

На правах рукописи



САФОНОВ Фёдор Сергеевич

**МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ С
ДИАГРАММООБРАЗУЮЩЕЙ СХЕМОЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЗЫ РОТМАНА
ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ И СВЯЗИ**

Специальность: 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Пастернак Юрий Геннадьевич

Официальные оппоненты: **Авдеев Владимир Борисович**, доктор технических наук, профессор, федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю РФ», управление, главный научный сотрудник
Разиньков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, кафедра автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительных систем), доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (г. Самара)

Защита состоится «21» сентября 2023 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский просп., 14, ауд.216 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «27» июля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



Федоров Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью создания методики проектирования многолучевых антенных решеток для систем радиопеленгации и связи, функционирующих в режиме многоканального приема и обработки сигналов.

Использование многолучевых антенных решеток (МАР) с диаграммообразующей схемой на основе линзы Ротмана в системах радиопеленгации и связи в настоящее время является наиболее перспективным в силу ряда причин:

- простоты конструкции диаграммообразующей схемы, реализуемой с использованием технологии производства печатных плат;
- возможности построения антенных систем, функционирующих в сверхширокой полосе частот, благодаря использованию квазиоптического принципа диаграммоформирования;
- возможности существенного уменьшения габаритных размеров диаграммообразующей схемы за счет реализации свернутой линзы Ротмана;
- повышения чувствительности аппаратуры радиопеленгации и связи за счет использования направленных антенных систем;
- возможности реализации режима ММО (multiple input, multiple output) в аппаратуре связи за счет малости величин коэффициентов пространственной корреляции диаграмм направленности многолучевой антенной системы;
- повышения разрешающей способности по угловым координатам источников радиоизлучения за счет возможности сужения главных лепестков многолучевой диаграммы направленности путем увеличения числа ее физических элементов, а также – путем формирования «виртуальных» каналов приема с использованием методов интерполяции и экстраполяции пространственного распределения электромагнитного поля, измеряемого с помощью физической антенной решетки.

Многолучевые антенны широко используются в системах сотовой связи и становятся все более привлекательными для их использования в системах спутниковой связи, радиопеленгации и радиолокации.

Одним из перспективных способов формирования лучей в МАР является использование диаграммообразующей схемы (ДОС) на основе печатной линзы Ротмана. Преимущества такого подхода обусловлены простотой конструкции и технологии изготовления ДОС (двухслойная, или многослойная, печатная плата, использование технологии SIW (Substrate Integrated Waveguides), с помощью которой реализуются волноводы на печатной плате, путем изготовления металлизированных отверстий, формирующих узкие стенки волновода) а также - широкой полосой рабочих частот линзы Ротмана, обусловленной квази- оптическим принципом ее функционирования и использованием сверхширокополосных трансформаторов, реализуемых в виде плавных, или ступенчатых полосковых переходов, для возбуждения тела линзы (коэффициент частотного перекрытия линзы Ротмана может достигать 2-3 и даже более) [1, 2, 3, 4].

Однако, использование линзы Ротмана в дециметровом диапазоне длин волн существенно ограничивается тем обстоятельством, что тело линзы и трансформаторы, запитывающие тело линзы, становятся слишком громоздкими, поэтому, достаточно проблематичным является интеграция линзы Ротмана в компактную конструкцию приемопередатчика.

По названной причине исследование и разработка радиопеленгаторных антенных систем с ДОС на основе линзы Ротмана, реализованной на основе печатной платы с уменьшенными габаритными размерами, является весьма актуальной научно-практической задачей для:

- уменьшения массогабаритных размеров многолучевой антенной системы;
- повышения точности измерения угловых координат;
- повышения разрешающей способности по угловым координатам;
- повышения чувствительности приемной антенной системы в полосе частот, включающей в себя несколько частотных диапазонов.

При проектировании многолучевых радиопеленгаторных антенных решеток, удовлетворяющих всем вышеперечисленным требованиям, важными задачами являются разработка приемной антенной системы с активными элементами, используемыми для уменьшения уровня ее собственных шумов и компенсации потерь мощности в линзе Ротмана, а также – создание методов обработки принимаемых сигналов, учитывающих направленные свойства элементов антенной системы, находящихся в составе решетки, и их входные характеристики, в том числе – методов обработки принимаемых сигналов, основанных на формировании «виртуальной» антенной решетки – пространственных отсчетов электромагнитного поля, получаемых в результате применения процедур интерполяции и экстраполяции пространственного распределения поля, измеренного в точках фазовых центров (или – центрах излучения) элементов антенной системы и используемых для повышения разрешающей способности по угловым координатам приемной антенной системы, а также – снижения систематической погрешности пеленгования, вызванной рассеянием волн на антенной системе и ее носителе (включая подстилающую поверхность, опорную мачту, и другие близлежащие рассеиватели).

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие теории и техники радиопеленгаторных антенных решеток внесли (М.Л. Артемов, А.В. Ашихмин, А.А. Болкунов, А.Д. Виноградов, А.Б. Гершман, И.С. Дмитриев, В.В. Караваев, А.Н. Кренев, В.А. Козьмин, Ю.Б. Нечаев, Л.А. Овчаренко, А.М. Рембовский, Ю.А. Рембовский, В.А. Уфаев, О.П. Черемисин, F. Belloni, S. Chandran, B. Friedlander, D.H. Johnson, T. Kailath, M. Kavech, V. Koivunen, R. Kumaresan, Zhi-Quan Luo, E.E. Mack, X. Mestre, M.P. Moudi, A. Nehorai, M. Pesavento, U. Pillai, R. Poisel, B.D. Rao, D.P. Reilly, A. Richter, D.R. Rods, P. van Rooyen, P. Roux, R. Roy, T. Sarkar, R.O. Schmidt, V.C. Soon, P. Stoica, L. Swindlehurst, H.L. Van Trees, D.W. Tufts, E. Tuncer, M. Viberg, M. Wax, A. Weiss, G. Xu, I. Ziskind, M. Zolotowski, Capon J., Stoica P., Ottersten B., Viberg M., Kaveh M., Friedlander B., Weiss A., Manikas A., Pillai U., Wax M и др.).

Вместе с тем, многие важные научно-технические задачи, связанные с созданием многолучевых антенных систем для аппаратуры радиопеленгации и связи, исследованы недостаточно:

- разработка методики проектирования многолучевых антенных решеток из щелевых и вибраторных элементов с диаграммообразующей схемой на основе линзы Ротмана, характеризующихся значениями коэффициента стоячей волны в активном режиме не более 2.0 при отклонении луча от нормали на угол до 45 градусов, а также – уменьшением коэффициента усиления (КУ) при отклонении луча от нормали по закону, приближающемуся к косинусоидальному, описывающему проекцию апертуры антенной решетки на текущее направление максимального значения КУ;

- разработка методики проектирования сложенной линзы Ротмана, реализованной в виде печатной платы;

- разработка методов формирования «виртуальных» антенных решеток – дополнительных пространственных отсчетов поля, используемых для повышения разрешающей способности приемной антенной системы.

Объектом исследования являются многолучевые антенные системы аппаратуры радиопеленгации.

Предметом исследования является методика проектирования многолучевых антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана, а также – методы формирования дополнительных «виртуальных» каналов приема на основе использования сигналов, принятых радиопеленгаторной антенной решеткой.

Целью работы является разработка методики проектирования многолучевых антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана для систем радиопеленгации и связи, применение которой дает возможность:

- существенно повысить энергетический потенциал систем радиопеленгации и связи;

- существенно повысить разрешающую способность систем радиопеленгации по угловым координатам;

- реализации режима ММО в аппаратуре связи с пространственно-угловым разделением абонентов;

- интегрального исполнения сверхширокополосной антенной решетки с формированием многолучевой диаграммы направленности в плоскости вектора напряженности электрического поля.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Проведения анализа современного состояния и перспективных тенденций развития техники и технологии производства антенных систем аппаратуры радиопеленгации и связи;

2. Разработка теоретических основ многолучевых антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана для систем радиопеленгации и связи;

3. Исследования и разработки методов обработки сигналов, основанных на формировании, путем интерполяции и экстраполяции их пространственных

отсчетов, дополнительных «виртуальных» каналов приема, позволяющих повысить разрешающую способность приемных антенных систем, включающих в себя физические и «виртуальные» элементы;

4. Разработки методики проектирования многолучевых радиопеленгаторных антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана для аппаратуры радиопеленгации и связи;

5. Проведения натурных экспериментальных исследований аппаратуры радиопеленгации, оснащенной многолучевыми антенными решетками для проверки и подтверждения эффективности их использования в современных антенных системах.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработана методика проектирования печатной линзы Ротмана дециметрового диапазона волн, тело которой сложено по прямой линии, разделяющей области линзы, подключенные, с помощью полосковых трансформаторов, к антенным элементам, и к высокочастотному коммутатору, с целью уменьшения габаритных размеров диаграммообразующей схемы многолучевой антенной решетки;

- разработана математическая модель разворота на 180 градусов в Е-плоскости печатной линзы Ротмана, основанная на использовании метода частичных областей и редуцирования бесконечной парной системы линейных алгебраических уравнений с учетом условия Мейкснера, предназначенная для расчета S- параметров СВЧ устройства;

- разработана методика проектирования многолучевых антенных решеток дециметрового диапазона волн, состоящих из широкополосных плоских вибраторов с экраном и директорами, а также – из щелевых элементов с директорами, для запитки которых используется диаграммообразующая схема на основе печатной линзы Ротмана, предназначенных для использования в аппаратуре пассивной когерентной локации, а также – в базовых станциях сотовой связи, основанная на использовании подходов декомпозиции и рекомпозиции, а также – метода конечного интегрирования Вейланда, реализованного в пространственно-временной области;

- разработана и апробирована методика формирования интерполяционной и экстраполяционных «виртуальных» антенных решеток, основанная на использовании кубических сплайнов, и метода линейного прогноза Бурга, соответственно, позволяющая уменьшить уровень боковых лепестков, а также – повысить разрешающую способность по угловым координатам приемной антенной системы, включающей в себя, помимо физических элементов антенной решетки, также «виртуальные» элементы – пространственные отсчеты электромагнитного поля.

Теоретическая значимость работы заключается в создании методологии анализа и синтеза многолучевых антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе линзы Ротмана для аппаратуры радиопеленгации и связи, а также – в разработке методов формирования «виртуальных» антенных элементов – дополнительных каналов приема сигналов, на основе использования процедур интерполяции и экстраполяции пространственного распределения

электромагнитного поля, измеренного с помощью элементов физической антенной решетки. Показано, что формирование «виртуальной» антенной решетки позволяет повысить разрешающую способность приемной антенной системы по угловым координатам.

Практическая значимость работы заключается в существенном уменьшении габаритных размеров диаграммообразующей схемы многолучевых антенных решеток за счет использования сложенного варианта конструкции печатной линзы Ротмана, что позволяет снизить габаритные размеры самой антенной системы, которая будет лучше интегрироваться в архитектуру стационарных и мобильных объектов размещения, а также существенно повысится безопасность и надежность оборудования за счет более удобного и простого способа маскировки антенной системы, а также – в возможности существенного снижения уровня боковых лепестков приемной антенной системы при использовании интерполяционной «виртуальной» антенной решетки, и повышении ее разрешающей способности по угловым координатам, увеличения коэффициента направленного действия приемной антенной системы, при формировании экстраполяционной виртуальной» антенной решетки.

Методы исследования. В диссертации применялись методы синтеза и анализа антенн, вычислительные методы технической электродинамики, методы математического моделирования, а также - стандартные методики натурных экспериментальных исследований антенн.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- выявлено, что сложение печатной линзы Ротмана, тело которой запитывается с помощью экспоненциальных полосковых переходов, реализованных в виде симметричной, или - несимметричной полосковой линии, не приводит к существенным искажениям комплексных коэффициентов передачи между антенными и диаграммообразующими портами в полосе частот с коэффициентом перекрытия 2 и более, при отклонении лучей от нормали к плоскости линейной антенной решетки на угол до 45 градусов;

- установлено, что эффективным средством улучшения качества активного согласования, а также – уменьшения степени неравномерности коэффициента усиления антенных решеток, состоящих из щелевых элементов, при сканировании в Е- плоскости в секторе $\pm [45]^\circ$, является использование директоров прямоугольной формы, а в случае плоских вибраторов с полукруглыми плечами над экраном – директоров, подобных по форме активным вибраторам, и уменьшенным по размерам в $0.7 \div 0.75$ раза;

- выявлено, что использование интерполяционной и экстраполяционной «виртуальных» антенных решеток позволяет существенно (на 5-10 дБ) уменьшить уровень дальних боковых лепестков приемных антенных систем, содержащих, помимо физических, «виртуальные» элементы, представляющие собой дополнительные пространственные отсчеты электромагнитного поля;

- установлено, что использование в приемной антенной системе, содержащей 10 физических элементов, расположенных с шагом около половины длины волны, 15 дополнительных пространственных отсчетов поля

экстраполяционной «виртуальной» антенной решетки, позволяет разрешить 2 источника радиоизлучения, угловое расстояние между которыми составляет 15 градусов, а разница амплитуд – более 3.5 дБ, не разрешимые при использовании только физической антенной решетки; для реализации предложенного подхода необходимо обеспечить точность измерения фаз не хуже 3-5 градусов, а амплитуд – не хуже 1 дБ.

Степень достоверности полученных в работе результатов подтверждается корректным применением методов синтеза и анализа антенн, вычислительных методов технической электродинамики, методов математического моделирования, а также – стандартных методик натурных экспериментальных исследований антенн. Результаты работы не противоречат полученным и опубликованным ранее в литературе результатам других авторов. Достоверность приведенных экспериментальных данных подтверждается использованием стандартных методик измерения параметров антенн.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях: XXIV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж 2018); XXV Международная научно-техническая конференция «радиолокация, навигация, связь» (Воронеж 2019); XXVI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж 2020); XXVII Международная научно-техническая конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж 2021).

Реализация и внедрение результатов работы.

Основные результаты работы внедрены в АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж) при разработке и создании пассивного когерентного радиолокатора, в Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» в учебный процесс при проведении лабораторных занятий по дисциплинам «Устройства СВЧ и антенны», «Электродинамика и распространение радиоволн», что подтверждается соответствующими актами внедрения. Соискатель принимал участие в решении научно-исследовательских задач по гранту РФФИ № 19-79-10109 «Аппроксимация пространственного распределения электромагнитного поля в окрестности расположения трехмерных рассеивателей с априорно неизвестными геометрией и материальными свойствами с целью формирования дополнительных "виртуальных" каналов радиоприема», реализованному в Воронежском государственном техническом университете в 2020-2022 гг.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах, из них 11 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 работа опубликована в издании, индексируемом в международных цитатно-аналитических базах данных Web of Science и Scopus, 7 работ опубликовано в сборниках трудов международных научно-технических конференций и других публикаций.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертационной работы, обладающие научной новизной и выносимые на защиту, получены автором лично. В работах [5-11, 25] автором создана и исследована методология аппроксимации

пространственного распределения электромагнитного поля вблизи трехмерных рассеивателей в резонансной области частот, основанная на использовании электродинамического принципа эквивалентных источников поля, используемая для формирования «виртуальных» антенных решеток. В работе [12] автором предложены варианты построения радиопеленгаторных антенных решеток с однокоординатным управлением диаграммы направленности с диаграммообразующими схемами (ДОС) на основе печатной линзы Ротмана. В работах [13, 23] автором исследована линейная антенная решетка из печатных логопериодических антенн, запитанных с помощью линзы Ротмана. В работах [14, 16, 17] автором исследованы антенные системы с коммутационным сканированием на основе плоской линзы Люнеберга. В работе [15] автором спроектирована и описана математическая модель модифицированной линзы Ротмана, выполненной на основе несимметричной полосковой линии. В работах [18-21, 24] автором исследована сложенная линза Ротмана, используемая для питания антенной решетки перспективной базовой станции сотовой связи, проведено исследование способа формирования дополнительных виртуальных каналов приема – элементов «виртуальной» антенной решетки. В работе [22] автором исследованы варианты конструктивного построения антенных решеток с коммутационным сканированием в плоскости вектора напряженности электрического поля, питаемых с помощью печатной линзы Ротмана.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует п. 2, 3, 8, 9, 10 паспорта специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Основная часть работы изложена на 115 страницах, содержит 109 рисунков и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, обоснованы теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад соискателя.

В первой главе проведен анализ современного состояния и передовых тенденций развития теории, техники и технологии производства антенных систем с электронным сканированием, перспективных для использования в аппаратуре радиопеленгации и связи; сформулированы основные требования, предъявляемые к характеристикам многолучевых антенных систем. Проведен анализ основных направлений совершенствования фазированных антенных решеток на основе опыта передовых разработчиков. Проведен анализ перспективных методов обработки принимаемых сигналов в многоканальной аппаратуре радиопеленгации, включая методы синтеза виртуальных антенных решеток – совокупности дополнительных пространственных отсчетов принимаемых электромагнитных волн, формируемых в результате выполнения определенной последовательности вычислений, на основе измерения комплексных амплитуд сигналов с помощью элементов физической антенной решетки. Сформулированы основные задачи, решение которых необходимо для достижения цели диссертации.

Во второй главе проведен сравнительный анализ диаграммообразующих схем многолучевых антенных систем с одно- и двухкоординатным диаграммообразованием. Разработана и апробирована методика проектирования диаграммообразующих схем на основе печатной линзы Ротмана, реализованной по технологии симметричной полосковой линии, а также – несимметричной полосковой линии. Разработана модель разворота на 180 градусов тела линзы Ротмана, основанная на использовании метода частичных областей и метода редуцирования парных бесконечных систем линейных алгебраических уравнений с учетом условия Мейкснера на острых ребрах. Показано, что наличие разворота у тела линзы Ротмана не приводит к существенному ухудшению качества согласования ее входов, а также – к появлению значимых фазовых искажений сигналов на антенных входах линзы.

Для реализации сложной линзы Ротмана, реализованной на основе симметричной полосковой линии, был выбран СВЧ- ламинат Rogers TMM10i с толщиной диэлектрика 1.524 мм. Замыкание слоев металла линзы осуществлялось с помощью переходных металлизированных отверстий, рис. 1, а), б).

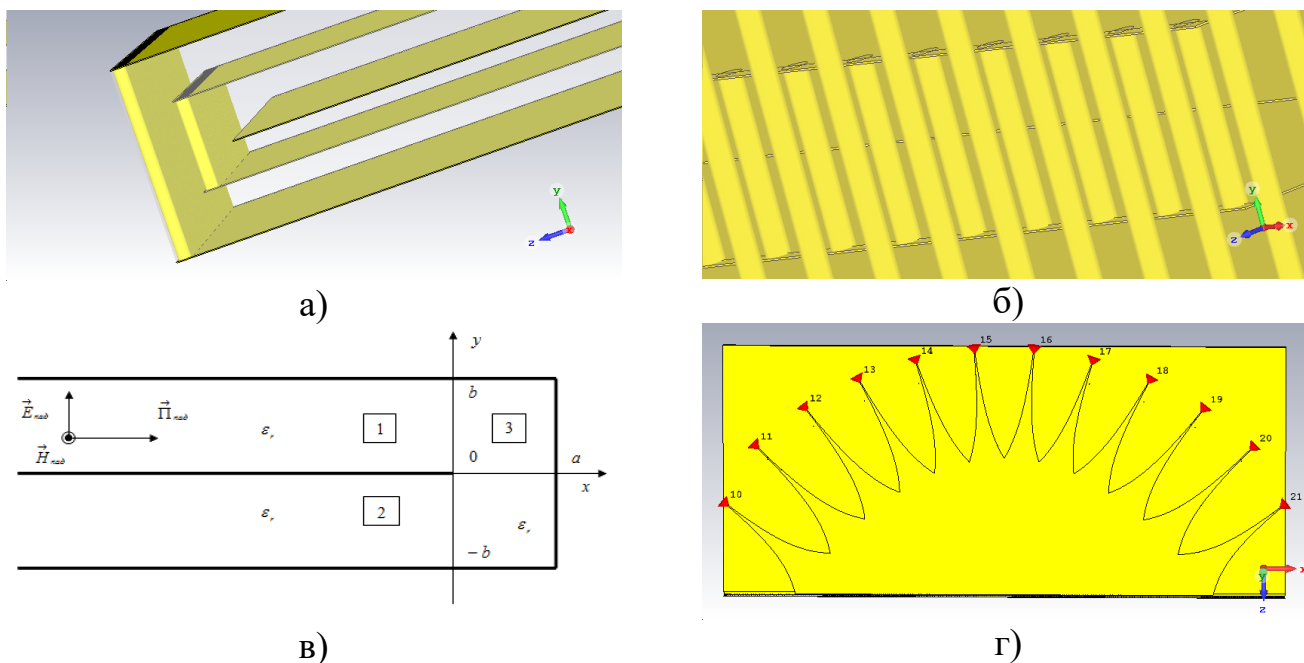


Рис. 1 Сложенная линза Ротмана. а) – разворот тела линзы, реализованного по технологии симметричной полосковой линии; б) – переходные металлизированные отверстия; в) - модель разворота на 180 градусов тела линзы Ротмана, реализованной по технологии несимметричной полосковой линии; г) - полосковые трансформаторы, питающие тело линзы Ротмана

Рассмотрим модель разворота на 180 градусов участка линзы Ротмана, выполненной на основе несимметричной полосковой линии (внешние проводники – тело линзы, внутренний проводник – земля).

Падающая волна имеет только z - компоненту магнитного поля:

$$\vec{H} = \vec{z}_0 \cdot H_z.$$

У электрического поля могут быть две компоненты:

$$\vec{E} = \frac{\vec{\text{rot}}(\vec{E})}{i\omega\epsilon_0\epsilon_r} = \left(\vec{x}_0 \frac{\partial H_z}{\partial y} - \vec{y}_0 \frac{\partial H_z}{\partial x} \right).$$

Из области 1 падает ТЕМ- волна:

$$\vec{H}_{na\partial}^{(1)} = \vec{z}_0 \cdot H_{na\partial}^{(1)},$$

$$H_{na\partial}^{(1)} = \exp(-ik_0\sqrt{\epsilon_r}x),$$

$$k_0 = 2\pi/\lambda_0,$$

$$\vec{E}_{na\partial}^{(1)} = \vec{y}_0 \cdot E_{na\partial}^{(1)},$$

$$E_{na\partial}^{(1)} = \frac{k_0\sqrt{\epsilon_r}}{\omega\epsilon_0\epsilon_r} \exp(-ik_0\sqrt{\epsilon_r}x).$$

В спектре отраженных волн в области (1) будут присутствовать ТЕМ- волна и волноводные моды Е- типа (с продольной E_x - компонентой):

$$H_{omp}^{(1)} = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \exp(i\gamma_m^{(1)}x) \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right),$$

где

$$\gamma_m^{(1)} = \sqrt{k_0^2\epsilon_r - \left(\frac{\pi m}{b}\right)^2}.$$

Электрическая компонента E_y - компоненты поля, касательной к границе раздела областей (1) и (3), а также – областей (2) и (3) при $x=0$:

$$E_{omp}^{(1)} = \frac{-1}{i\omega\epsilon_0\epsilon_r} \sum_{m=0}^{\infty} A_m i\gamma_m^{(1)} \exp(i\gamma_m^{(1)}x) \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right).$$

В области (2) магнитная и электрическая составляющие поля могут быть записаны в виде:

$$H^{(2)} = \sum_{m=0}^{\infty} B_m \exp(i\gamma_m^{(1)}x) \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right),$$

отметим, что под знаком экспоненты стоит величина $\gamma_m^{(1)}$, т.к. ширина областей (1) и (2) одинаковы,

$$E^{(2)} = \frac{-1}{i\omega\epsilon_0\epsilon_r} \sum_{m=0}^{\infty} B_m i\gamma_m^{(1)} \exp(i\gamma_m^{(1)}x) \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right).$$

В области (3), с учетом граничных условий при $y = \pm b$ и $x = a$:

$$H^{(3)} = \sum_{m=0}^{\infty} C_m \cos(\gamma_m^{(3)}(x-a)) \cos\left(\frac{\pi m}{2b}(y-b)\right),$$

$$\gamma_m^{(3)} = \sqrt{k_0^2\epsilon_r - \left(\frac{\pi m}{2b}\right)^2},$$

$$E^{(3)} = \frac{1}{i\omega\epsilon_0\epsilon_r} \sum_{m=0}^{\infty} C_m \gamma_m^{(3)} \sin(\gamma_m^{(3)}(x-a)) \cos\left(\frac{\pi m}{2b}(y-b)\right).$$

Сшиваем касательные составляющие магнитного поля при $x=0$:

$$\begin{aligned} & \exp(-ik_0\sqrt{\varepsilon_r}x) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \exp(i\gamma_m^{(1)}x) \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right) = \\ & = \sum_{m1=0}^{\infty} C_{m1} \cos(\gamma_{m1}^{(3)}(x-a)) \cos\left(\frac{\pi m1}{2b}(y-b)\right), \quad x=0, \\ & 1 + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right) = \sum_{m1=0}^{\infty} C_{m1} \cos(\gamma_{m1}^{(3)}a) \cos\left(\frac{\pi m1}{2b}(y-b)\right). \end{aligned}$$

Функцию $\cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right)$ представим в виде ряда:

$$\cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right) = \sum_{m1=0}^{\infty} d_{m1,m} \cos\left(\frac{\pi m1}{2b}(y-b)\right),$$

где

$$d_{m1,m} = \frac{1}{2\pi} \int_0^b \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right) \cos\left(\frac{\pi m1}{2b}(y-b)\right) dy = \frac{b(m1 \sin(\pi m1/2) - 2m \sin(\pi m))}{\pi^2(m1^2 - 4m^2)}.$$

Тогда условие $H^{(1)} = H^{(3)}$ при $x=0$ будет выглядеть так:

$$\sum_{m1=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (A_m + \delta_{m,0}) d_{m1,m} \cos\left(\frac{\pi m1}{2b}(y-b)\right) = \sum_{m1=0}^{\infty} C_{m1} \cos(\gamma_{m1}^{(3)}a) \cos\left(\frac{\pi m1}{2b}(y-b)\right),$$

где

$$\delta_{m,0} = \begin{cases} 1 & \text{при } m=0 \\ 0 & \text{при } m \neq 0 \end{cases} - \text{символ Кронекера.}$$

Отсюда:

$$\sum_{m=0}^{\infty} (A_m + \delta_{m,0}) d_{m1,m} = C_{m1} \cos(\gamma_{m1}^{(3)}a), \quad (1)$$

где

$$m1 = 0, 1, \dots, \infty.$$

Сшиваем касательные компоненты электрического поля $E^{(1)} = E^{(3)}$ при $x=0$:

$$\frac{ik_0\sqrt{\varepsilon_r}}{i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r} - \frac{1}{i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r} \sum_{m=0}^{\infty} A_m i\gamma_m^{(1)} \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right) = \frac{-1}{i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r} \sum_{m1=0}^{\infty} C_{m1} \gamma_{m1}^{(3)} \sin(\gamma_{m1}^{(3)}a) \cos\left(\frac{\pi m1}{2b}(y-b)\right),$$

подставив вместо $\cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right)$ его выражение по базисным функциям $\cos\left(\frac{\pi m1}{2b}(y-b)\right)$,

получим:

$$\sum_{m=0}^{\infty} d_{m1,m} (ik_0\sqrt{\varepsilon_r} \delta_{m,0} - A_m i\gamma_m^{(1)}) = -C_{m1} \gamma_{m1}^{(3)} \sin(\gamma_{m1}^{(3)}a), \quad (2)$$

где

$$m1 = 0, 1, \dots, \infty.$$

Сошьем $H^{(2)} = H^{(3)}$ при $x=0$:

$$\sum_{m=0}^{\infty} B_m \cdot g_{m1,m} = C_{m1} \cos(\gamma_{m1}^{(3)}a), \quad (3)$$

где

$$m1 = 0, 1, \dots, \infty,$$

$$g_{m1,m} = \frac{1}{2\pi} \int_{-b}^0 \cos\left(\frac{\pi m}{b} y\right) \cos\left(\frac{\pi m1}{2b}(y-b)\right) dy =$$

$$= \frac{2bm1 \sin(\pi m1/2) - 4bm \sin(\pi m) (2 \sin^2(\pi m1/2) - 1) + 2bm1 \sin(\pi m1) (2 \sin^2(\pi m/2) - 1)}{2\pi(\pi m1^2 - 4\pi m^2)}.$$

Сошьем $E^{(2)} = E^{(3)}$ при $x = 0$:

$$\sum_{m=0}^{\infty} g_{m1,m} B_m i \gamma_m^{(1)} = C_{m1} \gamma_{m1}^{(3)} \sin(\gamma_{m1}^{(3)} a), \quad (4)$$

где

$$m1 = 0, 1, \dots, \infty.$$

Редуцируем СЛАУ (1, 2, 3, 4), ограничив число волноводных мод в областях (1), (2), (3):

Пусть $m1 = 0, 1, \dots, M1-1$, где $M1$ - четное число. Тогда, учитывая, что ширина областей (1) и (2) в направлении y одинакова, $m = 0, 1, \dots, \frac{M1}{2} - 1$.

Теперь редуцированную СЛАУ (1, 2, 3, 4) можно решать на ЭВМ.

При построении линзы сложенной Ротмана, реализованной по технологии несимметричной полосковой линии, был выбран СВЧ- ламинат Rogers TMM10i с толщиной диэлектрика 0.762 мм. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения и коэффициента передачи разворота на 180 градусов тела линзы Ротмана, реализованной по технологии несимметричной полосковой линии (рис. 1, в), показаны на рис. 2.

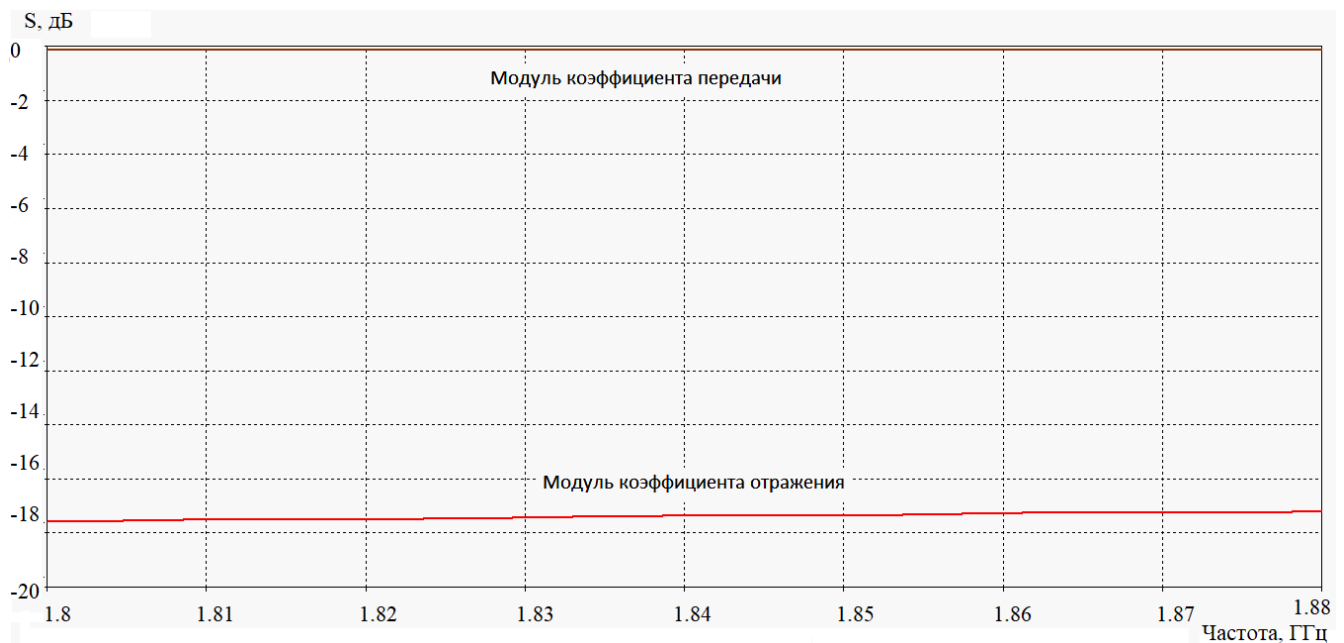


Рис. 2. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения и коэффициента передачи

Третья глава посвящена исследованию перспективных путей построения фазированных антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана. Рассмотрены конструкции печатных Е- плоскостных линейных антенных решеток, интегрированных с линзой Ротмана, состоящих из

антенн Вивальди, а также – логопериодических антенн с вибраторными элементами, возбуждаемыми с помощью симметричных полосковых линий.

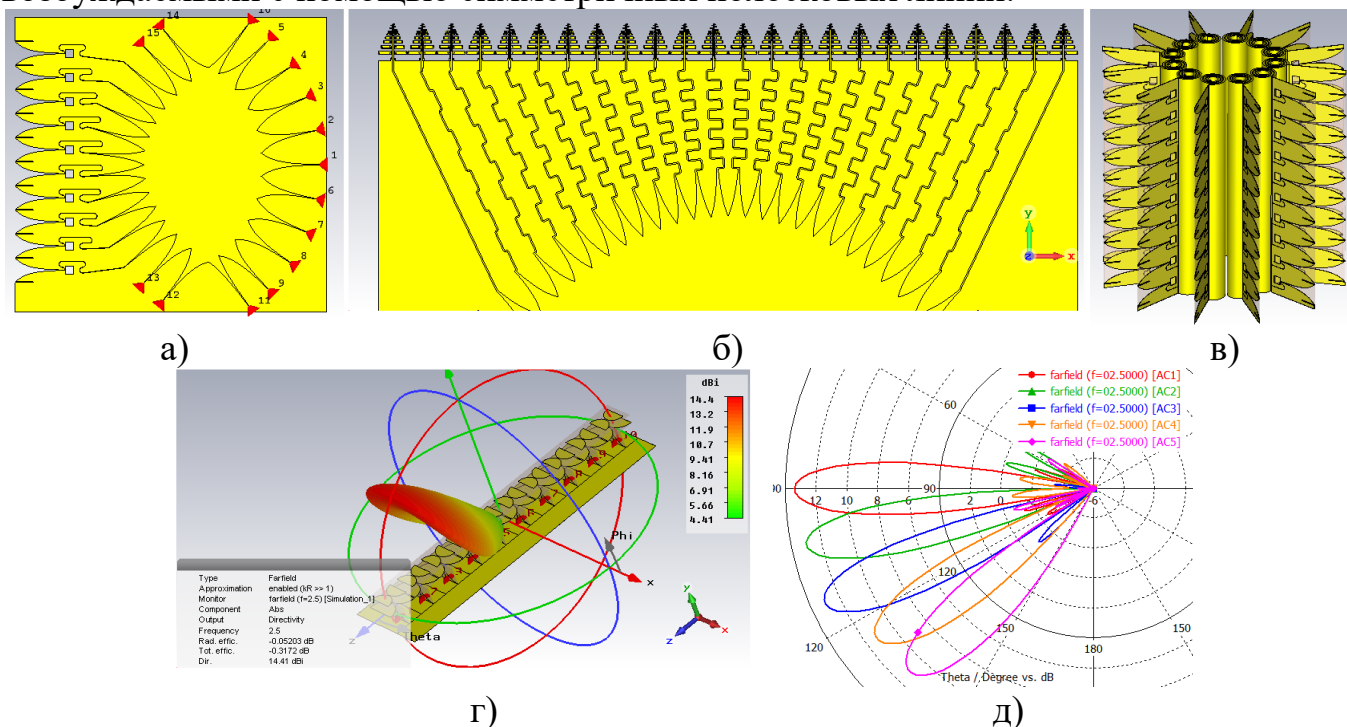


Рис. 3. Исследуемые варианты построения радиопеленгаторных антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе линзы Ротмана в печатном исполнении а) - интегрирование линейной антенной решетки из элементов Вивальди с линзой Ротмана; б) - антенная решетка из вибраторных логопериодических антенн, интегрированная с линзой Ротмана; в) - кольцевая антенная решетка из линейных вертикальных антенных подрешеток, питаемых с помощью линз Ротмана, свернутых в спирали небольшого диаметра; г) - диаграмма направленности антенной решетки при фазировании главного лепестка в направлении 45° от нормали; д) - диаграмма направленности антенной решетки, запитанной с помощью линзы Ротмана, на частоте 2.5 ГГц

Исследованы варианты построения радиопеленгаторных антенных решеток с однокоординатным управлением диаграммы направленности с ДОС на основе печатной линзы Ротмана, рис. 3.

При использовании в качестве элементов решетки плоских вибраторов с общим экраном и директорами (рис. 3, г) удастся достичь значений активного коэффициента отражения не более -9 дБ при отклонении луча от нормали в пределах ± 45 градусов в полосе частот с коэффициентом перекрытия более 1.5. Показанные на рис. 3 варианты линейных антенных решеток, управляемых с помощью линзы Ротмана, могут использоваться также для построения антенных решеток с двухкоординатным сканированием.

Разработана и исследована линейная радиопеленгаторная антенная решетка дециметрового диапазона волн, состоящей из печатных логопериодических элементов, запитанных с помощью линзы Ротмана, рис. 4.

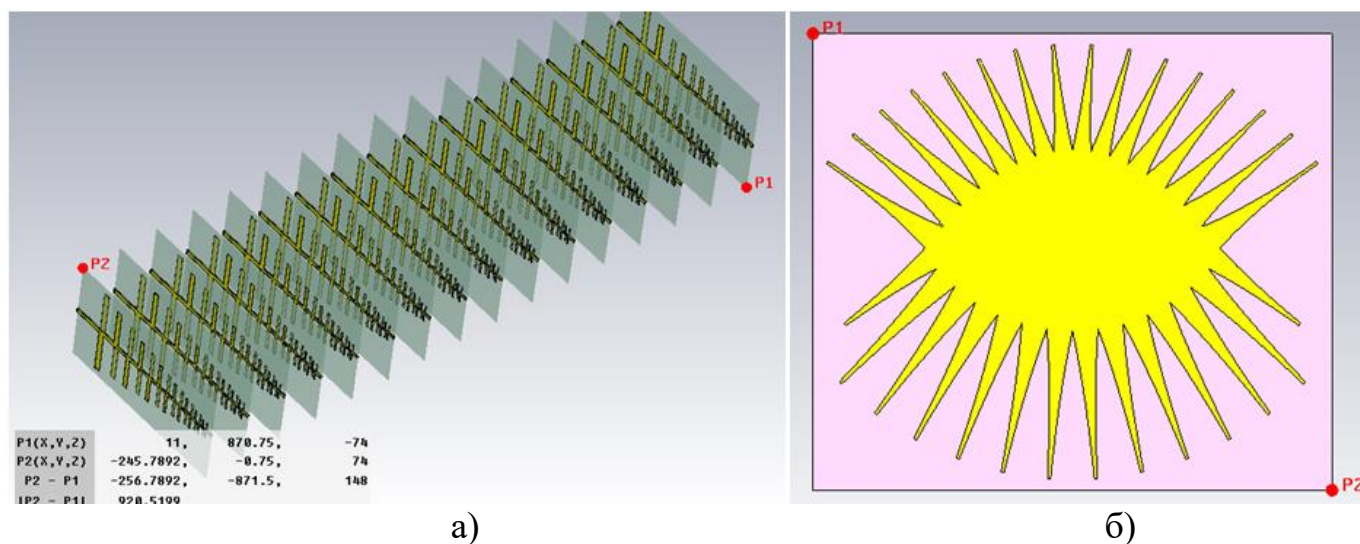
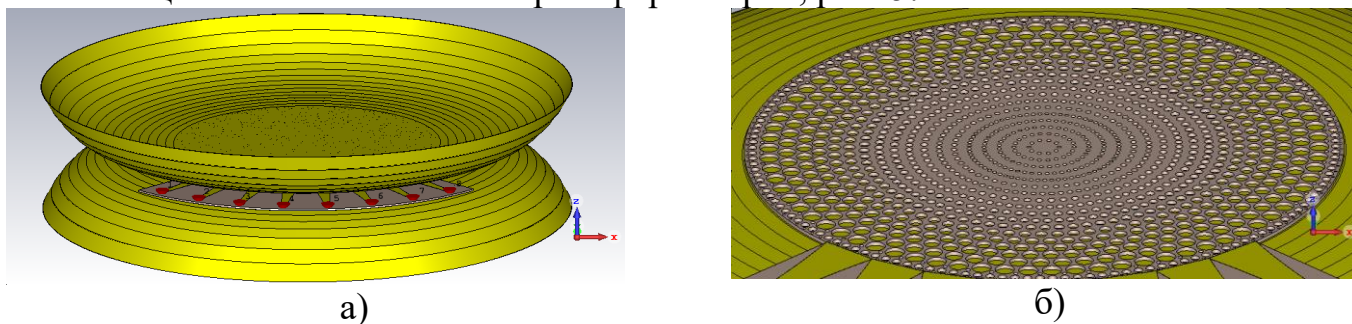


Рис. 4. Модель радиопеленгаторной антенной решетки из печатных логопериодических антенн, возбуждаемой с помощью печатной линзы Ротмана
 а) – модель ФАР, состоящей из 16 логопериодических антенн; б) – модель линзы Ротмана, возбуждаемой полосковыми трансформаторами

Сектор сканирования антенной системы (рис. 4) в полосе от 1 до 3 ГГц составляет $\pm 45^\circ$, при этом коэффициент направленного действия при отклонении главного лепестка от нормали на $\pm 45^\circ$ изменяется от 14.3 до 18.2 дБ, а коэффициент отражения на диаграммообразующем входе линзы не превышает -8÷-10 дБ.

Проведен параметрический синтез сверхширокополосной многолучевой антенной системы с сектором диаграммообразования шириной 90 градусов с излучателем в виде ТЕМ- рупора, имеющим форму тела вращения, возбуждаемого с помощью плоской линзы Лüneберга с оболочкой, выполненной по технологии высверливания отверстий в печатной плате, возбуждаемой с помощью экспоненциальных полосковых трансформаторов, рис. 5.



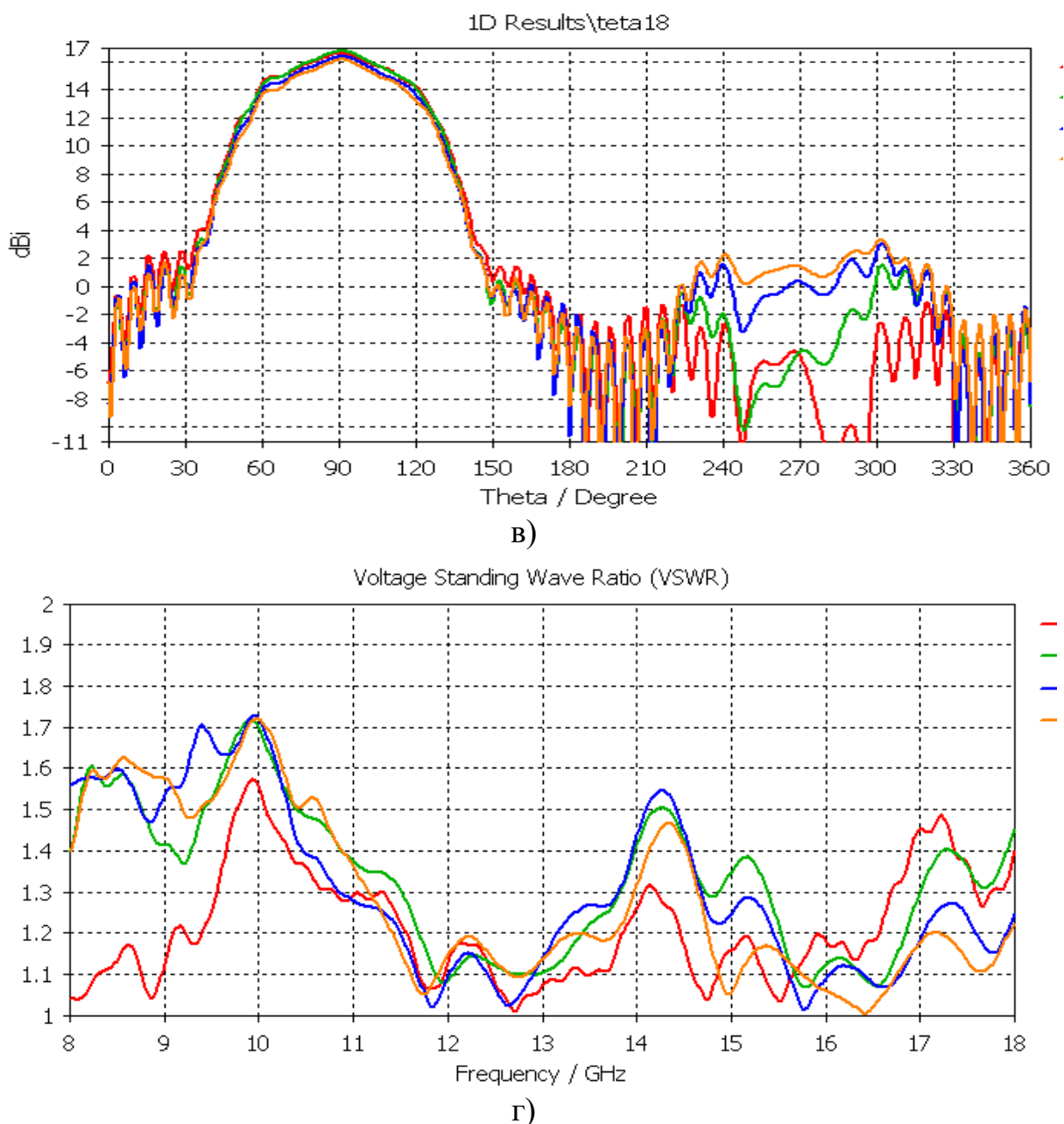


Рис.5. Антенная система на основе плоской линзы люнеберга со сквозными круглыми отверстиями и осесимметричного ТЕМ-рупора

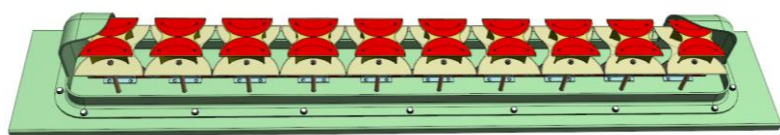
а) внешний вид конструкции антенной системы в виде ТЕМ-рупора; б) внешний вид конструкции, без верхней «чашки», антенной системы в виде ТЕМ-рупора; в) ДН в угло-местной плоскости при запитке 1-4 портов (дБ) на частоте 18 ГГц; г) входные характеристики ФАР при запитке 1-4 портов. КСВН

Конструкция антенной системы представлена в виде ТЕМ-рупора в виде двух «чашек», между днищами которых размещена замедляющая структура, возбуждающаяся с помощью системы полосковых симметрирующих и согласующих трансформаторов. Сверху расположена диэлектрическая пластина с системой круглых отверстий, формирующая необходимый закон изменения эффективного коэффициента преломления от радиуса (материал - Rogers 5880, толщина - 0.508 мм, $\epsilon_r = 2.2$). Особенностью данной конструкции является сквозные круглые отверстия в плоской линзе Люнеберга. Минимальный диаметр отверстия – 0.4 мм;

максимальный – 2.6 мм. Минимальная ширина перегородки между отверстиями – около 0.3 мм. Всего – 1295 отверстий (диаметры - 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6 мм).

Четвертая глава Четвертая глава посвящена разработке и исследованию многолучевых линейных антенных решеток с диаграммообразованием в Е- и Н-плоскостях, состоящих из сверхширокополосных вибраторных элементов (рис. 6, а), б) и щелевых элементов с директорами, рис. 6, г). Разработана методика проектирования антенных решеток с учетом конструктивных особенностей их построения и питания от линзы Ротмана, тело которой сложено пополам для уменьшения габаритных размеров устройства, рис. 6, в).

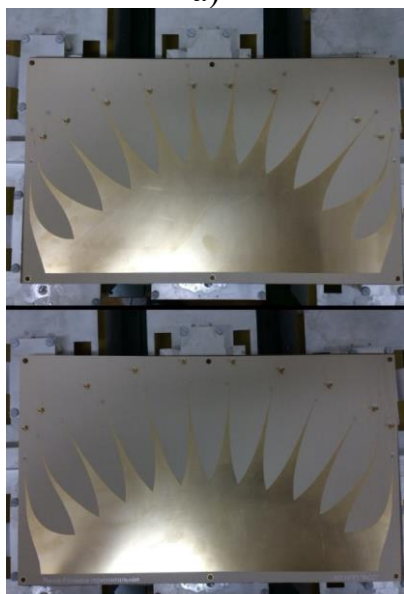
Показано, что для уменьшения уровня боковых лепестков приемной антенной системы, состоящей из физических и виртуальных антенных элементов, эффективным средством является формирование интерполяционной и экстраполяционной антенных решеток, рис. 7. Экстраполяционная антенная решетка может также формироваться с целью повышения коэффициента направленного действия приемной антенной системы и разрешения источников радиоизлучения, не разрешимых «реальной» антенной решеткой.



а)



б)



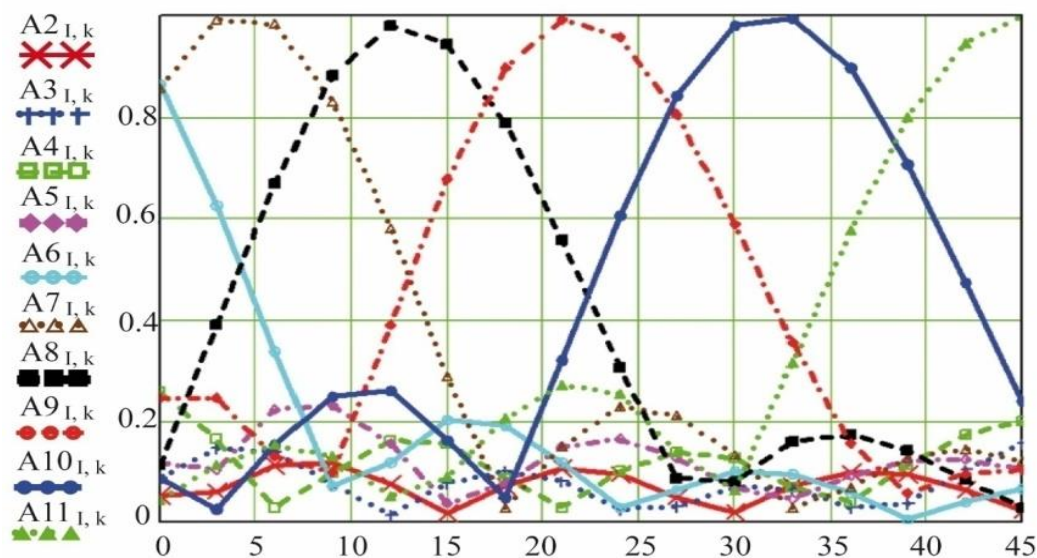
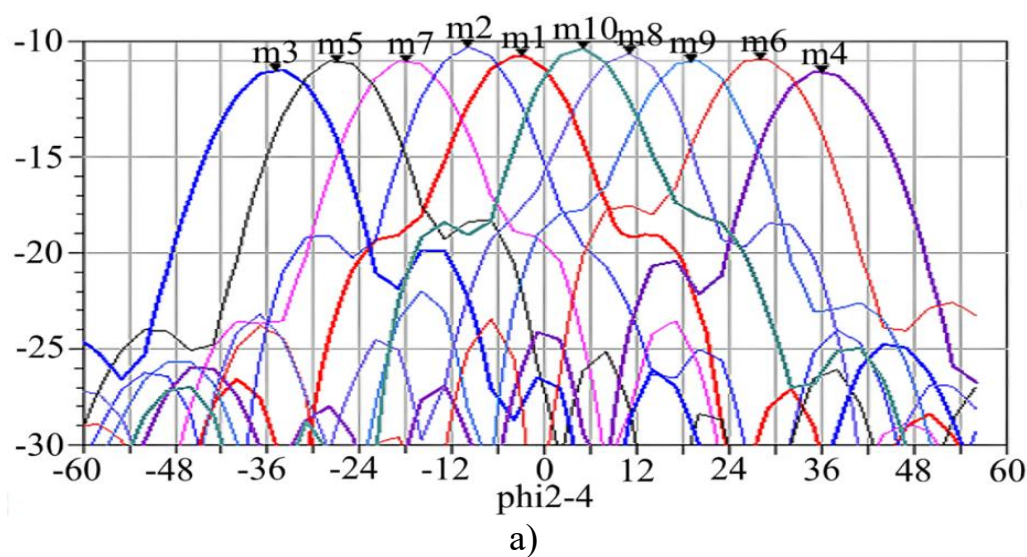
в)

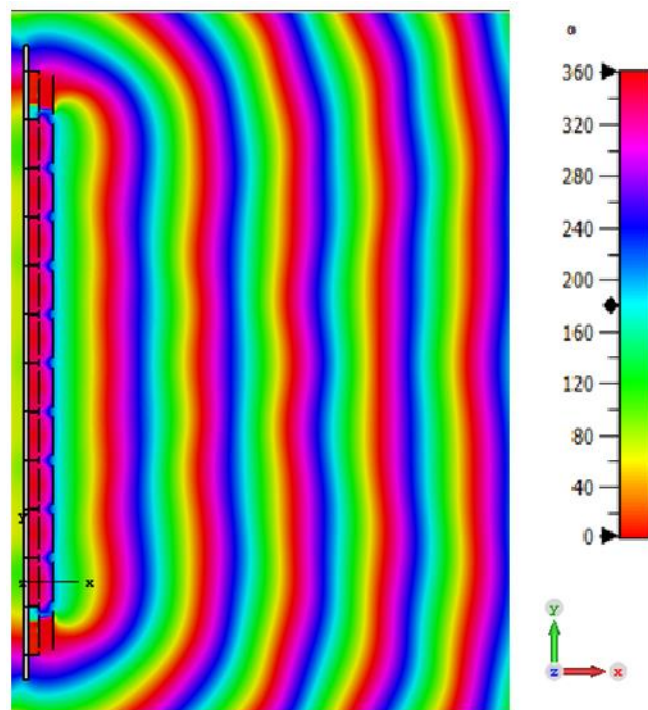
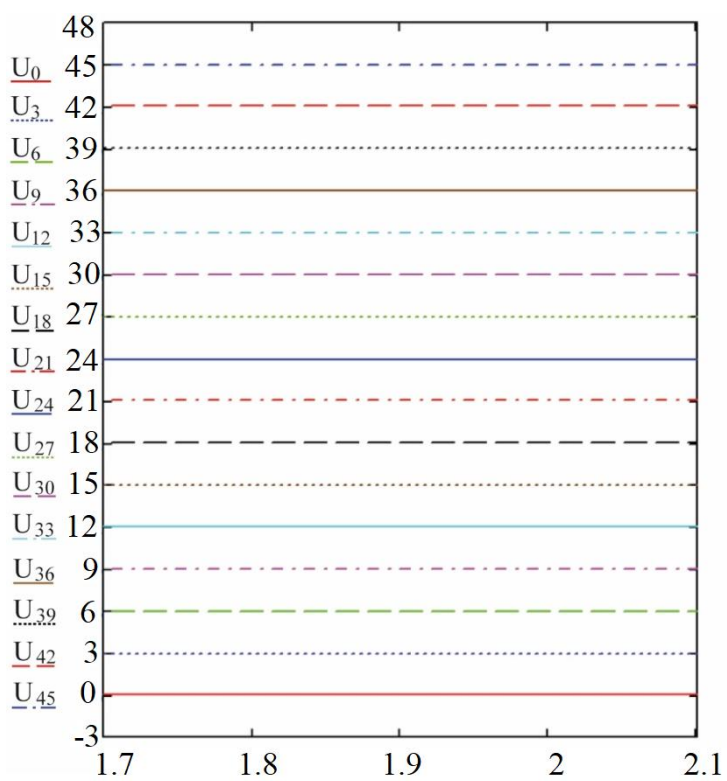


г)

Рис.6. Конструкция исследуемой антенной системы, макеты и натурные испытания.

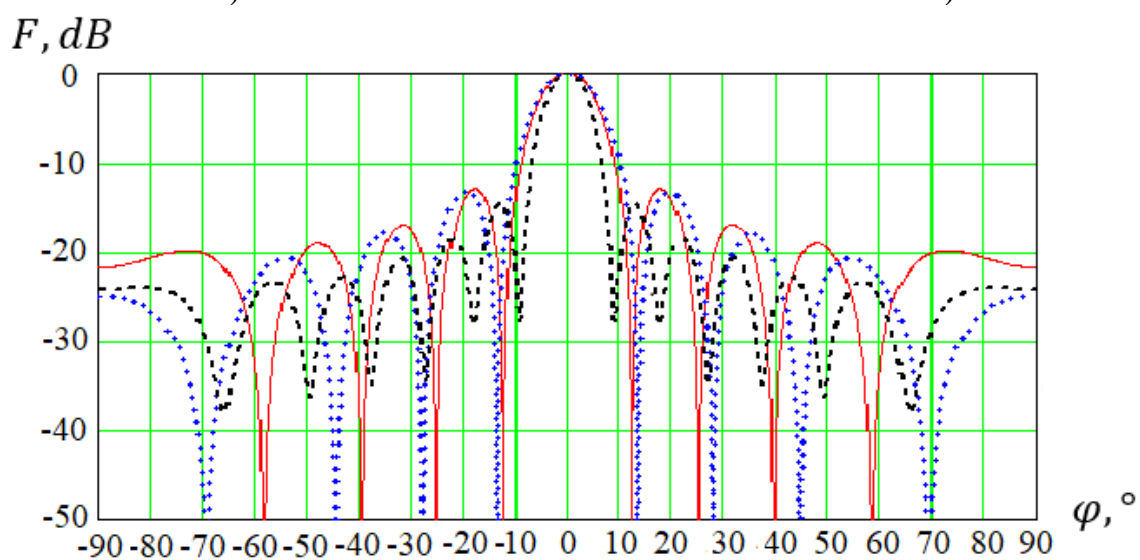
а) - внешний вид антенной системы, обеспечивающей сканирование диаграммы направленности в угломестной плоскости; б) – секция антенной системы; в) - линза Ротмана, использованная для формирования 10 лепестков в азимутальном секторе от -45 до 45 град. Линза сложена пополам для уменьшения размеров; г) - натурные испытания приемо-передающей антенной системы для перспективной базовой станции сотовой связи диапазона 1.8-1.88 ГГц, формирующей 10 лучей в азимутальном секторе 90 градусов



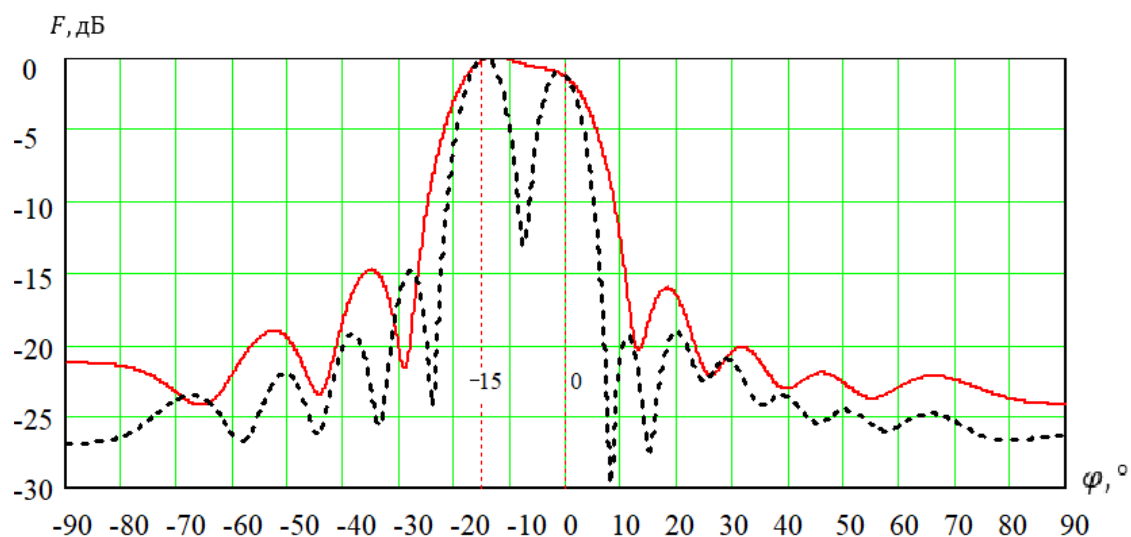


В)

Г)



Д)



е)

Рис.7. Результаты натурных исследований приемо-передающей антенной системы для перспективной базовой станции сотовой связи, и результаты формирования дополнительных (интерполяционных и экстраполяционных) виртуальных антенных элементов. а) - экспериментальные диаграммы направленности многолучевой антенной системы. По оси ординат отложен уровень сигнала в дБ относительно измерительной пирамидальной рупорной антенны; б) - зависимость амплитуд сигналов от азимутального угла падения для портов 2-11 линзы Ротмана, подключенных к приемнику. Рассматривался угловой сектор от 0 до 45 градусов с шагом 3 градуса. Рабочая частота 1,84 ГГц; в) - направления на источник радиоизлучения, полученные в результате вычисления коэффициентов корреляции измеренных и эталонных сигналов; г) - распределение фазы E_{θ} компоненты поля (основной поляризации) вблизи антенной решетки, при излучении по нормали к решетке, частота 1.88 ГГц; д) - нормированные диаграммы направленности: сплошная линия - реальная антенная решетка; пунктирная линия - интерполяционная виртуальная антенная решетка; пунктирная линия – экстраполяционная виртуальная антенная решетка; е) - зависимость плотности распределения мощности источников радиоизлучения от азимута для двух источников радиоизлучения

Методика проектирования антенных решеток, питаемых с помощью сложной линзы Ротмана, а также – методы формирования дополнительных «виртуальных» каналов приема внедрены в АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж) при разработке и создании пассивного когерентного радиолокатора.

Формирование виртуальной антенной решетки производится для повышения разрешающей способности приемной антенной системы за счет использования, наряду, с физическими каналами приема сигналов, дополнительных виртуальных каналов приема, формируемых с помощью процедур интерполяции и экстраполяции пространственного распределения электромагнитного поля. Для формирования интерполяционной антенной решетки использовался метод интерполяции кубическим сплайном. Для формирования экстраполяционной антенной решетки использовался метод линейного прогноза Бурга. Исходными данными для

формирования виртуальной антенной решетки являются измеренные значения напряженности поля на выходах физических антенных элементов.

В работе показано, что формирование дополнительных пространственных отсчетов поля, которые могут рассматриваться как элементы «виртуальной» антенной решетки, можно использовать для уменьшения уровня боковых лепестков (рис. 7, г) и для разрешения источников радиоизлучения, не разрешимых «реальной» антенной решеткой (рис. 7, е).

В заключении формулируются основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполнения поставленных научно-технических задач в диссертации разработана методика проектирования многолучевых антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана для систем радиопеленгации и связи.

В работе получены следующие результаты:

1. Проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологии производства антенных систем аппаратуры радиопеленгации и связи. Показано, что перспективными направлениями являются использование многолучевых антенных решеток с линзами Ротмана, тело которых сложено пополам, в целях уменьшения их габаритных размеров, а также – использование виртуальных антенных решеток интерполяционного и экстраполяционного типа.

2. Разработаны и исследованы методы обработки сигналов, основанные на формировании, путем интерполяции и экстраполяции их пространственных отсчетов, дополнительных «виртуальных» каналов приема, позволяющих повысить разрешающую способность приемных антенных систем, включающих в себя физические и «виртуальные» элементы. Показано, что эффективным способом формирования интерполяционных и экстраполяционных «виртуальных» элементов являются использование метода кубических сплайнов, а также - метода линейного прогноза Бурга.

3. Разработана методика проектирования многолучевых радиопеленгаторных антенных решеток дециметрового диапазона волн с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана для аппаратуры радиопеленгации и связи. Рассмотрены варианты линейных антенных решеток с диаграммообразованием в Е- и Н- плоскостях, состоящих из вибраторных элементов с рефлекторами и директорами, логопериодических антенн, антенн Вивальди и щелевых антенн с директорами. Показана возможность интегрального исполнения сверхширокополосной антенной решетки с формированием многолучевой диаграммы направленности в плоскости вектора напряженности электрического поля.

4. Разработана методика проектирования печатной линзы Ротмана дециметрового диапазона волн, тело которой сложено по прямой линии, основанная на использовании разработанной физико-математической модели разворота на 180 градусов полосковой линии передачи, в основе которой лежит использование метода частичных областей и редуцирования бесконечной парной системы

линейных алгебраических уравнений с учетом условия Мейкснера на острых ребрах.

5. Проведены конструкторская проработка вариантов многолучевых антенных систем, состоящих из вибраторных и щелевых элементов с директорами, выполнены натурные экспериментальные исследования аппаратуры радиопеленгации, оснащенной многолучевыми антенными решетками. Показано, что использование многолучевых антенных систем позволяет существенно повысить энергетический потенциал систем радиопеленгации и связи, а также - существенно повысить разрешающую способность систем радиопеленгации по угловым координатам.

Основные результаты исследования опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Проскурин, Д.К. Исследование метода аппроксимации электромагнитного поля в области расположения оптической антенной решетки, основанного на использовании вспомогательных источников поля / Д.К. Проскурин, Ю.Г. Пастернак, К.С. Сафонов, Ф.С. Сафонов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14. – № 1. – С. 122-132.

2. Войтенко, С.Р. Формирование пространственных отсчетов оптического поля в области расположения оптической антенной решетки / С.Р. Войтенко, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, К.С. Сафонов, Ф.С. Сафонов, С. М. Фёдоров // Телекоммуникации. Наука и технологии – 2020. – № 1 С. 18-26

3. Проскурин, Д.К. Методология дефектоскопии и калибровки оптических фазированных антенных решеток, основанная на аппроксимации пространственной структуры поля с помощью метода вспомогательных источников / Д.К. Проскурин, Ю.Г. Пастернак, К.С. Сафонов, Ф.С. Сафонов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14. № 1. С. 101-108.

4. Войтенко, С.Р. Методика дефектоскопии и калибровки фазированных антенных решеток оптического диапазона / С.Р. Войтенко, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, К.С. Сафонов, Ф.С. Сафонов, С. М. Фёдоров // Телекоммуникации. Наука и технологии – 2019. – № 11. С. 15-21.

5. Ашихмин, А.В. Проектирование перспективных конструкций антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана / А.В. Ашихмин, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Ф.С. Сафонов, С.М. Федоров, И.А. Зеленин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. – № 3. – С. 27-34

6. Ашихмин, А.В. Разработка и исследование линейной антенной решетки из печатных логопериодических антенн, запитанных с помощью линзы Ротмана / А.В. Ашихмин, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Ф.С. Сафонов, С.М. Федоров, И.А. Зеленин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020– Т. 16. – № 3. – С. 73-79

7. Ашихмин, А.В. Антенная система на основе плоской линзы Лüneберга со сквозными круглыми отверстиями и осесимметричного ТЕМ-рупора / А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Ф.С. Сафонов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020– Т. 16. – 2020 – № 6. – 2020 – С. 49-56

8. Пастернак, Ю.Г. Математическая модель модифицированной линзы Ротмана, выполненной на основе несимметричной полосковой линии / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Ф.С. Сафонов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020– Т. 16. – № 6. – С.102-108

9. Ашихмин, А.В. Антенная система с коммутационным сканированием на основе плоской линзы Люнеберга с концентрическими кольцами / А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Ф.С. Сафонов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021– Т. 17. – № 2. – С.54-65.

10. Быков, К.А. Плоская линза Люнеберга на основе печатной схемы с проводниками криволинейной формы / К.А. Быков, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Ф.С. Сафонов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы – 2021– Т. 24. – № 1. – С. 48–57

11. Болкунов А.А. Формирование дополнительных виртуальных каналов приема при обработке сигналов на выходах элементов антенной решетки перспективной базовой станции сотовой связи / Болкунов А.А., Овчаренко Л.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Попов И.В., Сафонов Ф.С., Федоров С.М. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2021– Т. 24. – № 2. – С. 79-87

12. Пастернак Ю.Г. Формирование дополнительных виртуальных каналов приема путем интерполяции и экстраполяции сигналов, принятых линейной антенной решеткой / Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Сафонов Ф.С., Федоров С.М. // Теория и техника радиосвязи – 2021– №: 3. – С. 51-66

13. Проскурин Д.К. Аппроксимация пространственной структуры оптического поля в многоканальных оптических системах: монография / Д.К. Проскурин, Ю.А. Рембовский, К.С. Сафонов, Ф.С. Сафонов; под ред. Ю.Г. Пастернака. // ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – 2018 – 120 С.

Публикации в изданиях, входящих в базу данных Scopus

14. Pasternak , Yu G. Formation of spatial responses of the optical field in the region of location of the optical antenna array / Yu G Pasternak , K S Safonov , F S Safonov , S M Fedorov , A V Volodko, E A Ischenko // \IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. – 2021– Eng. 1061 012030.

Статьи и материалы конференций

15. Проскурин, Д. К. Исследование метода аппроксимации электромагнитного поля в области расположения оптической антенной решетки, основанного на использовании вспомогательных источников поля/ Д. К. Проскурин, Ю. Г. Пастернак, К. С. Сафонов, Ф. С. Сафонов./ XXIV Международная НТК «Радиолокация, навигация, связь». – 2018– Изд-во ВГУ. – Т. 5.

16. Проскурин, Д. К. Методология дефектоскопии и калибровки оптических фазированных антенных решеток, основанная на аппроксимации пространственной структуры поля с помощью метода вспомогательных источников/ Д. К. Проскурин, Ю. Г. Пастернак, К. С. Сафонов, Ф. С. Сафонов./ XXIV Международная НТК «Радиолокация, навигация, связь». – 2018– Изд-во ВГУ. – Т. 5. – С. 125-137

17. Овчаренко, А.А. Разработка и исследование модифицированной линзы Ротмана в качестве диаграмообразующей схемы линейной антенной решетки / А.А. Овчаренко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, И.В. Попов, Ф.С. Сафонов // XXV

Международная научно-техническая конференция «радиолокация, навигация, связь». – 2019– Изд-во ВГУ – Т.3– С. 323-336.

18. SAFONOV F.S. DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MODIFIED LENSES ROTHMAN AS DIAGRAMMABLE DIAGRAMS LINEAR ANTENNA ARRAY // Материалы IX Международной научно-практической конференции.– 2019.

19. Ашихмин А.В. Варианты конструктивного построения антенных решеток с коммутационным сканированием в плоскости вектора напряженности электрического поля, питаемых с помощью печатной линзы Ротмана / Ашихмин А.В., Иванов А.В., Пастернак Ю.Г., Першин П.В., Попов И.В., Сафонов Ф.С. // XXVI Международной научно-технической конференции. –2020. – С. 132-144.

20. Ашихмин А.В., Иванов А.В., Пастернак Ю.Г., Першин П.В., Сафонов Ф.С., Сверхширокополосная антенная решетка с широкоугольным сканированием из печатных логопериодических элементов с запиткой печатной линзой Раппопорта / Ашихмин А.В., Иванов А.В., Пастернак Ю.Г., Першин П.В., Сафонов Ф.С./ XXVI Международной научно-технической конференции. – 2020. – С. 28-37

21. Болкунов А.А. Перспективная базовая станции сотовой связи с использованием модифицированной линзы Ротмана / Болкунов А.А., Овчаренко Л.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Попов И.В., Сафонов Ф.С., Федоров С.М. // Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова. – 2021. – Т.4. –С. 90-97

Подписано в печать 13.07.2023.

Формат 60х84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, 20-летия Октября, д.84