

На правах рукописи



НГУЕН Куок Зуй

**АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
МАЛОЭЛЕМЕНТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ЛИНЕЙНОЙ
ПОЛЯРИЗАЦИИ С ЦЕЛЬЮ РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ**

Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их
технологии»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Долгопрудный - 2017

Работа выполнена на кафедре радиотехники и систем управления факультета радиотехники и кибернетики (ФРТК) ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ) Министерства образования и науки Российской Федерации

Научный руководитель **Калошин** Вадим Анатольевич
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты **Усков** Григорий Константинович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры электроники ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Овчинникова Елена Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики, антенн и микроволновой техники ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация АО «Концерн радиостроения «ВЕГА», (Москва)

Защита состоится «29» сентября 2017 г., в 12-00, на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте: <http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Nguen/index.html>

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета доктор
физико-математических наук



Потапов
Александр Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Теория и практика сверхширокополосных (СШП) антенн в последнее время интенсивно развивается. Это объясняется соответствующим развитием СШП радиолокации и связи, измерительной техники. Уже давно разработаны СШП приемники и синтезаторы частот, однако антенны остаются «узким» местом. К настоящему времени разработаны излучатели с полосой рабочих частот более 1:100 [1, 2], которые в определенной степени снимают проблему. Однако в СШП радиолокации и связи часто возникает необходимость использования антенн с большим коэффициентом усиления (КУ), который не может быть обеспечен известными СШП излучателями, особенно на нижних частотах.

Существуют хорошо известные пути повышения усиления. Первый – применение квазиоптической схемы с линзой или зеркалом. Такой подход был использован в работах [3, 4], однако он приводит к значительному увеличению габаритов и веса антенны. Второй подход – использование антенных решеток, кроме увеличения усиления, дает возможность электрического управления положением луча, радиопеленгования [5] и т.д. К настоящему времени создан и исследован экспериментальный образец кольцевой антенной решетки с рабочей полосой порядка 1:100 [6]. Для реализации большего усиления можно использовать двумерные (плоские и цилиндрические) антенные решетки. Результаты исследований плоских СШП решеток показали возможность реализации полосы рабочих частот 1:10 [7, 8]. В работе [9] показана возможность согласования цилиндрической решетки в диапазоне частот 1:100, однако ее диаграмма направленности имеет однолепестковый характер только в низкочастотной части диапазона. В результате рабочая полоса частот решетки также не превышает 1:10. Однако, при создании многодиапазонных антенн, измерительной техники, для высококачественного излучения и приема видеоимпульсных сигналов и т.д. возникает необходимость реализации большей полосы частот. Кроме того, часто возникает задача расширения полосы антенных решеток, на конструкцию которых и габариты наложены ограничения, в связи с чем, их полоса рабочих частот существенно меньше, чем 1:10.

Таким образом, исследование возможностей расширения полосы частот СШП антенных решеток является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование возможностей расширения полосы рабочих частот СШП малоэлементных антенных решёток линейной поляризации.

Достижение поставленной цели потребовало **решения следующих задач:**

– разработка и исследование СШП делителей мощности;

– исследование и оптимизация параметров всенаправленных в Н - плоскости СШП коллинеарных антенных решеток биконических, цилиндро - конических и поликонических элементов;

– исследование и оптимизация всенаправленных в Н-плоскости СШП печатных линейных решеток;

– исследование линейных антенных решеток биконических и ТЕМ рупоров различных типов;

– исследование плоских антенных решеток ТЕМ рупоров различных типов;

– исследование цилиндрических антенных решеток биконических и ТЕМ рупоров различных типов;

– измерение характеристик экспериментальных образцов решеток.

Методы исследования. В работе использован численный и физический эксперимент. При численном моделировании использованы программные средства на основе метода конечных элементов (МКЭ), метода конечных разностей во временной области (МКРВО), а также программная реализация метода Бубнова - Галеркина в среде Матлаб. В рамках физического эксперимента проведены измерения характеристик согласования и излучения решеток в безэховой камере.

Новые научные результаты:

В диссертационной работе получены следующие научные результаты:

– Предложен и исследован трехканальный коллинеарный СШП синфазный равноамплитудный делитель-сумматор мощности.

– Исследованы и оптимизированы коллинеарные СШП антенные решетки биконических элементов. Показано, что в синфазном режиме полоса рабочих частот более 1:25.

– Предложены, исследованы и оптимизированы решетки симметричных и несимметричных цилиндро - конических и поликонических элементов диаметром менее $1/3$ максимальной длины волны, при этом решетки двух элементов в полосе более 70% имеют КУ более 3 дБ, а трехэлементные имеют КУ более 4 дБ в полосе более 60%.

– Предложены, исследованы и оптимизированы всенаправленные в магнитной плоскости СШП антисимметричные линейные решетки печатных диполей с неравномерностью КУ в магнитной плоскости менее 1.5 дБ - у двухэлементной решетки и менее 1 дБ – у четырехэлементной решетки.

– Исследованы линейные антенные решетки биконических и ТЕМ рупоров различных типов, показана возможность реализации полосы частот в синфазном режиме более 1:25.

– Исследованы цилиндрические антенные решетки биконических и ТЕМ рупоров различных типов, показана возможность реализации полосы частот в синфазном режиме более 1:10.

– Исследованы плоские антенные решетки ТЕМ рупоров различных типов, показана возможность реализации полосы частот в синфазном режиме более 1:10

– Исследован эффект большого заднего излучения в плоских антенных решетках из ТЕМ рупоров и пути его подавления.

Практическая значимость работы

Результаты работы, имеющие практическую значимость:

– показана возможность реализации линейных, плоских и цилиндрических антенных решеток с полосой рабочих частот более 1:10.

– разработан и изготовлен экспериментальный образец всенаправленной в Н – плоскости СШП линейной антенной решетки двух цилиндро – конических элементов с коэффициентами усиления 2.8 - 5 дБ в полосе 3 – 5.3 ГГц.

– разработан и изготовлен экспериментальный образец всенаправленной в Н – плоскости СШП антенной решетки двух печатных диполей, обеспечивающий коэффициент усиления 2.3 - 5 дБ и неравномерность в Н – плоскости менее 1.5 дБ в полосе частот 2.45 – 5.1 ГГц.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показана возможность реализации сверхдиапазонных (полоса частот более 1:10) синфазных линейных, в том числе коллинеарных, плоских и цилиндрических решеток.
2. Показана и экспериментально подтверждена возможность реализации коллинеарных решеток двух цилиндро - конических элементов диаметром менее $1/3$ максимальной длины волны с усилением более 3 дБ в полосе более 70%.
3. Показана возможность реализации коллинеарных решеток трех поликонических элементов диаметром менее $1/3$ максимальной длины волны и усилением более 4 дБ в полосе более 60%.
4. Показана и экспериментально подтверждена возможность реализации антисимметричной решетки двух печатных диполей с усилением 2.3 - 5 дБ и неравномерностью усиления в Н - плоскости менее 1.5 дБ в 70% полосе частот.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались: на II Всероссийской Микроволновой конференции, г. Москва 2014 г.; IV Всероссийской Микроволновой конференции, г. Москва, 2016 г.; 26-ой Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2016 г.; Научно - технической конференции

«Актуальные направления развития теории и техники антенно-фидерных устройств», г. Москва, 8 декабря 2016 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 4 - в трудах Международных и Всероссийских конференций. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составил 85 страниц.

Личный вклад. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: построение электродинамических моделей с использованием программных продуктов на основе прямых численных методов (МКЭ и МКРВО), программная реализация метода Бубнова - Галеркина в среде Матлаб, проведение исследований и оптимизации параметров СШП антенных решеток с использованием численного моделирования, проведение физических экспериментов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и Списка литературы из 121 наименований. Основная часть работы изложена на 128 страницах, содержит 141 рисунок и одну таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, описаны научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, приведены сведения об апробации работы и положения, выносимые на защиту. Основная часть диссертации состоит из четырех глав.

В первой главе сделан обзор основных типов СШП излучателей линейной поляризации, а также методов моделирования и оптимизации их параметров. Рассмотрены как объемные конструкции, так и печатные. К первым относятся всевозможные варианты рупоров: биконические, поликонические, регулярные и нерегулярные ТЕМ рупоры, различные варианты рупора Н - образного сечения и петлевого ТЕМ рупора. Из печатных излучателей рассмотрены: нерегулярные щелевые излучатели, логопериодические излучатели, различные варианты печатных диполей и монополей. Кроме известных ТЕМ рупоров с возрастающей к апертуре скоростью расширения стенок (далее рупор 1-го типа), рассмотрен ТЕМ рупор 2 -го типа (рис. 1).

В диссертации использованы, главным образом, прямые численные методы электродинамического моделирования: конечных элементов (МКЭ) и конечных разностей во временной области (МКРВО), а также метод решения интегральных уравнений Крылова-Боголюбова, собственных волн и матриц рассеяния. Приближенные методы (длинной линии, поперечных сечений, асимптотическая

теория дифракции на открытом конце рупора) используются для предварительной оценки характеристик и оптимизации параметров излучателей.

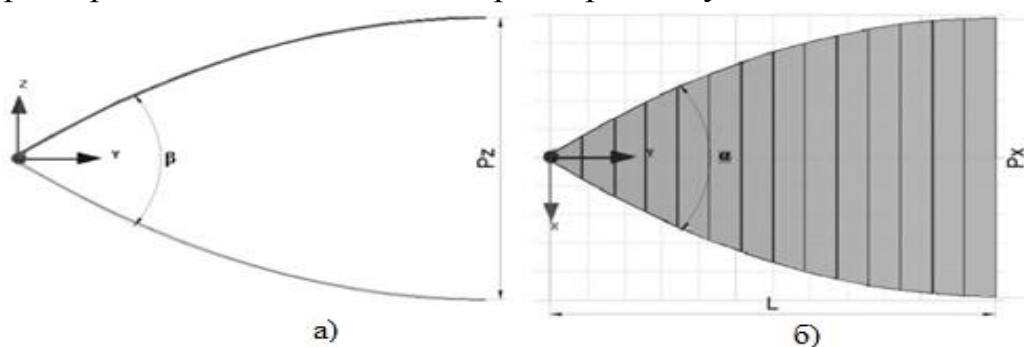


Рис. 1. Нерегулярный ТЕМ рупор 2-го типа: (а) – сечение в Е - плоскости, (б) – сечение в Н - плоскости

Во второй главе рассмотрены всенаправленные в Н-плоскости СШП антенные решетки.

В разделе 2.1 рассмотрены печатные решетки двух и четырех диполей. Проведено исследование и оптимизация параметров решеток с целью реализации максимальной полосы согласования и усиления при минимальной неравномерности диаграммы направленности в магнитной плоскости. Полученные в результате оптимальные геометрические размеры решетки двух печатных диполей показаны на рис. 2а, на рис. 2б показан экспериментальный образец этой решетки, а на рис. 2в – решетка четырех печатных диполей. Результаты численного моделирования зависимости коэффициента отражения от частоты приведены рис. 3 сплошной линией для двухэлементной решетки и пунктирной - для четырехэлементной решетки. Штриховой линией на рисунке показан результат измерения коэффициента отражения экспериментального образца.

На рис. 4 сплошной и пунктирной линиями показаны частотные зависимости, соответственно, максимального и минимального в Н - плоскости КУ двухэлементной решетки; штриховой и штрих - пунктирной – результаты измерений соответствующих характеристик экспериментального образца, длинной штриховой и длинной штрих - пунктирной – соответствующие зависимости четырехэлементной решетки.

На рисунках 3, 4 видно, что в 70% полосе согласования (2.45 – 5.1 ГГц) двухэлементная решетка имеет КУ 2.3 – 5 дБ и неравномерность диаграммы направленности в Н - плоскости менее 1.5 дБ, а четырехэлементная решетка в 60% полосе (2.85 – 5.2 ГГц) имеет КУ 5 – 8 дБ и неравномерность диаграммы направленности в Н - плоскости – менее 1 дБ.

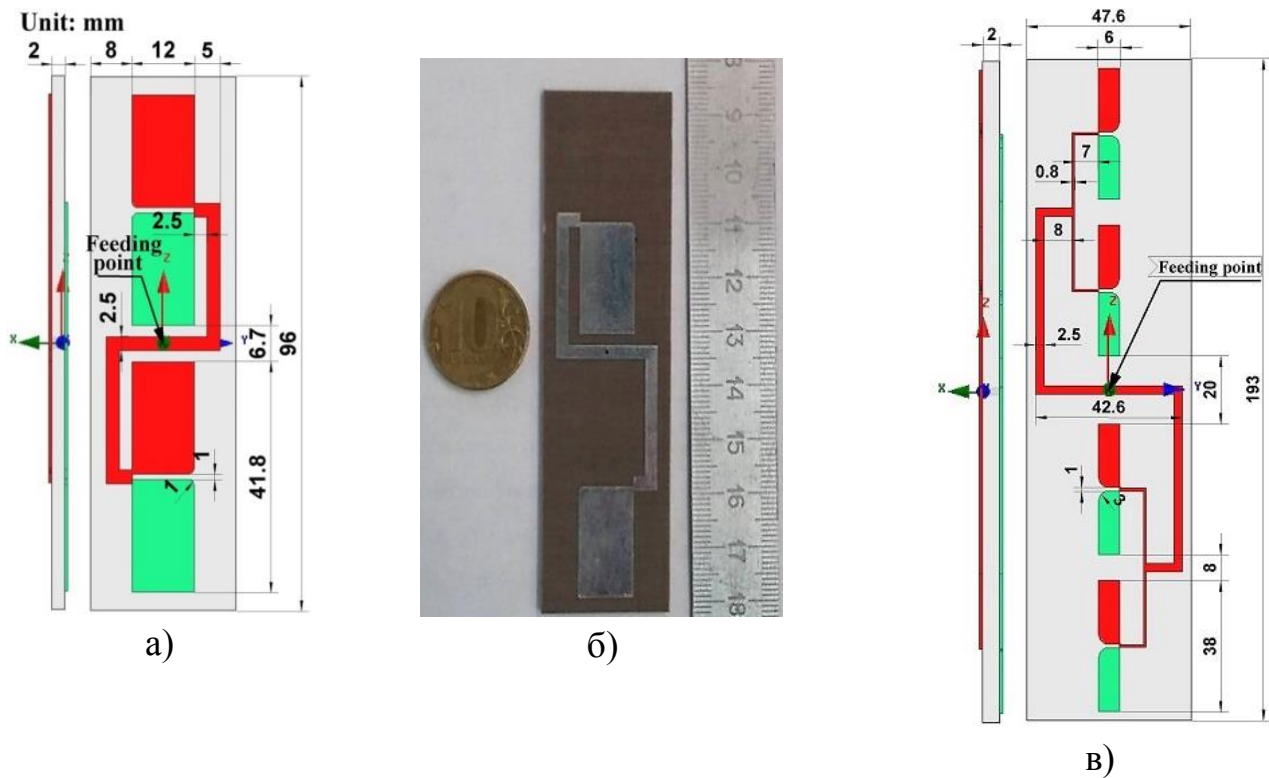


Рис. 2. Двухэлементная решетка (а), экспериментальный образец (б) и четырёхэлементная решетка (в)

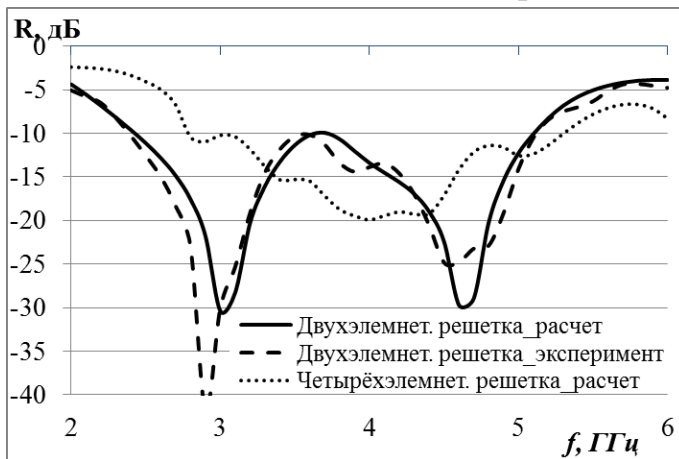


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения антенных решеток от частоты

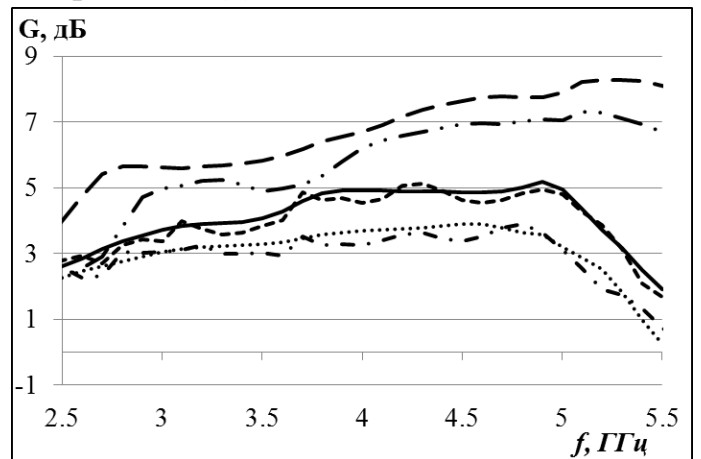


Рис. 4. Зависимости усиления антенных решеток от частоты

В разделе 2.2. проведено исследование и оптимизация параметров двухканального и предложенного в работе трехканального коллинеарного СШП синфазного делителя мощности.

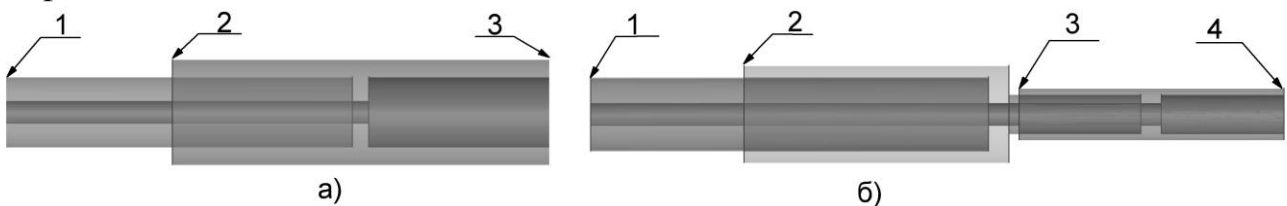


Рис. 5. Двухканальный (а) трехканальный (б) делители мощности

Двухканальный делитель мощности (рис. 5а) содержит вход (1) с волновым сопротивлением 50 Ом и два выхода (2, 3) с волновыми сопротивлениями 25 Ом, которые обеспечивают равномерное деление мощности на выходе с амплитудой -3 дБ. Трехканальный делитель мощности (рис. 5б) содержит три выхода (2, 3, 4) с волновыми сопротивлениями 16.6 Ом, которые обеспечивают равномерное деление мощности на выходе с амплитудой -4.8 дБ. Исследованные делители используются для питания коллинеарных антенных решеток.

В разделе 2.3 рассмотрены СШП коллинеарные антенные решетки двух цилиндро – конических элементов. Построены электродинамические модели элементов и антенных решеток, проведено исследование и оптимизация их параметров по критерию максимальной полосы и КУ. Рассмотрены два типа решеток: решетки двух симметричных цилиндро – конических элементов (рис. 6а) для работы вдали от земли и с одним симметричным и одним несимметричным элементом - для работы вблизи земли (рис.6б), которая моделируется металлическим диском. В качестве проверки результатов численного эксперимента на рис. 7, 8 приведены результаты физического эксперимента для коллинеарной решетки двух симметричных цилиндро – конических элементов.

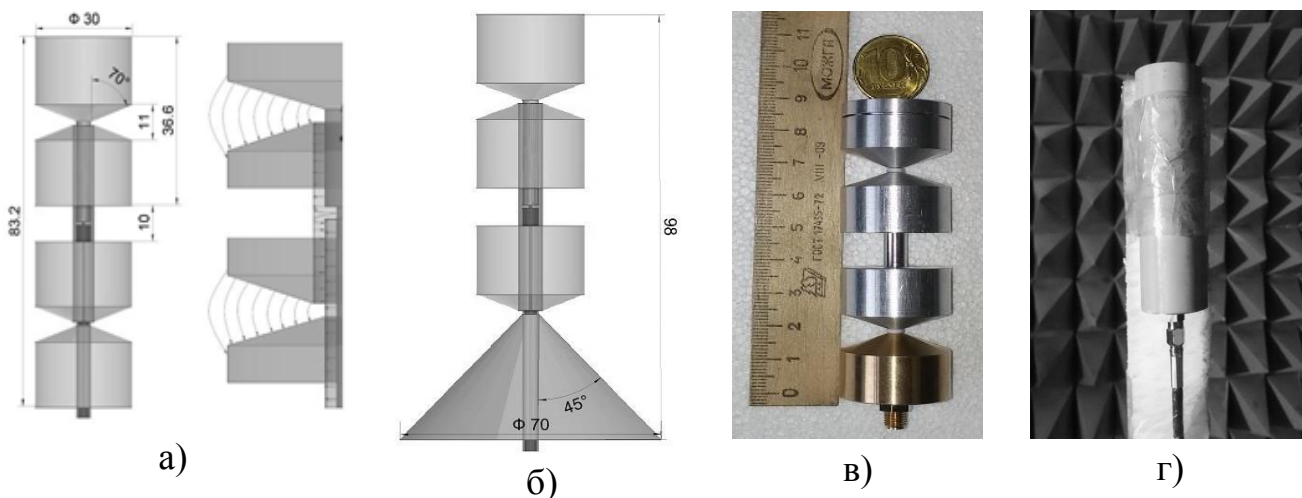


Рис. 6. а) решетка симметричных элементов, б) решетка с несимметричным элементом, в) образец без обтекателя, г) образец с обтекателем в безэховой камере

На рис. 7 сплошной кривой показана рассчитанная зависимость коэффициента отражения от частоты экспериментального образца решетки симметричных элементов (рис. 6в, г) с использованием МКЭ; а пунктирной – результат измерения. В тех же обозначениях на рис. 8 показаны частотные зависимости рассчитанного и измеренного КУ решетки.

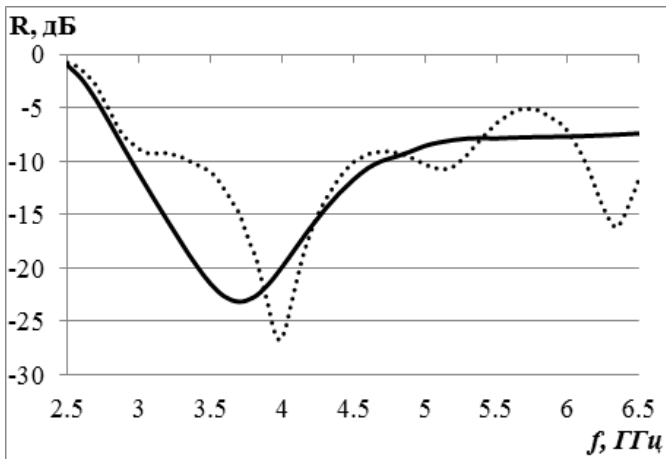


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения решетки от частоты

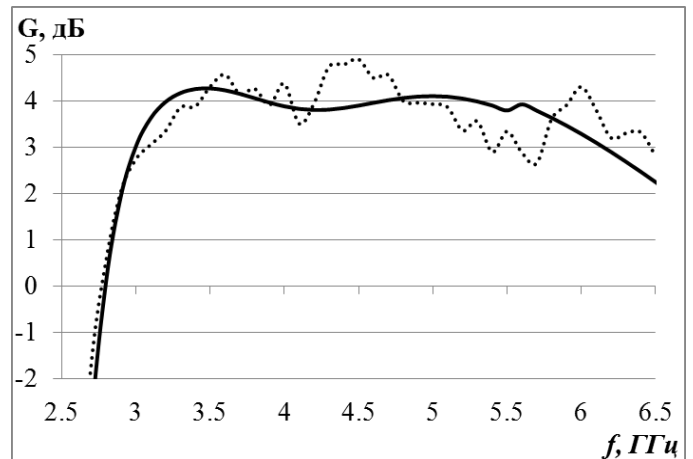


Рис. 8. Зависимость усиления решетки от частоты

В разделах 2.4.1, 2.4.2 рассмотрены СШП антенные решетки двух и трех поликонических элементов, соответственно. Решетки исследованы и оптимизированы по критерию максимальной полосы и усиления для работы вдали от земли (рис. 9а, 10а), и вблизи земли (рис. 9б, 10б).

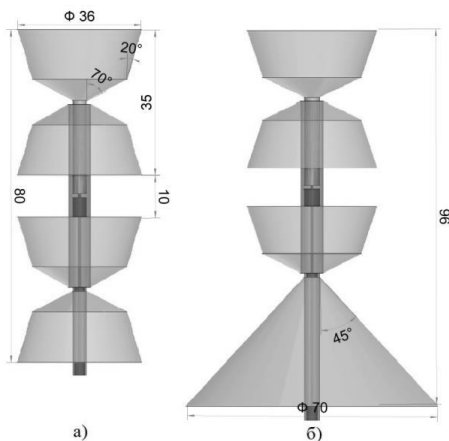


Рис. 9. Решетки двух поликонических элементов

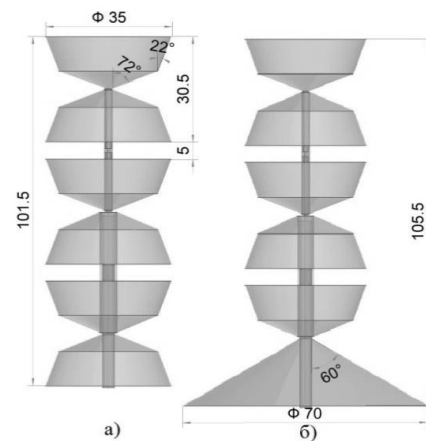


Рис. 10. Решетки трех поликонических элементов

На рис. 11 показана зависимость коэффициента отражения от частоты антенных решеток трех поликонических элементов. Сплошной линией показан коэффициент отражения антенной решетки трех симметричных поликонических элементов в свободном пространстве, рассчитанный МКЭ; пунктирной – такой же антенной решетки, рассчитанный МКРВО; штриховой – такой же антенной решетки на металлическом диске диаметром 200 мм, рассчитанный МКЭ, а штрих - пунктирной – антенной решетки с одним несимметричным элементом на металлическом диске диаметром 200 мм, рассчитанный МКЭ. На рис. 12 в тех же обозначениях приведена зависимость КУ от частоты антенных решеток трех поликонических элементов.

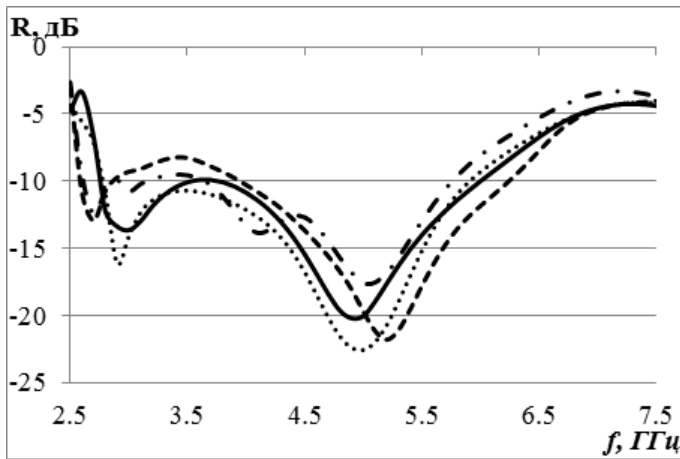


Рис. 11. Коэффициенты отражения решетки трех поликонических элементов

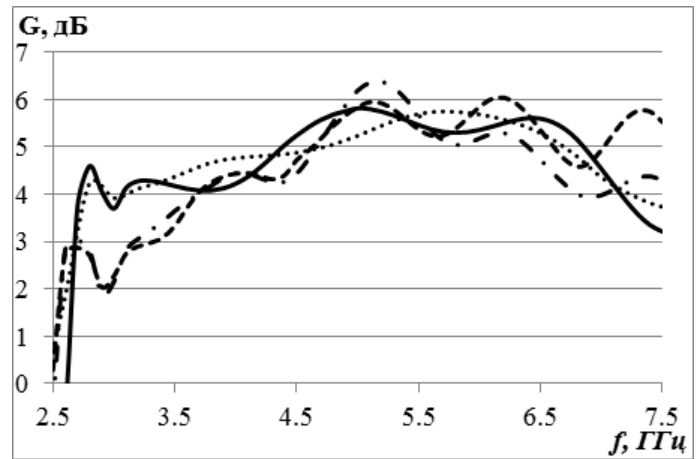


Рис. 12. Зависимость усиления решетки трех поликонических элементов от частоты

В разделе 2.5 исследованы возможности реализации сверхдиапазонного режима работы коллинеарной решетки биконических элементов (рис. 13). Параметры биконических элементов решетки были выбраны из условия максимума полосы согласования. Угол образующей биконуса $\beta = 82^\circ$, радиус $R = 142.3$ мм, период решетки - 40 мм. Результаты расчета с использованием МКЭ зависимости коэффициента отражения от частоты синфазной решетки n биконических излучателей показаны на рис. 14 пунктирной линией для $n = 3$; штриховой – $n = 6$; длиной штриховой – $n = 9$; длиной штрих - пунктирной – $n = 12$; длиной штрих - двойной пунктирной – бесконечной решетки, а сплошной линией - при $n = 1$. На рис. 14 видно, что нижняя частота согласования решетки 3 биконических излучателей – 0.65 ГГц, решетки 6 биконических излучателей – 0.38 ГГц, решетки 9 биконических излучателей – 0.36 ГГц, решетки 12 биконических излучателей – 0.34 ГГц, а бесконечной решетки – 0.2 ГГц. Нижняя частота согласования одного биконического излучателя в свободном пространстве: 2.85 ГГц. Видно, что увеличение числа элементов приводит к монотонному понижению нижней частоты согласования решетки.

Далее исследованы характеристики сканирования бесконечной, 6-элементной и 9-элементной решетки биконических элементов. Показано, что 6-элементная и 9-элементная решетки обеспечивают сканирование в секторе углов 90° в полосе частот 1:9. При этом КУ 9-элементной решетки практически не падает даже при больших углах отклонения, что объясняется приближением к режиму осевого излучения.

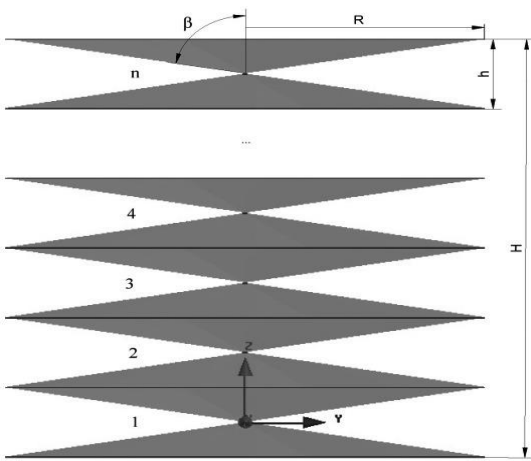


Рис. 13. Коллинеарная решетка биконических элементов

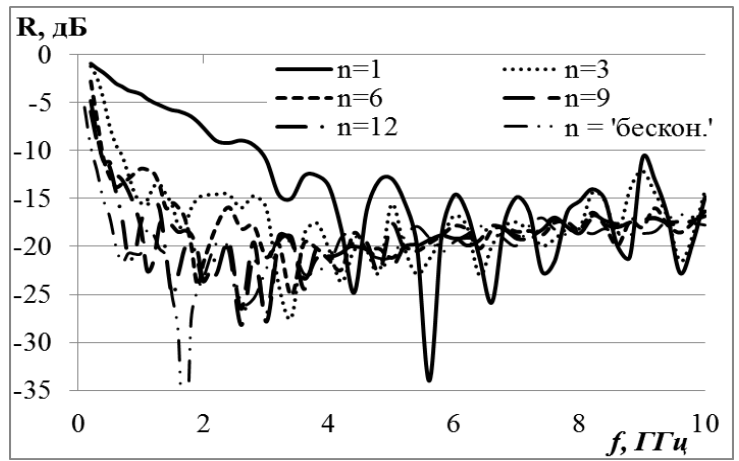


Рис. 14. Зависимости коэффициентов отражения синфазных решеток биконических элементов от частоты

В третьей главе исследованы E - плоскостные линейные антенные решетки ТЕМ рупоров двух типов: биконических и ТЕМ рупоров.

В разделе 3.1 рассмотрены линейные решетки биконических ТЕМ рупоров в виде вырезки из биконической линии. Рассмотрены решетки 180 – градусных, 120 – градусных и 90 – градусных вырезок (рис. 15). В разделе 3.1.1 с использованием МКЭ и МКРВО проведены исследования частотных характеристик отражения бесконечной решетки, а также 6-элементной решетки описанных выше биконических ТЕМ рупоров. Результаты численного моделирования показали, что бесконечная решетка 180-градусных элементов согласована от частоты 0.26 ГГц, 120-градусных элементов – от 0.33 ГГц, 90-градусных элементов – от 0.35 ГГц. Синфазная решетка шести 180-градусных элементов согласована от частоты 0.45 ГГц, а 120- и 90-градусных элементов – от 0.55 ГГц.

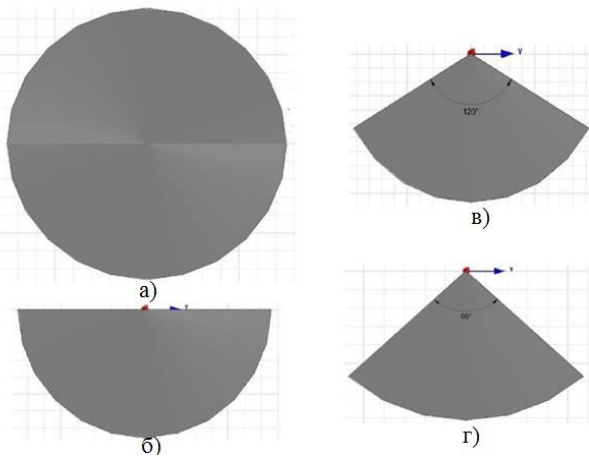


Рис. 15. Сечения биконических ТЕМ рупоров в H-плоскости

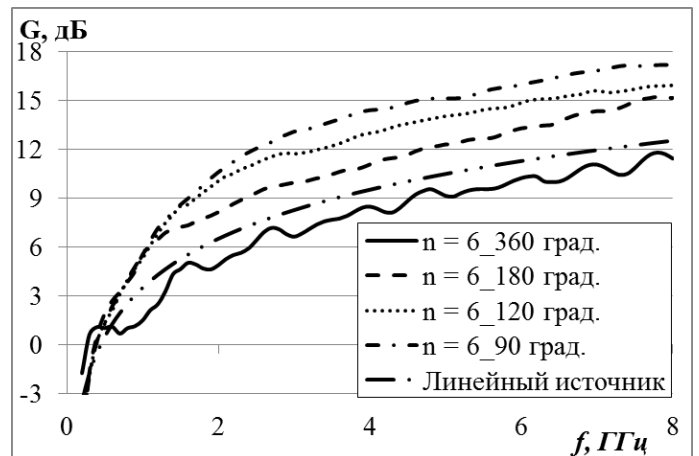


Рис. 16. Зависимости усиления 6-элементных решеток от частоты

Далее с использованием МКЭ и МКРВО проведены исследования характеристик излучения 6-элементных решеток, в том числе диаграмм направленности в двух плоскостях, частотной зависимости КУ, отношения уровней излучения вперед - назад. На рис. 16 сплошной линией показана частотная зависимость КУ синфазной решетки шести биконических элементов; короткой штриховой – 180-градусных элементов; пунктирной – 120-градусных; штрих - пунктирной – 90-градусных. Штрих - двойной пунктирной линией показана аналогичная зависимость для синфазного линейного источника той же длины с равномерным амплитудным распределением. Видно, что последняя кривая близка к сплошной кривой на рисунке, что говорит о высоком коэффициенте использования поверхности (КИП) решетки шести биконических элементов.

В разделе 3.2 исследованы линейные решетки ТЕМ рупоров различных типов. На первом этапе было проведено исследование согласования бесконечных синфазных линейных решеток. Путем введения эквивалентных граничных условий (условий Флоке) задача сводилась к исследованию одного периода. Результаты расчета двумя методами показали, что бесконечная синфазная линейная решетка из регулярных ТЕМ рупоров согласована, начиная с частоты 0.5 ГГц, бесконечная синфазная линейная решетка из нерегулярных ТЕМ рупоров 1-го типа – с 0.7 ГГц, а бесконечная синфазная линейная решетка из нерегулярных ТЕМ рупоров 2-го типа – с 0.45 ГГц. Далее исследованы решетки с конечным числом регулярных и нерегулярных ТЕМ рупоров 2-го типа. Были проведены расчеты частотной характеристики коэффициента отражения синфазных решеток ТЕМ рупоров в зависимости от числа элементов. Результаты расчетов показали, что нижняя частота согласования синфазной линейной решетки 3-х регулярных ТЕМ рупоров – 1.1 ГГц, решетки 6 рупоров – 0.7 ГГц, 9 рупоров – 0.57 ГГц, 12 рупоров – 0.5 ГГц. Нижняя частота согласования одиночного ТЕМ рупора в свободном пространстве - 2.1 ГГц. Нижняя частота согласования синфазной линейной решетки 3-х нерегулярных ТЕМ рупоров 2-ого типа – 1.4 ГГц, 6 рупоров – 0.6 ГГц, 9 рупоров – 0.55 ГГц, 12 рупоров – 0.5 ГГц. Нижняя частота согласования одиночного рупора - 2.4 ГГц. Таким образом, увеличение числа элементов приводит к монотонному понижению нижней частоты согласования синфазной решетки, причем для 12- элементной линейной синфазной решетки регулярных ТЕМ рупоров она очень близка к нижней частоте согласования бесконечной линейной решетки. Далее проведено исследование характеристик излучения 6-элементной синфазной решетки.

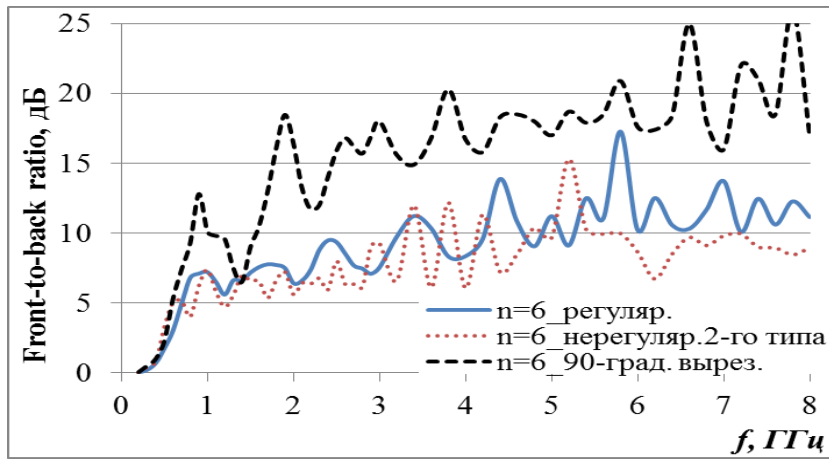


Рис. 17. Зависимость отношения вперед / назад синфазных решеток от частоты

На рис. 17 сплошной кривой показана зависимость отношения уровней излучения вперед / назад от частоты 6-элементной решетки регулярных ТЕМ рупоров, пунктирной – нерегулярных ТЕМ рупоров 2-го типа, штриховой - 90-градусных биконических ТЕМ рупоров. Видно, что эта величина сначала растет с частотой, а затем для решетки ТЕМ рупоров стабилизируется на уровне около - 10 дБ, а для решетки 90-градусных вырезов - на уровне около - 20 дБ. Увеличенный уровень заднего излучения линейной решетки ТЕМ рупоров можно объяснить возбуждением обратной волны между элементами, что подробнее обсуждается в следующей главе.

Исследования характеристик сканирования ограничены решеткой регулярных ТЕМ рупоров. При отклонении луча на $\pm 15^\circ$ нижняя граница согласования бесконечной решетки (0.5 ГГц) практически не меняется. При угле отклонения луча на $\pm 30^\circ$ и $\pm 45^\circ$ нижняя граница согласования сдвигается вверх по частоте до 0.6 ГГц и 0.8 ГГц, соответственно. При отклонении луча на $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$ и $\pm 45^\circ$ нижняя граница согласования решетки 6 элементов регулярных ТЕМ рупоров сдвигается вверх по частоте (до 0.8 ГГц, 0.9 ГГц и 1 ГГц, соответственно). Верхняя граница полосы согласования 6-элементной линейной решетки при этом ограничивается резким ростом уровня бокового излучения при 5 ГГц.

В четвертой главе исследованы двумерно - периодические решетки.

В разделе 4.1 проведено исследование взаимного влияния линейных подрешеток в составе цилиндрических решеток (рис. 18). На рис. 19 сплошной линией показана рассчитанная МКЭ зависимость коэффициента отражения от частоты подрешетки 180-градусных элементов в свободном пространстве, а пунктирной – в составе цилиндрической решетки; штриховой – подрешетки 180-градусных элементов в свободном пространстве, а штрих – пунктирной – в составе цилиндрической решетки, рассчитанные МКРВО. На рис. 19, видно, что взаимная

связь в цилиндрической решетке слабо влияет на характеристики согласования подрешетки 180-градусных элементов (нижняя граница согласования подрешетки 0.55 ГГц оказывается выше на 0.1 ГГц по сравнению с 6-элементной синфазной линейной решеткой).

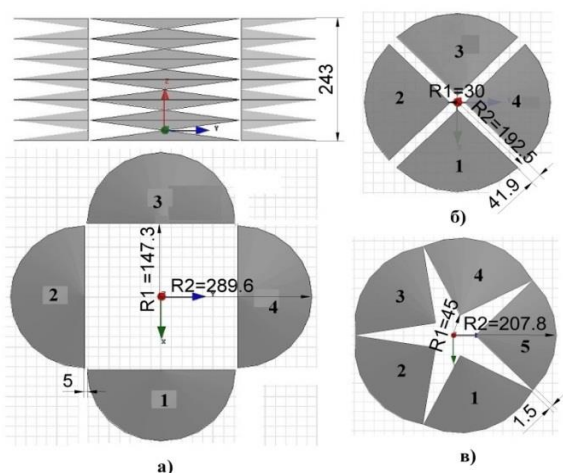


Рис. 18. Цилиндрические антенные решетки

Характеристики излучения подрешеток в составе этой решетки также мало меняются. У цилиндрических решеток 4-х и 5-и 90-градусных элементов из-за взаимодействия также увеличивается нижняя частота согласования. При этом взаимная связь подрешеток в составе цилиндрической решетки пяти 90-градусных элементов влияет более сильно и приводит к рассогласованию подрешетки в полосе частот 0.9 – 1.1 ГГц.

В разделе 4.2 проведено исследование плоских двумерно - периодических решеток ТЕМ рупоров (решетка 1, рис. 20) и решеток с металлизацией части межрупорного пространства (решетка 2, рис. 21).

Показано, что обе бесконечные синфазные решетки по уровню -10 дБ согласованы во всей исследованной полосе частот (0.2 – 8 ГГц), т.е. полоса согласования составляет более 1:40. Синфазные 36-элементные решетки согласованы в полосе частот более 1:10. Отношение вперед / назад синфазных решеток растет с частотой, а затем стабилизируется на уровне около 7.5 дБ. Далее проведено исследование характеристик сканирования. Бесконечная решетка 1 сканирует в секторе углов 90 градусов в Е плоскости и 30 градусов - в Н плоскости без уменьшения полосы частот, в том числе при сканировании в двух плоскостях. Бесконечная решетка 2 обеспечивает ту же полосу при сканировании в секторе 60 x 60 градусов.

Дальше исследованы характеристики согласования и излучения сканирующих решеток 6x6 элементов. При сканировании в Е – плоскости нижняя граница

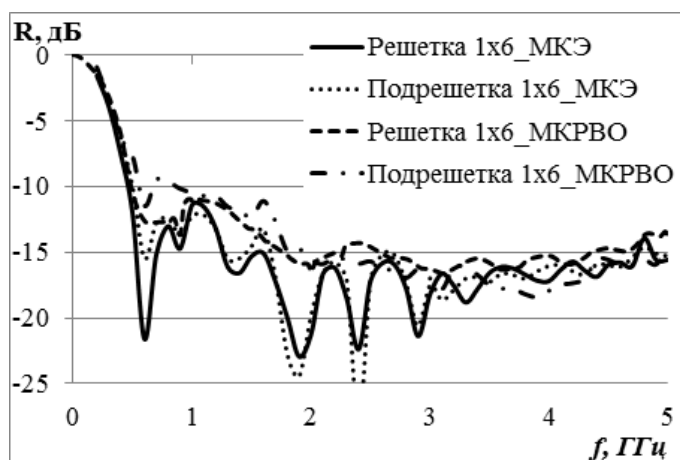


Рис. 19. Зависимость коэффициента отражения подрешеток 180-градусных элементов от частоты

полосы согласования решетки 1 сдвигается вверх по частоте и при углах отклонения луча от нормали $\pm 45^\circ$ полоса рабочих частот решетки сужается до 1:5. При этом усиление практически не падает, нормированный уровень заднего лепестка падает до -14 дБ (при отклонении на $\pm 45^\circ$), уровень боковых лепестков при этом – 13 дБ. При сканировании в Н – плоскости нормированный уровень заднего лепестка не падает. При сканировании в Н – плоскости нижняя граница согласования 36-элементной решетки 2 практически не меняется. При углах сканирования Н – плоскости $\pm 45^\circ$ наблюдается резкий рост уровня боковых лепестков и падение КУ решетки.

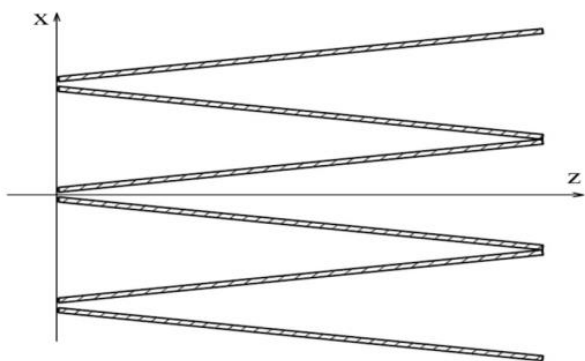


Рис. 20. Решетка регулярных ТЕМ рупоров

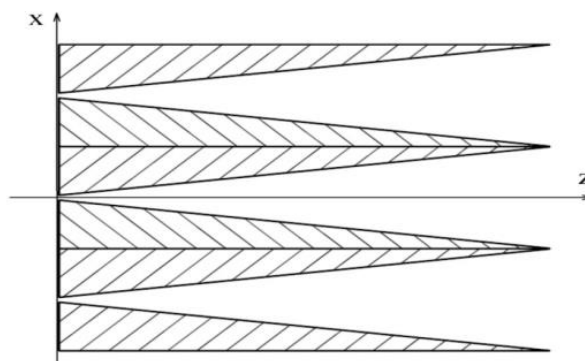


Рис. 21. Решетка ТЕМ рупоров с металлизацией

Далее на модели бесконечной плоской синфазной решетки ТЕМ рупоров детально исследован эффект аномально большого заднего излучения. Введением эквивалентных граничных условий задача сведена к анализу периода решетки (канала Флоке), на границах которого установлены электрические и магнитные стенки. На первом этапе эффект изучается путем электродинамического моделирования с использованием МКЭ. На втором этапе с использованием интегрального уравнения, методов Бубнова - Галеркина, связанных волн и матриц рассеяния строится численно-аналитическая теория, которая далее используется для исследования возможности уменьшения заднего излучения.

На рис. 22 кривыми 1, 2, 3, соответственно, показаны коэффициент отражения и амплитуды обратной и прямой волн в каналах Флоке в зависимости от частоты, рассчитанные с использованием численно-аналитической модели решетки 1 с параметрами: периоды $P_x = 41.5$ мм, $P_y = 56$ мм, длина рупора $L = 150$ мм. Кривыми 4, 5, 6 показаны аналогичные зависимости, рассчитанные с использованием МКЭ. Как видно на рисунке амплитуда обратной волны весьма велика, что объясняет большую величину заднего излучения решетки. Причиной является возбуждение и почти полное преобразование в обратные волн межрупорного пространства. В связи с этим далее была исследована решетка 2 с металлизацией части межрупорного пространства. Результаты расчета с использованием численно-

аналитической теории и МКЭ коэффициента отражения и амплитуд обратной и прямой волн канала Флоке в зависимости от частоты приведены на рис. 23 в тех же обозначениях, как и на рис. 22. Видно, что амплитуда обратной волны решетки 2 мало отличается от соответствующей величины решетки 1. Иными словами, металлизация межэлементного пространства не позволяет подавить возбуждение обратной волны и, соответственно, заднего излучения в решетке ТЕМ рупоров. Однако такое подавление возможно путем увеличения длины рупора. На рис. 24 показаны соответствующие характеристики решетки 1, а на рис. 25 – решетки 2 с параметрами: $P_x = 20.1$ м, $P_y = 21.6$ мм, $L = 250$ мм. Как видно на рисунках, удлинение рупора уменьшает амплитуду обратной волны, но приводит к некоторому увеличению коэффициента отражения.

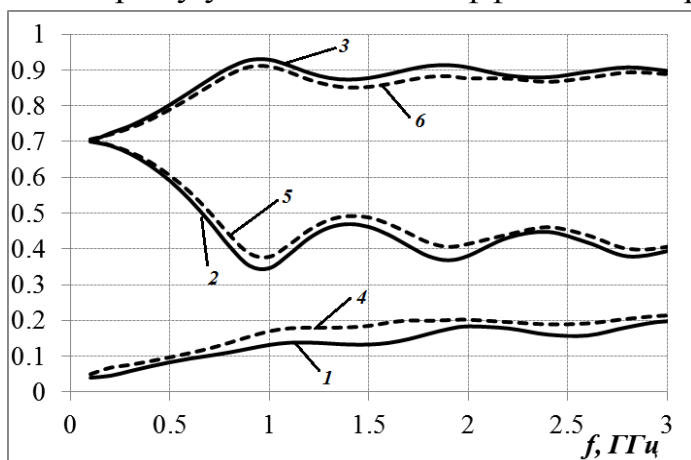


Рис. 22. Амплитуды волн в решетке 1

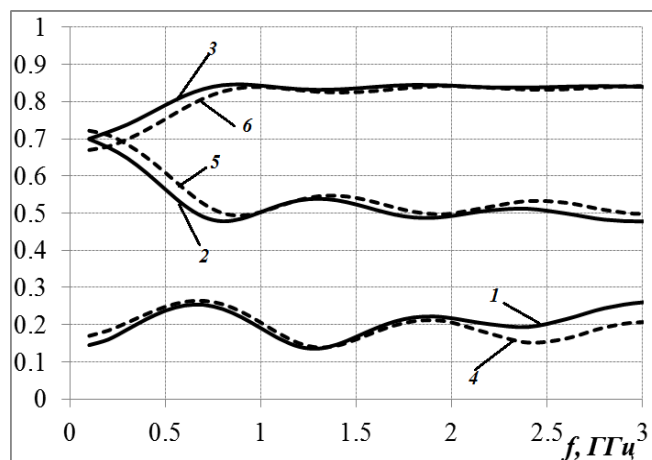


Рис. 23. Амплитуды волн в решетке 2

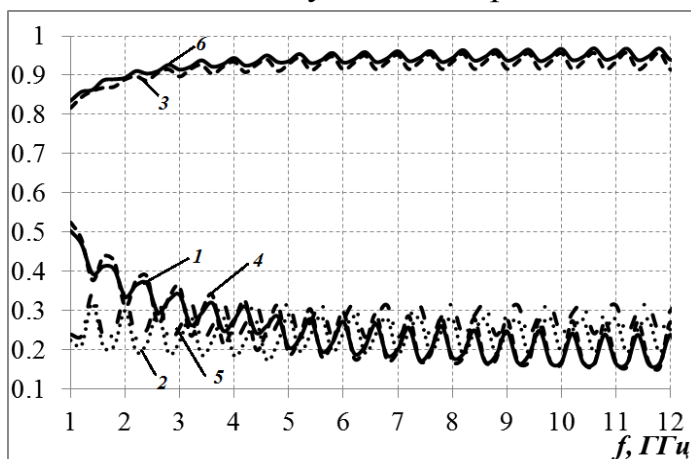


Рис. 24. Амплитуды волн в решетке 1

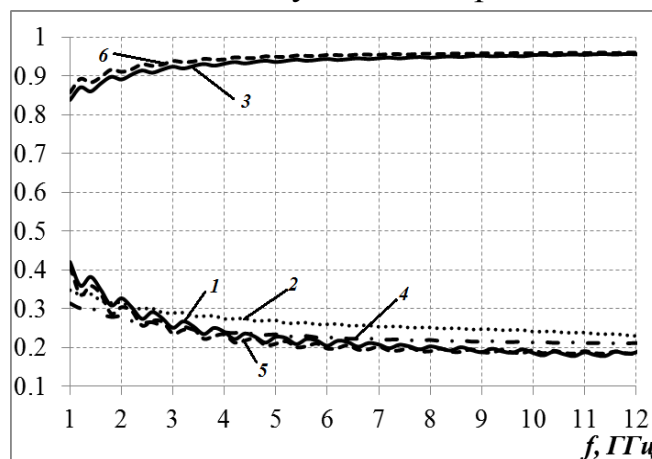


Рис. 25. Амплитуды волн в решетке 2

В Заключение проведен анализ результатов диссертации в целом и сделаны общие выводы и рекомендации.

1. Несмотря на то, что результаты работы были получены путем исследования конкретных решеток, главным образом, рупоров различного типа, можно сделать общий вывод о возможности существенного расширения полосы частот СШП антенных решеток, в частности,

- возможности реализации сверхдиапазонного режима работы (с перекрытием более одного диапазона волн, т.е. с полосой более 1:10).
2. Усиление предложенных в работе антисимметричных решеток печатных диполей и коллинеарных решеток цилиндрических - конических и поликонических элементов не ограничивается полученными значениями и может быть увеличено за счет увеличения числа элементов решетки.
 3. Задача расширения полосы рабочих частот сканирующих решеток требует дальнейших исследований, при этом полученные в работе результаты исследования полосы частот согласования бесконечных решеток подтверждают такую возможность.

Список публикаций автора в журналах, входящих в перечень ВАК РФ

- A1. Калошин В.А., Нгуен К.З., Нгуен Х.Ш. Исследование характеристик ТЕМ рупоров // Журнал Радиоэлектроники. 2015. №10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct15/2/text.pdf>
- A2. Калошин В.А., Нгуен К.З. Исследование коллинеарных сверхширокополосных антенных решеток из цилиндрических - конических и поликонических элементов // Антенны. 2016. №2. С. 34 – 41
- A3. Калошин В.А., Нгуен К.З. Сверхдиапазонные излучатели и антенные решетки на основе биконических рупоров // Антенны. 2016. №8. С. 69 – 76
- A4. Калошин В.А., Нгуен К.З. Исследование характеристик Е - плоскостных линейных решеток ТЕМ рупоров // Журнал Радиоэлектроники. 2017. № 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/12/text.pdf>
- A5. Калошин В.А., Нгуен К.З. Сверхширокополосная всенаправленная в магнитной плоскости линейная решетка печатных диполей // Журнал Радиоэлектроники. 2017. № 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/13/text.pdf>
- A6. Калошин В.А., Нгуен К.З. Исследование характеристик СШП плоских двумерно-периодических решеток ТЕМ рупоров // Журнал Радиоэлектроники. 2017. № 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/14/text.pdf>

Список публикаций автора в трудах конференций

- A7. Калошин В.А., Нгуен К.З. Исследование сверхширокополосной антенной решетки из цилиндрических - биконических и поликонических элементов // Труды II Всероссийской Микроволновой конференции, г. Москва, 26 – 28 ноября 2014. С. 514 – 518
- A8. Калошин В.А., Нгуен К.З. Сверхдиапазонные рупорные излучатели и антенные решетки // Труды 26-ой Международной конференции «СВЧ-

техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 4 -10 сентября 2016. С. 84 – 95

- A9. Калошин В.А., Нгуен К.З. Сверхширокополосная всенаправленная в магнитной плоскости линейная решетка печатных диполей // Труды IV Всероссийской Микроволновой конференции, г. Москва, 26 – 28 ноября 2016. С. 402 – 405
- A10. Банков С.Е., Калошин В.А., Нгуен К.З. К теории антенных решеток из ТЕМ рупоров // Труды IV Всероссийской Микроволновой конференции, г. Москва, 26 – 28 ноября 2016. С. 410 – 413

Список цитируемой литературы

1. Калошин В.А., Мартынов Е.С., Скородумова Е.А. Исследование характеристик поликонической антенны в широкой полосе частот // РЭ. 2011. Т.56. № 9. С.1094–1098
2. Mehrdadian A., Forooraghi K. Design and fabrication of a novel ultrawideband combined antenna // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. 2014. Vol. 13. pp. 95-98
3. Ефимова Н.А., Калошин В.А., Мартынов Е.С., Скородумова Е.А. Исследование рупорно-параболической ТЕМ антенны // Журнал Радиоэлектроники. 2011. № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec11/17/text.pdf>
4. Ефимова Н.А., Калошин В.А. Исследование рупорно - линзовой ТЕМ антенны //РЭ. 2012. Т.57. № 9. С.1020-1027
5. Ашихмин А.В. Проектирование и оптимизация сверхширокополосных антенных устройств и систем для аппаратуры радиоконтроля. М.: Радио и связь. 2005
6. Бирюков В.Л., Ефимова Н.А., Калиничев В.И., Калошин В.А., Пангонис Л.И. Исследование сверхширокополосной кольцевой антенной решетки // Журнал радиоэлектроники. 2013. №1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/20/text.pdf>
7. Kindt R.W., Pickles W.R. Ultrawideband all-metal flared-notch array radiator // IEEE Trans. Antennas Propag. 2010. V. 58. No 11. pp. 3568–3575
8. Yan J., Gogineni S., Camps-Raga B., Brozena J. A dual-polarized 2-18 GHz Vivaldi array for airborne radar measurements of snow // IEEE Trans. Antennas Propag. 2016. V. 64. No 2. pp. 781–785
9. Дупленкова М.Д., Калиничев В.И., Калошин В.А. Сверхширокополосная цилиндрическая антенная решетка на основе поликонических излучателей // Журнал Радиоэлектроники. 2015. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov15/13/text.pdf>