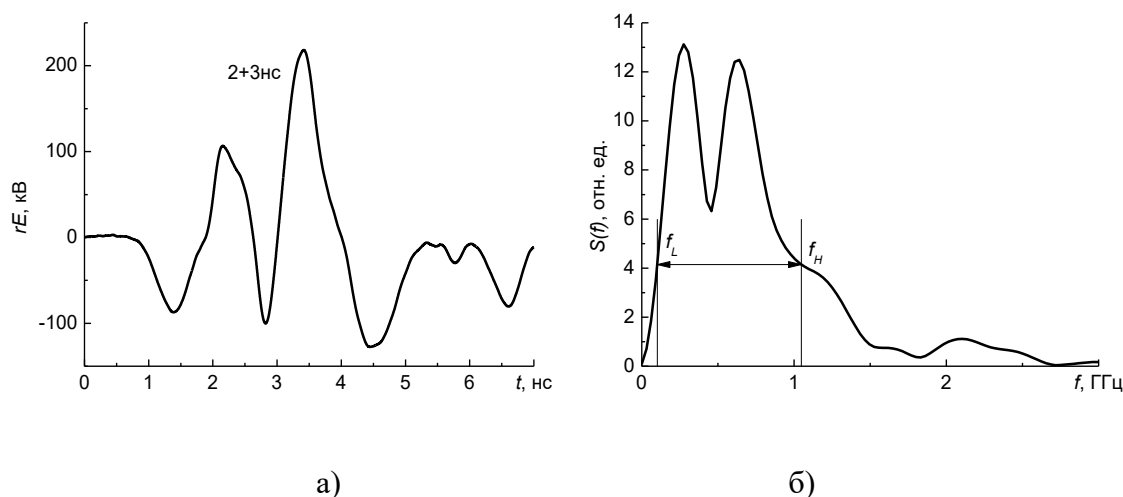


Рисунок 4.33 – Осциллограмма (а) и спектр (б) синтезированного импульса излучения по максимуму ширины спектра

Таблица 10 Параметры мощных импульсов СШП-излучения

Импульс-СШП излучения	f_L , ГГц	f_H , ГГц	f_0 , ГГц	Δf , ГГц	$\Delta f/f_0$	$b = f_H/f_L$
2 нс	0.22	0.878	0.549	0.658	1.199	3.99
3 нс	0.143	0.69	0.4165	0.547	1.313	4.825
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

Ширина спектра синтезированного импульса увеличена в 1.4–1.7 раза, а по отношению крайних частот в 2.1–2.6 раза по сравнению с СШП-источниками на основе решеток, возбуждаемых одинаковыми биполярными импульсами.

4.9.2 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн высоковольтными биполярными импульсами длительностью 1 нс и 0.5 нс

На рисунке 4.34 приведены осциллограммы импульсов (rE), излучённых комбинированными антеннами при возбуждении высоковольтными биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 и 1 нс, и их спектры. Измерения проводились на расстоянии от решетки $r = 4.4$ м.

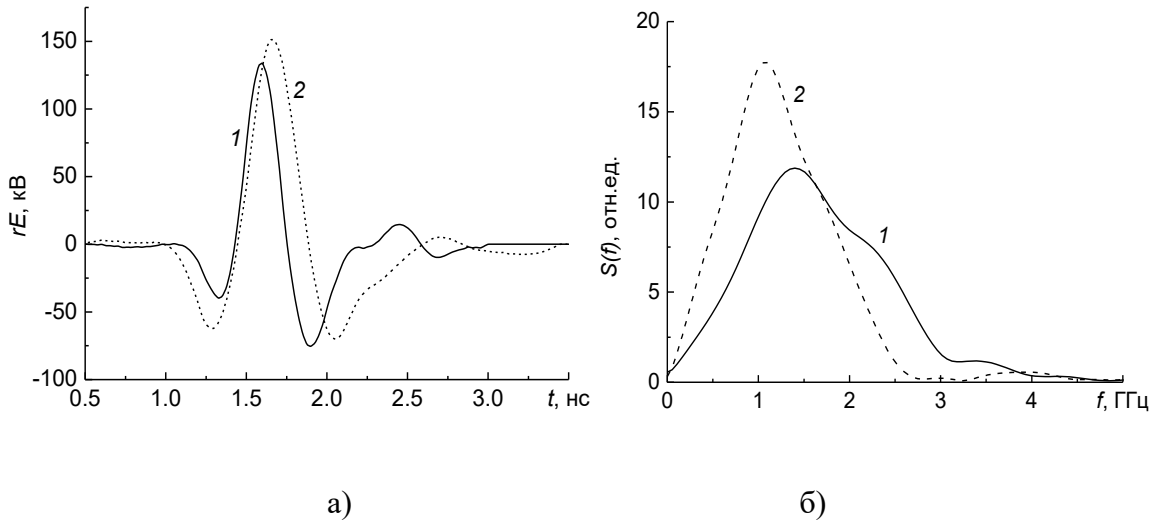


Рисунок 4.34 – Осциллограммы импульсов (а) и их спектры (б) при возбуждении антенн биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 нс (1) и 1 нс (2).

По результатам измерений формы импульсов излучения (Рисунок 4.34 а) и их относительных задержек, были рассчитаны задержки, необходимые для получения синтезированных импульсов с максимальной амплитудой и максимальной шириной спектра. На рисунке 4.35 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получения максимальной амплитуды поля, и его спектр. Получены импульсы излучения с эффективным потенциалом $rE_p = 600$ кВ.

На рисунке 4.36 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра. Эффективный потенциал синтезированного излучения rE_p с расширенной полосой частот составил 200 кВ. Измеренные частотные характеристики импульсов приведены в таблице 11.

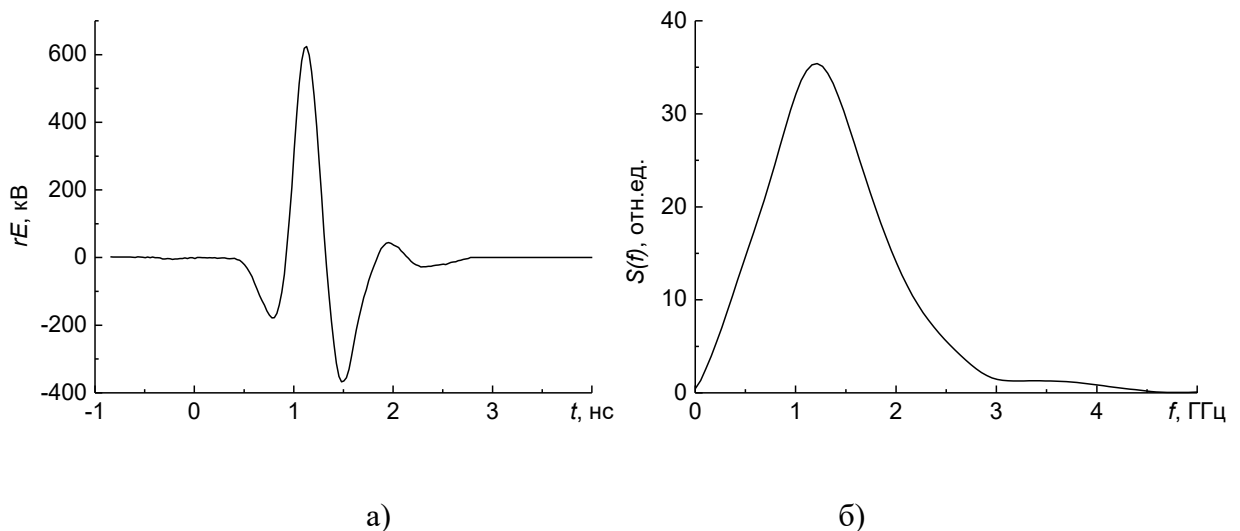


Рисунок 4.35 – Осциллограмма синтезированного импульса (а) при синхронизации по максимуму амплитуды и его спектр (б)

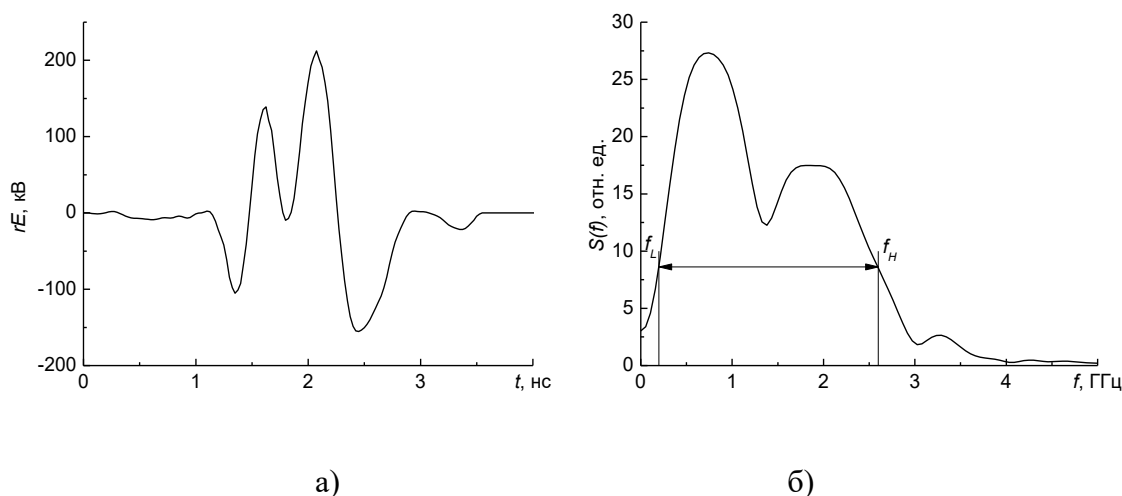


Рисунок 4.36 – Осциллограмма синтезированного импульса (а), излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра, и его спектр (б)

Таблица 11 Параметры мощных импульсов СШП-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	0.487	2.717	1.602	2.23	1.392	5.578
1 нс	0.328	2.073	1.2	1.745	1.454	6.322
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

Ширина спектра Δf синтезированного импульса увеличена в 1.1–1.4 раза, а по отношению крайних частот b в 2.1–2.4 раза.

4.9.3 Экспериментальные исследования характеристик синтезированных электромагнитных импульсов при возбуждении четырехэлементной решетки комбинированных антенн высоковольтными биполярными импульсами длительностью 3 нс, 2 нс, 1 нс и 0.5 нс

Использовалась решетка, изображенная на рисунке 4.26. Измерения проводились на расстоянии от решетки $r = 4$ м. Получив осциллограммы импульсов излучения (Рисунок 4.37 а), мы рассчитали их спектры (Рисунок 4.37 б) и временные задержки, необходимые для получения синтезированных импульсов с максимальной амплитудой поля и максимальной шириной спектра излучения.

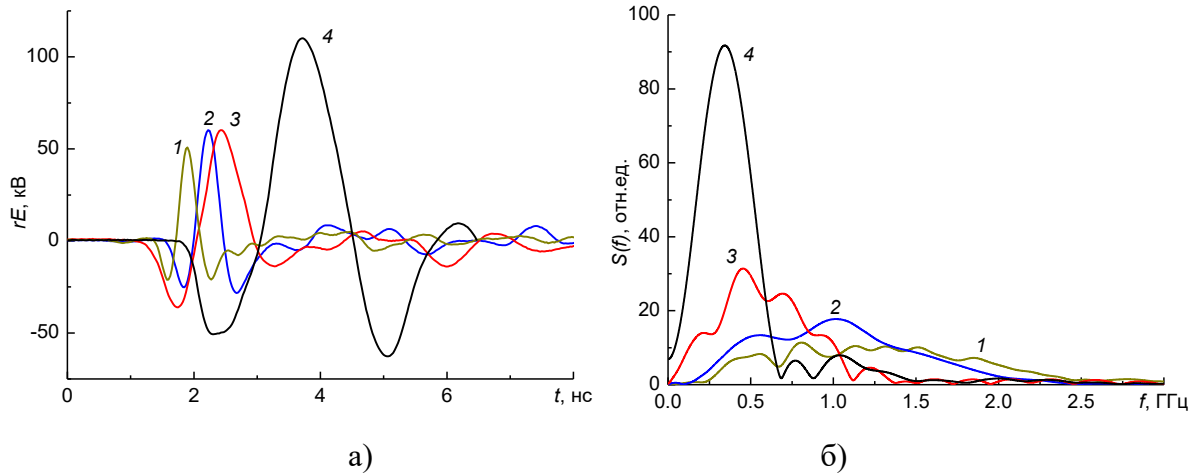


Рисунок 4.37 – Осциллограммы импульсов излучения (а) и их спектры (б) при возбуждении антенн биполярными импульсами напряжения длительностью 0.5 (1), 1 (2), 2 (3) и 3 нс (4)

На рисунке 4.38 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получения максимальной амплитуды поля, и его спектр. Получены импульсы излучения с эффективным потенциалом $rE_p = 290$ кВ и нестабильностью по максимуму амплитуды $\sigma=7\%$. На рисунке 4.39 приведена осциллограмма синтезированного импульса с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра. Эффективный потенциал синтезированного излучения с расширенной полосой частот составляет 185 кВ и нестабильностью по максимуму амплитуды $\sigma=9\%$. Измеренные частотные характеристики импульсов приведены в Таблице 12.

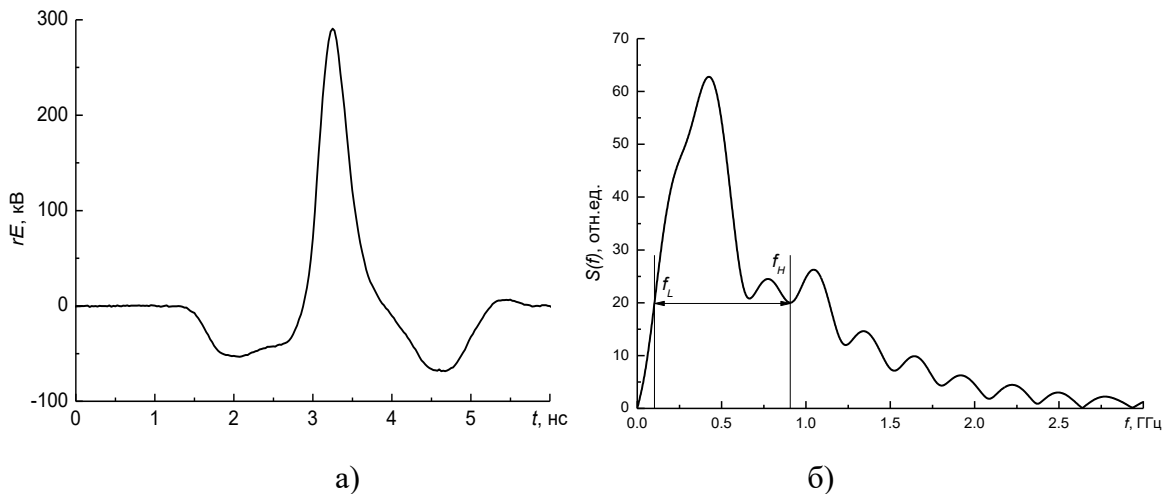


Рисунок 4.38 – Осциллограмма синтезированного импульса (а) при синхронизации по максимуму амплитуды и его спектр (б)

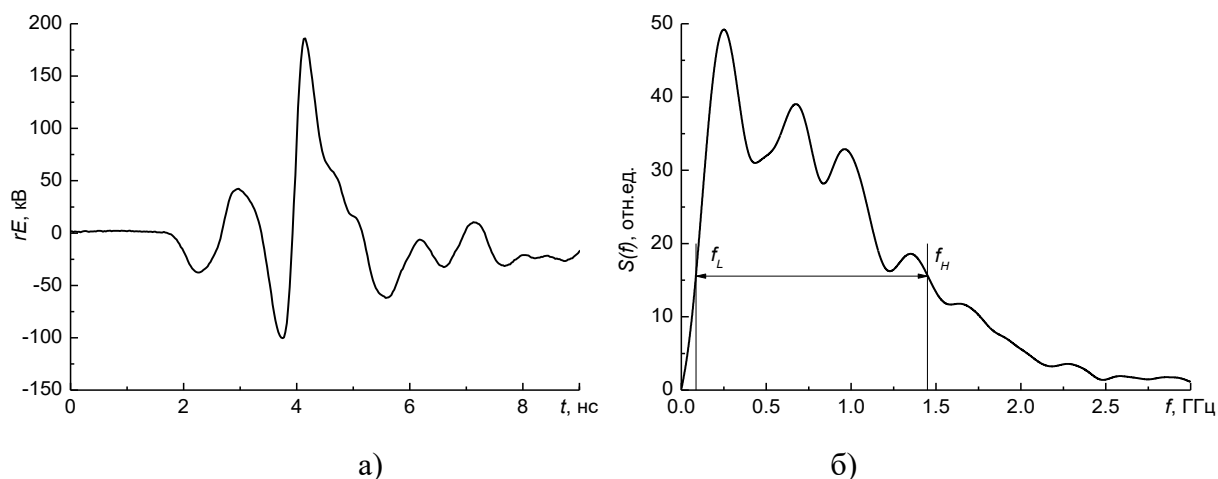


Рисунок 4.39 – Осциллограмма синтезированного импульса (а), излученного решеткой с задержками, оптимизированными для получения максимальной ширины спектра, и его спектр (б)

Таблица 12 Параметры мощных импульсов СШП-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	0.31	2.17	1.24	1.86	1.5	7
1 нс	0.28	1.73	1	1.45	1.45	6.2
2 нс	0.126	1.02	0.573	0.89	1.55	8.1
3 нс	0.115	0.574	0.34	0.46	1.33	5
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 результате выполненных исследований отношение крайних частот в режиме с максимальной шириной спектра было увеличено примерно в 2.6 раз по сравнению с решетками, возбуждаемыми одинаковыми импульсами. В низковольтных измерениях эта величина достигала 4. Различие обусловлено большой амплитудой импульса излучения при возбуждении антенны биполярным импульсом длительностью 3 нс по сравнению с остальными. Дополнительным фактором, влияющим на выбор временных задержек и снижение отношения крайних частот спектра, было отражение этого импульса излучения от стенок измерительной камеры и его сложение с синтезированным импульсом излучения.

4.10 Выводы

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.

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.

Экспериментально исследован синтез мощных импульсов излучения на основе решетки 2×2 комбинированных антенн, 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 и отношение крайних частот 5.4 для импульса 0.5 + 1 нс) и максимальная ширина спектра (эффективный потенциал излучения 185 кВ и отношение крайних частот 16.9 для импульса 0.5 + 1 + 2 + 3 нс). Смену режимов осуществляли с помощью изменения времени задержки между импульсами.

Заключение

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 SF_6 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 комбинированных антенн, 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.

Автор выражает признательность своему научному руководителю – д.ф.-м.н. Кошелеву В.И. за постоянное внимание и общее руководство работой.

Автор глубоко признателен к.ф.-м.н. Ефремову А.М. за многолетнее сотрудничество и помощь.

Автор искренне благодарен всему коллективу лаборатории высокочастотной электроники ИСЭ СО РАН за дружескую поддержку и помощь.

Литература

1. Giri D.V., Hoad R., Sabath F. High-Power Electromagnetic Effects on Electronic Systems. Boston, London: Artech House, 2020. 307 p.
2. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем. Москва: Вузовская книга, 2007. 468 с.
3. Усыченко В.Г., Сорокин Л.Н. Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям. Москва: Радиотехника, 2017. 288 с.
4. Осташев В.Е., Ульянов А.В. Сверхширокополосное излучение и угроза его воздействия на электронные технические системы. Москва: Препринт ОИВТ РАН № 7-517, 2018. 119 с.
5. Газизов Т.З., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П. Электромагнитная совместимость: преднамеренные силовые электромагнитные воздействия. Томск: Изд-во Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2018. 114 с.
6. Taylor J.D., editor. Ultra-Wideband Radar Technology. Boca Raton: CRC Press, 2000. 424 p.
7. Соколов А.В., редактор. Вопросы перспективной радиолокации. Москва: Радиотехника, 2003. 512 с.
8. Кошелев В.И. Мощные импульсы сверхширокополосного излучения для радиолокации // В кн.: Активные фазированные антенные решетки. Москва: Радиотехника, 2004. С. 428–454.
9. Кузнецов Ю.В. Распознавание целей в сверхширокополосной радиолокации // В кн.: Активные фазированные антенные решетки. Москва: Радиотехника, 2004. С. 234–319.
10. Fenn A.J., Hurst P.T. Ultrawideband Phased Array Antenna Technology for Sensing and Communications Systems. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2015. 280 p.
11. Baum K.E. Radiation of impulse-like transient fields // Sensor and simulation Notes. 1989. No. 321.
12. Oicles J.A., Grant J.R., Herman M.H. Realizing the potential of photoconductive switching for HPM applications // Proc. SPIE. 1995. Vol. 2557. pp. 225–236.
13. Шпак В.Г., Яландин М.И., Шунайлов С.А., Ульмаскулов М.Р. Генерирование мощных сверхширокополосных электромагнитных импульсов субнаносекундной длительности // Известия вузов. Физика, Т. 39, № 12, 1996. С. 119–127.
14. Efanov E.M., Fedorov V.M., Grekhov I.V., Lebedev E.F., Milyaev A.P., Ostashev V.E., Ul'yanov A.V. Multiunit UWB radiator of electromagnetic waves with controlled directional pattern // Proc. 13 Inter. Symposium on High Current Electronics. Tomsk. 2004. pp. 262–266.

15. Romanchenko I.V., Ulmaskulov M.R., Sharypov K.A., Shunailov S.A., Shpak V.G., Yalandin M.I., Pedos M.S., Rukin S.N., Konev V.Y., Rostov V.V. Four-channel high power rf source with beam steering based on nonlinear transmission lines // *Review of Scientific Instruments*, Vol. 88, No. 5, 2017. P. 054703.
16. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Визирь В.А., Ефремов А.М., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Кошелев В.И., Сухушин К.Н. Генератор мощных импульсов сверхширокополосного излучения // *Приборы и техника эксперимента*, № 5, 1997. С. 72–76.
17. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Визирь В.А., Ефремов А.М., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Кошелев В.И., Сухушин К.Н. Генератор гигаваттных импульсов сверхширокополосного излучения // *Приборы и техника эксперимента*, № 2, 2000. С. 82–88.
18. 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.
19. Andreev Y.A., Gubanov V.P., Efremov A.M., Koshelev V.I., Korovin S.D., Kovalchuk B.M., Kremnev V.V., Plisko V.V., Stepchenko A.S., Sukhushin K.N. High-power ultrawideband radiation source // *Laser and Particle Beams*, Vol. 21, No. 2, 2003. pp. 211–217.
20. Andreev Y.A., Buyanov Y.I., Koshelev V.I., Plisko V.V., Sukhushin K.N. Multichannel antenna system for radiation of high-power ultrawideband pulses // *Proc. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4*. 1999. pp. 181-186.
21. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. Москва: Радио и связь, 1989. 192 с.
22. ГОСТ Р 51317.1.5–2009. Москва: Изд-во стандартов, 2009.
23. Federal Communications Commission. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmissions Systems. 2002. http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf.
24. Smith I.D., Morton D.W., Giri D.V., Lackner H., Baum C.E., Marek J.R. Design, Fabrication, and Testing of a Paraboloidal Reflector Antenna and Pulser System for Impulse-Like Waveforms // *Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*. 1995. Vol. 1. pp. 56-64.
25. Giri D.V., Lackner H., Smith I.D., Morton D.W., Baum C.E., Marek J.R., Prather W.D., Scholfield D.W. Design, fabrication, and testing of a paraboloidal reflector antenna and pulser system for impulse-like waveform // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 25, No. 2, 1997. pp. 318–326.

26. Prather W.D., Baum C.E., Lehr J.M., O'Loughlin J.P., Tyo S., Schoenberg J.S.H., Torres R.J., Tran T.C., Scholfield D.W., Gaudet J., Burger J.W. Ultra-wideband source and antenna research // IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 28, No. 5, 2000. pp. 1624-1630.
27. Bowen L.H., Farr E.G., Baum C.E., Tran T.C. Optimization of Impulse Radiating Antennas // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 6. 2003. pp. 281-290.
28. Baum C.E., Baker W., Prather W., Lehr J.M., O'Loughlin J.P., Giri D.V., Smith I.D., Altes R., Fockler J., Abdalla M.D., Skipper M.C. JOLT: A highly directive, very intensive, impulse-like radiator // Proc. IEEE, Vol. 92, No. 2, 2004. pp. 1096–1109.
29. Ryu J., Lee J., Chin H., Yeom J., Kim H., Kwon H., Han S., Choi J. A High Directive Paraboloidal Reflector Antenna for High Far Voltage in an Ultra Wideband Source System // IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 41, No. 8, 2013. pp. 2283–2290.
30. Фортов В.Е., Исаенков Ю.И., Михайлов В.М., Нестеров Е.В., Осташев В.Е., Семенов Ю.В., Строганов В.А. Компактный излучатель мощных электромагнитных импульсов // Радиотехника и электроника, Т. 58, № 11, 2013. С. 1102–1106.
31. Балдыгин В.А., Григорьев И.Н., Крученнов М.Б., Лисицын В.П., Мысин И.А., Никифоров М.Г. Генерация сверхширокополосных и мезополосных импульсов при помощи радиальных формирующих линий // Известия вузов. Физика, Т. 61, № 9/2, 2018. С. 86-90.
32. Karshenas F., Mallahzadeh A.R., Imani A. Modified TEM horn antenna for wideband applications // 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting. 2009.
33. Бирюков В.Л., Ефимова Н.А., Калиничев В.И., Калошин В.А., Пангонис Л.И. Исследование сверхширокополосной кольцевой антенной решетки // Журнал радиоэлектроники, № 1, 2013.
34. Clark R.S., Rinehart L.F., Buttram M.T., Aurand J.F. An overview of Sandia National Laboratories' plasma switched, gigawatt, ultra-wideband impulse transmitter program // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 2. Brooklyn, NY. 1993. pp. 93-98.
35. Agee F.J., Baum C.E., Prather W.D., Lehr J.M., O'Loughlin J.P., Burger J.W., Schoenberg J.S.H., Scholfield D.W., Torres R.J., Hull J.P., Gaudet J.A. Ultra-wideband transmitter research // IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 26, No. 3, 1998. pp. 860 - 873.
36. Fedorov V.M., Grekhov I.V., Lebedev E.F., Milyaev A.P., Ostashov V.E., V. U.A. Active Antenna's Array with Control and Stabilization of Regimes of Synchronizing for UWB Video-Pulses // 14 Symposium on High Current Electronics. Tomsk. 2006. pp. 405-408.

37. McGrath D.T., Baum C.E. Scanning and impedance properties of TEM horn arrays for transient radiation // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 47, No. 3, 1999. pp. 469-473.
38. Осташев В.Е., Ульянов А.В., Федорова В.М. Эффективность преобразования энергии в излучателе сверхширокополосных импульсов // *Радиотехника и электроника*, Т. 65, № 3, 2020. С. 234-239.
39. Банков С.Е., Калошин В.А., Нгуен К.З., К теории сверхширокополосных антенных решеток из TEM-рупоров // *Радиотехника и электроника*, Т. 63, № 7, 2018. С. 702-710.
40. Банков С.Е., Калошин В.А., Ле Н.Т. Исследование характеристик двумерной сканирующей решетки TEM-рупоров с металлизацией междупорного пространства // *Радиотехника и электроника*, Т. 63, № 12, 2018. С. 1263-1276.
41. Калошин В.А., Ле Н.Т. Двумерно-периодическая двухполяризационная сверхдиапазонная антенная решетка // *Радиотехника и электроника*, Т. 64, № 11, 2019. С. 1126-1137.
42. Калошин В.А., Ле Н.Т. Двумерно-периодическая сверхдиапазонная антенная решетка TEM-рупоров с системой питания // *Радиотехника и электроника*, Т. 65, № 10, 2020. С. 979-989.
43. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И., Сухушин К.Н. Элемент сканирующей антенной решетки для излучения мощных сверхширокополосных электромагнитных импульсов // *Радиотехника и электроника*, Т. 44, № 5, 1999. С. 531-537.
44. Godard A., Desrumaux L., Bertrand V., Andrieu J., Lalande M., Jecko B., Couderc V., Brishoual M., Guillerey R. A Transient UWB Antenna Array Used with Complex Impedance Surfaces // *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2010, 2010. P. Article ID 243145.
45. Pécastaing L., Ferron A.S., Couderc V., Shalaby B.M., Négrier R., Lalande M., Andrieu J., Bertrand V. A Pulsed Modulator Combined With Very High PRF Photoconductive Switches to Build a Self-Scanning UWB Radiation Source // *IEEE Transactions On Plasma Science*, Vol. 44, No. 10, 2016. pp. 1894-1901.
46. Macaire S., Catrain A., Tortel S., Joly J., Girard S., Bonnet P., Vian A. Radiated Ultrashort High-Power Electromagnetic Pulses Induce ATP Release in B16F10 Murine Melanoma Cells // *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, No. 7, 2015. pp. 66-74.
47. Hyvernaud J., Reineix G., Negrier R., Andrieu J., Lalande M., Couderc V. Optoelectronic generation of transient waveforms for UWB radars with rejected frequencies // *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Vol. 12, No. 7, 2020. pp. 543-550.

48. Wang S.F., Xie Y.Z. Design and Optimization of High-Power UWB Combined Antenna Based on Klopfenstein Impedance Taper // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 65, No. 12, 2017. pp. 6960-6967.
49. Wang S.F., Xie Y.Z., Qiu Y.X. A compact narrow-width combined antenna for the radiation of the UWB electromagnetic pulses // *Review of Scientific Instruments*, Vol. 92, No. 7, 2021. P. 074701.
50. Mehrdadian A., Forooraghi K. Design and Fabrication of a Novel Ultra-Wideband Combined Antenna // *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, No. 1, 2014. pp. 95-98.
51. Mehrdadian A., Forooraghi K. Design Of A UWB Combined Antenna And An Array Of Miniaturized Elements With And Without Lens // *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 39, 2013. pp. 37-49.
52. Elmansouri M.A., Filipovic D.S. Design of Combined Antennas Using Spherical Modes // *Proceedings of 2014 Antenna application symposium*. 2014.
53. Elmansouri M.A., Filipovic D.S. Miniaturization of TEM Horn Using Spherical Modes Engineering // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 64, No. 12, 2016. pp. 5064-5073.
54. Elmansouri M.A., Filipovic D.S. Ultrawideband Flush-Mounted Antenna // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* , Vol. 16, No. 4, 2017. pp. 1973-1976.
55. Kim J.S., Yoon Y.J., Kwon H.O., Ryu J., J.S. C. A Directive Subminiature Antenna for High-Power Ultrawideband Pulse Radiation // *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, No. 7, 2014. pp. 1565-1568.
56. Kim J.S., Yoon Y.J., J. R. A compact high-power antenna for ultrawideband nanosecond bipolar pulse // *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, No. 6, 2015. pp. 1296-1301.
57. Witenberg A., Walkowiaka M., Małeckib J. Koshelev antenna as an element of the antenna array // *Proc. SPIE*. 2019. Vol. 11055. P. 1105509.
58. Ciattaglia M., Marrocco G. Time Domain Synthesis of Pulsed Arrays // *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, Vol. 56, No. 7, 2008. pp. 1928-1938.
59. Basta N., Dreher A. Beam Synthesis Based on Inverse Discrete Radon Transform for Linear Pulsed Arrays // *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, Vol. 10, 2011. pp. 813-816.
60. Basta N., Antreich F., Dreher A. Synthesis of Pulsed Radiation With a Linear Array of Nonisotropic Antennas // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 62, No. 12, 2014. pp. 6131-6139.

61. 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.
62. Koshelev V.I., Buyanov Y.I., Kovalchuk B.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.
63. 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.
64. 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.
65. 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.
66. Ганстон М.А.Р. Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ. Москва: Связь, 1976. 152 с.
67. Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосная дипольная антенна с резистивными плечами // Радиотехника и электроника, Т. 49, № 4, Апрель 2004. С. 460-465.
68. Кошелев В.И., Плиско В.В. Энергетические характеристики четырехэлементных решеток комбинированных антенн // Известия вузов. Физика, Т. 56, № 8/2, 2013. С. 134-138.
69. Кошелев В.И., Плиско В.В. Структура решеток сверхширокополосных комбинированных антенн // Радиотехника и электроника, Т. 62, № 6, 2017. С. 541-545.
70. 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.
71. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Комбинированная антенна с расширенной полосой пропускания // Радиотехника и электроника, Т. 50, № 5, 2005. С. 585-594.
72. Koshelev V.I., Andreev Y.A., Efremov A.M., Kovalchuk B.M., Plisko V.V., Sukhushin K.N., Liu S. Study on Stability and Efficiency of High-Power Ultrawideband Radiation Source // Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 6, No. 5, 2012. pp. 771-776.
73. 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.

74. 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.
75. Andreev Y.A., Kornienko V.N..L.S. Method for Radiation Center Position Measurements of a Combined Antenna in the Pulsed Mode // Ieee Transactions On Antennas And Propagation, Vol. 66, No. 8, 2018. pp. 4269-4276.
76. Andreev Y.A., Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.M., Petkun A.A., Sukhushin K.N., Zorkaltseva M.Y. A source of high-power pulses of elliptically polarized ultrawideband radiation // Rev. Sci. Instrum., Vol. 85, No. 10, June 2014. pp. 104703-8.
77. Зоркальцева М.Ю., Кошелев В.И., Петкун А.А. Численное моделирование сверхширокополосных комбинированных антенн // Известия вузов. Физика, Т. 60, № 8, 2017. С. 26–30.
78. 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.
79. Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Плиско В.В. Расширение полосы пропускания комбинированной антенны // Доклады 4 Всероссийской научно-технической конференции Радиолокация и радиосвязь. 2010. С. 331-335.
80. 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.
81. 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.
82. 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.
83. 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. Symp. on High Current Electronics. Tomsk. 2008. pp. 447-450.
84. 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.

85. 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.
86. Кошелев В.И., Плиско В.В. Оптимизация структуры решеток сверхширокополосных комбинированных антенн // Доклады II Всероссийской Микроволновой конференции. Москва. 2014. С. 19–14.
87. 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.
88. 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.
89. 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.
90. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. Москва: Советское радио, 1967. 651 с.
91. 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.
92. Romanchenko I.V., Rostov V.V., Gubanov V.P., Stepchenko A.S., Gunin A.V., Kurkan I.K. Sub-gigawatt rf source based on gyromagnetic nonlinear transmission line // Review of Sci. Instrum, Vol. 83, No. 7, 2012. P. 074705.
93. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н. Мощный источник сверхширокополосного излучения с мультимегавольтным эффективным потенциалом // Доклады I Всероссийской Микроволновой конференции. Москва. 2013. С. 197–201.
94. 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.

95. Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.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.
96. 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.
97. 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.
98. 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.
99. 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.
100. 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.
101. Koshelev V.I., Efremov A.M., Kovalchuk B.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.
102. 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.
103. 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.
104. Yankelevich Y., Pokryvailo A. A compact former of high-power bipolar subnanosecond pulses // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 33, No. 4, 2005. pp. 1186–1191.
105. 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.

106. 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.
107. 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.
108. Wales D.J., Doye J.P.K. Global Optimization by Basin-Hopping and the Lowest Energy Structures of Lennard-Jones // *J. Phys. Chem.*, Vol. 101, No. 28, 1997. pp. 5111-5116.
109. Storn R., Price K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces // *Journal of Global Optimization*, Vol. 11, No. 4, 1997. pp. 341–359.
110. Endres S.C., Sandrock C., Focke W.W. A simplicial homology algorithm for Lipschitz optimisation // *Journal of Global Optimization*, Vol. 72, No. 2, 2018. pp. 181–217.
111. Кошелев В.И., Плиско В.В., Севостьянов Е.А. Синтез наносекундных импульсов сверхширокополосного излучения // *Известия вузов. Физика*, Т. 60, № 8, 2017. С. 98-102.
112. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИСЭ СО РАН, д. ф.-м. н.

И.В. Романченко

«16» декабря 2021 г.

СПРАВКА

об использовании результатов работы н. с. Плиско В.В.

Результаты кандидатской диссертации В.В. Плиско, в части касающейся разработки, конструирования и создания многоэлементных решеток комбинированных антенн для мощных источников сверхширокополосного излучения с мегавольтным эффективным потенциалом, использовались при выполнении международных контрактов между ИСЭ СО РАН с одной стороны и данными организациями с другой:

1. Университет Инха (Республика Корея), 2013–2014 гг., контракт № KR-12/12 от 04.02.2013.
2. Сианьский Цзяотун Университет (КНР), 2013–2015 гг., контракт № 13НТ331017 от 17.10.2013.
3. Технологическая компания IRCN (КНР), 2016–2017 гг., контракт № CN-5/16 от 14.03.2016.

Зав. лабораторией высокочастотной электроники, к. ф.-м. н.

Е.В. Балзовский