

На правах рукописи



САФОНОВ Кирилл Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПУТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ АНТЕННЫХ
СИСТЕМ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ ТЕРМИНАЛОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ
СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ**

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Пастернак Юрий Геннадьевич

Официальные оппоненты: **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» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, кафедра автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительных систем), доцент

Ахияров Владимир Влерович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПК «НИИДАР»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара

Защита состоится 11.04.2024 г. в 15⁰⁰ 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 (конференц-зал).

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



Федоров Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Необходимость совершенствования антенных систем мобильных терминалов высокоскоростной спутниковой связи обусловлена следующими факторами:

- потребностью в аппаратуре спутниковой связи с высокой скрытностью функционирования, излучающей и принимающей сверхширокополосные сигналы;
- необходимостью минимизации габаритных размеров антенных систем бортового и мобильного базирования;
- необходимостью развития отечественной элементной и технологической базы;
- потребностью в малогабаритных системах спутниковой телекоммуникации, доступных по стоимости широкому кругу пользователей;
- необходимостью развития спутниковых систем управления аппаратурой военного и гражданского назначения;
- развитием точного земледелия.

Для обеспечения надежной связи в Арктике и в северных широтах, помимо геостационарных спутников, государственной корпорацией «Роскосмос» запущены спутники, движущиеся по высокоорбитальным траекториям. Для быстрого переключения со спутника на спутник, входящего в зону видимости абонента, необходимо использовать антенные системы с электронным сканированием главным лепестком диаграммы направленности.

Для создания отечественных цифровых фазированных антенных решеток (ФАР) для мобильных и бортовых терминалов спутниковой связи необходима элементная база отечественного производства, создание которой в настоящее время является одной из приоритетных.

Созданию антенных систем с коммутационным сканированием препятствует отсутствие технологий производства относительно недорогих линз Люнеберга отечественного производства, а также – многоканальных СВЧ- коммутаторов с приемлемыми потерями.

При разработке терминалов спутниковой связи мобильного или бортового базирования важной задачей является выбор таких технических решений, которые обеспечат приемлемую стоимость серийного изделия, обеспечивающую конкурентноспособную цену на Российском рынке.

Антенная система для терминалов спутниковой связи должна удовлетворять требованиям различных групп потребителей:

- для бытового сектора – должна иметь низкую стоимость и малый вес (для установки на легковой автомобиль);
- для железнодорожного и ведомственного транспорта – удовлетворять жестким условиям эксплуатации.

Научно-техническая задача проектирования антенной системы терминала подвижной связи усложняется тем, что терминал спутниковой связи должен обрабатывать динамику движения транспортного средства, на котором размещена антенна:

- обеспечивать поддержание точности наведения антенной системы на спутник по азимуту с точностью не хуже 0.5° ;

- обеспечивать скорость вращения по азимуту – не менее 60°/с;
- обеспечивать отработку параметров крена и тангажа в диапазоне изменений $\pm 30^\circ$, скорость изменения – не более 100°/с;
- обрабатывать изменение угловой скорости в азимутальном направлении – не более 60°/с.

Для обеспечения работы с существующей спутниковой группировкой, расположенной на геостационарной орбите, требуются антенные системы, имеющие коэффициент усиления не менее 32÷35 дБ. Для обеспечения этих требований антенная система на основе фазированной антенной решетки (ФАР) должна содержать не менее 1500 элементов, а антенна на основе параболического отражателя должна иметь диаметр не менее 55-60 см. Учитывая то, что антенные системы будут устанавливаться на подвижном транспорте, они должны обладать возможностью оперативного управления диаграммой направленности.

Степень разработанности темы. Несмотря на большое число публикаций в области антенных систем для спутниковой связи (Abbasi M. I., Alexandrov N., Alireza Mahanfar M., Sanad, Aljuhani A. H., Alkhateeb B., Ascii Y., Asha R., Baggen L., Ban Leong Ooi, Basari B., Bellaveglia G., Bialkowski M. E., Boccia L., Bolandhemmat H., Bongard F., Boulos F., Brand J., Cadili T., Caizzone S., Cañete-Rebenaque D., Carrier J. P., Chartrand M. R., Corman D., Costa J. R., Crofts A., Cuevas E. G., Del Mastro M., del Río D. L., DiMaggio F., DiMarca F., Eedala S. H., Elakiyaa S., Elbert B. R., Fakharzade M. H, Feng Y. J., Fernandes C. A., Fonseca N. J. G., Fujiang Lin, Gao S., Gil Martínez A., Gómez-Tornero J. L., Hassan N., Holzwarth S., Hooper R., Hu Y. F., Hum S. V., Imbriale A., Ismail M. Y., Ito K., Jacob A. F., Jamali S. H., Jaschke T., Jayakumar M., Johannsen U., Kanar T., Kanar T., Litschke O., Litun V. I., Lo Forti R., Lyulyukin K. V., Marcellini L., Matos S. A., McMorro R., Minoli D., Mollura C., Mousavi P., Nafe A., Naseri P., Navarro J., Nethra R., Nink R., Ohmori, Oliver T., Padilla J., Poveda-García M., Rabinovich V., Raeesi A., Rafi G. Z., Rebeiz G. M., Rebeiz G. M., Russo M., Saam T., Safavi-Naeini S., Saito K., Sayidmarie K. H., Sheriff R. E., Simon W., Takahashi M., Tripodi M., Vaccaro S., Viganó M. C., Vilenskiy A. R., Weerackody V., Wei Low K. K., Zhao J. M., Zhu B. O., Zihir S., Zihir S., Боделан Б. Г., Климов К. Н., Логачёв П. В., Митин В.А., Позднякова Р.Д., Синани А.И., Хрупало Д. А., Щербаков В.И., Ястребов Б.П., и др.), многие важные научно-технические задачи, связанные с созданием антенных систем для мобильных и бортовых терминалов высокоскоростной спутниковой связи, исследованы в недостаточной степени:

- пути построения конструктивно простых низкопрофильных антенных систем для мобильных и бортовых терминалов высокоскоростной спутниковой связи с электронным сканированием в угло-местной плоскости в секторе углов шириной 90°;
- методология проектирования многолучевых цилиндрических волноводно-целевых антенных решеток, запитанных с помощью плоской линзы Люнеберга, использование которых позволяет реализовать непрерывную передачу и прием информации при переключении антенной системы мобильного или бортового терминала спутниковой связи со спутника на спутник;

- методы формирования виртуальных антенных решеток для минимизации боковых лепестков приемной антенной системы при широкоугольном сканировании в широкой полосе частот;

- пути построения антенных систем для мобильных терминалов высокоскоростной спутниковой связи, функционирующих в полосе частот с коэффициентом перекрытия 1.5 и более.

Объектом исследования являются антенные системы для мобильных и бортовых терминалов высокоскоростной спутниковой связи.

Предметом исследования является методика проектирования антенных систем для мобильных и бортовых терминалов высокоскоростной спутниковой связи, а также - методы формирования интерполяционной «виртуальной» антенной решетки, используемой для снижения уровня боковых лепестков при максимальном отклонении луча.

Целью работы является разработка методики проектирования антенных решеток для мобильных и бортовых терминалов высокоскоростной спутниковой связи Ку-диапазона, применение которой дает возможность:

- существенно расширить область сканирования, в которой значительно улучшено активное согласование элементов ФАР и увеличена степень развязки элементов по внешнему полю;

- формирования лепестков в полосе частот от 10.7 ГГц до 14.5 ГГц в угло-местном секторе шириной 90° при вариации коэффициента усиления антенной решетки при изменении угла места, пропорциональной проекции апертуры ФАР на плоскость, перпендикулярную направлению главного лепестка диаграммы направленности;

- формировать одновременно несколько лепестков диаграммы направленности;

- предотвращения ослепления фазированной антенной решетки при широкоугольном сканировании в полосе частот с коэффициентом перекрытия 1.355 и более.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Проведение анализа технического состояния, перспектив развития и тенденций развития мобильных и бортовых терминалов высокоскоростной спутниковой связи.

2. Развития методов автоматизированного проектирования многолучевых антенных решеток с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана для мобильных и бортовых терминалов высокоскоростной спутниковой связи.

3. Исследования и разработки методов формирования «виртуальных» антенных решеток для снижения боковых лепестков приемной антенной системы, включающей в себя, помимо физических элементов ФАР, «виртуальные» элементы – вычисленные значения компонент электромагнитного поля в ряде дополнительных точек пространства.

4. Разработка методики проектирования антенных решеток для мобильных и бортовых терминалов высокоскоростной спутниковой связи Ку-диапазона.

5. Проведения натуральных экспериментальных исследований макета приемной активной ФАР из сегменто-параболических элементов, возбуждаемой с помощью печатной линзы Ротмана и многоканального СВЧ- коммутатора, а также – путей улучшения характеристик ФАР при широкоугольном сканировании.

Научная новизна работы состоит в следующем:

разработана методика проектирования печатной линзы Ротмана, созданной на основе технологии реализации симметричной полосковой линии, отличающаяся использованием полосковых симметрирующих и согласующих трансформаторов, питающих тело линзы, синтезированных с учетом входных характеристик элементов ФАР в составе решетки;

разработаны методики проектирования волноводной линзы Ротмана с ТЕМ-волной, а также – волноводной линзы Ротмана с основной магнитной волной волноводного типа H_{10} , позволяющие существенно снизить потери в диаграммообразующей системе ФАР, и уменьшить значение шага антенной решетки, благодаря чему снижается уровень боковых лепестков при сканировании секторе шириной 90° в полосе частот, соответствующей Ku- диапазона спутниковой связи;

разработана методика проектирования ФАР, минимизирующая ослепление решетки при широкоугольном сканировании, основанная на использовании благодаря короткозамкнутых карманов с емкостным поверхностным импедансом с глубиной более четверти и менее половины длины волны в апертуре антенных элементов; в качестве другого способа улучшения активного согласования элементов ФАР при широкоугольном сканировании в широкой полосе частот используется наличие диэлектрических пластин переменной ширины, возбуждаемых сегменто-параболическими элементами антенной решетки;

разработана методика формирования интерполяционных «виртуальных» антенных решеток для снижения уровня боковых лепестков приемной антенной системы, включающей в себя, помимо физических элементов ФАР, «виртуальные» элементы – вычисленные значения компонент электромагнитного поля в ряде дополнительных точек пространства, лежащих между физическими элементами ФАР;

показана возможность неискаженного излучения сверхширокополосного импульса ФАР из сегменто-параболических антенн, где в качестве диаграммообразующей схемы выбрана линза Ротмана, построенная на основе симметричной полосковой линии.

Теоретическая значимость работы заключается в создании методологии анализа и синтеза антенных решеток для мобильных и бортовых терминалов высокоскоростной спутниковой связи, а также - методов формирования интерполяционной «виртуальной» антенной решетки, используемой для снижения уровня боковых лепестков при максимальном отклонении луча от нормали к апертуре ФАР. Показано, что использование интерполяционной виртуальной антенной решетки позволяет существенно снизить уровень боковых лепестков приемной антенной системы, компенсируя, тем самым, эффект ослепления ФАР при максимальном отклонении лепестка на частотах, соответствующих возникновению поверхностных волн над апертурой ФАР.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики проектирования, создании и испытании макета антенной системы мобильного терминала спутниковой связи с повышенной степенью скрытности функционирования, за счет реализации возможности неискаженного приема и передачи сверхширокополосных сигналов, а также – существенной упрощении технологии изготовления ФАР и диаграммообразующей системы.

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

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

выяснено, что в полосе частот, характеризующейся максимальным значением коэффициента стоячей волны около 2, суммарные потери в антенной системе цилиндрической формы варьируются от 2.5 до 4.8 дБ. Для снижения влияния потерь на шумовую температуру приемной антенной системы, а также – для повышения ее КПД в режиме излучения следует использовать активные антенные элементы: подключать малощумящие усилители непосредственно к выходам антенных элементов приемной антенной системы и усилители мощности – ко входам элементов передающей антенной системы, с целью минимизации влияния потерь в линзе Ротмана;

установлено, что диаграммы направленности элементов в составе ФАР из 16 сегменто-параболических элементов с диэлектрическими клиньями в раскрывах характеризуются уплощением и расширением главного лепестка, при этом глубокие провалы в его области отсутствуют, что позволяет существенно расширить область сканирования, в которой значительно улучшено активное согласование элементов ФАР. Использование диэлектрических клиньев, кроме того, позволяет существенно улучшить согласование соседних элементов и увеличить степень их развязки;

выяснено, что использование волноводной волны основного магнитного типа в теле линзы Ротмана и в линиях задержки позволяет существенно уменьшить потери мощности (по сравнению с коаксиальными кабелями), что дает возможность существенно повысить коэффициент полезного действия пассивных ФАР с линзой Ротмана; кроме того, запитка тела линзы прямоугольными волноводами с соседними широкими стенками, дает возможность увеличить число входов и выходов линзы Ротмана; однако, недостатком данного подхода является сильная дисперсия волн волноводного типа, что существенно сужает полосу частот функционирования ФАР, питаемое подобной линзой Ротмана;

установлено, что использование интерполяционной виртуальной антенной решетки помогает решить проблему возрастания уровня боковых лепестков при отклонении главного лепестка на угол 45° от нормали к апертуре – уровень боковых лепестков интерполяционной антенной решетки при сканировании в секторе $\pm 45^\circ$ не превышает -12 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 диссертаций были представлены на следующих научных конференциях: XXIV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж 2018); IX Международной научно-практической конференция «Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности» (Воронеж 2019). XXV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж 2019); XXVI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж 2020).

Реализация и внедрение результатов работы.

Наиболее значимые результаты работы внедрены в АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж) при разработке и создании антенной решетки для мобильного терминала спутниковой связи. 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 диссертаций опубликованы в следующих работах: 10 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 работа опубликована в издании, индексируемом в международных цитатно-аналитических базах данных Web of Science и Scopus, 5 работ представлено в сборниках трудов международных научно-технических конференций и других научных публикаций.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации, имеющие научную новизну и выносимые на защиту были получены автором самостоятельно. В работах [1-4,10,12,13] автором исследована методика аппроксимации пространственной структуры оптического поля в точках расположения элементов «виртуальной» антенной решетки с использованием метода вспомогательных источников поля, проведено исследование возможности использования виртуальной антенной решетки, сформированной на плоскости расположения элементов реальной решетки, для повышения разрешающей способности многоканальной оптической системы. В работах [5,16] автором рассмотрена возможность размещения линейной вибраторной антенной решетки, предназначенной для функционирования в диапазоне частот от 8 ГГц до 18 ГГц, и плоской линзы Ротмана, реализованной на многослойной печатной плате. В работе [6] автором построена и исследована математическая модель излучающей апертуры ФАР, основанная на использовании метода конечных областей. В работах [7,9,11] автором исследована многолучевая антенная решетка, состоящая из сегменто-параболических антенных элементов, запитанных с помощью

печатной линзы Ротмана, исследованы перспективные направления улучшения активного согласования элементов при широкоугольном сканировании в широкой полосе частот, а также показана перспективность использования методов формирования «виртуальных» антенных решеток для снижения боковых лепестков приемной антенной системы, включающей в себя, помимо физических элементов ФАР, «виртуальные» элементы – вычисленные значения компонент электромагнитного поля в ряде дополнительных точек пространства. В работе [8] автором исследована антенная решетка, состоящая из волноводно-щелевых элементов, размещенных на $3/4$ части боковой поверхности цилиндра с круглым основанием, где в качестве диаграммообразующей системы антенной решетки использована плоская линза Люнеберга. В работах [14-15] автором сформулированы основные технические требования к антенной системе терминала высокоскоростной спутниковой связи мобильного или бортового базирования, сформирована концепция его построения и структура.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует п. 2, 3, 9 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 163 страницах, содержит 160 рисунков.

Во введении приведено обоснование научной новизны и научно-практической значимости работы. Определяются основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологии производства мобильных терминалов спутниковой связи.

В главе 2 сформулированы основные технические требования к антенной системе терминала высокоскоростной спутниковой связи мобильного или бортового базирования, сформирована концепция построения терминала и определена его структура. Проведено исследование плоской волноводно-щелевой антенной решетки (рис. 1) приемной антенной системы терминала спутниковой связи мобильного или бортового базирования Ку-диапазона, которое показало, что при изменении частоты в пределах от 10.7 до 12.5 ГГц перемещение главного лепестка диаграммы направленности в азимутальной плоскости составляет около 23° (рис. 2). Данное обстоятельство ограничивает ширину полосы рабочих частот, ограниченную снижением коэффициента усиления антенны на 3 дБ величиной, приблизительно составляющей $9 \div 11$ МГц в указанном диапазоне частот.

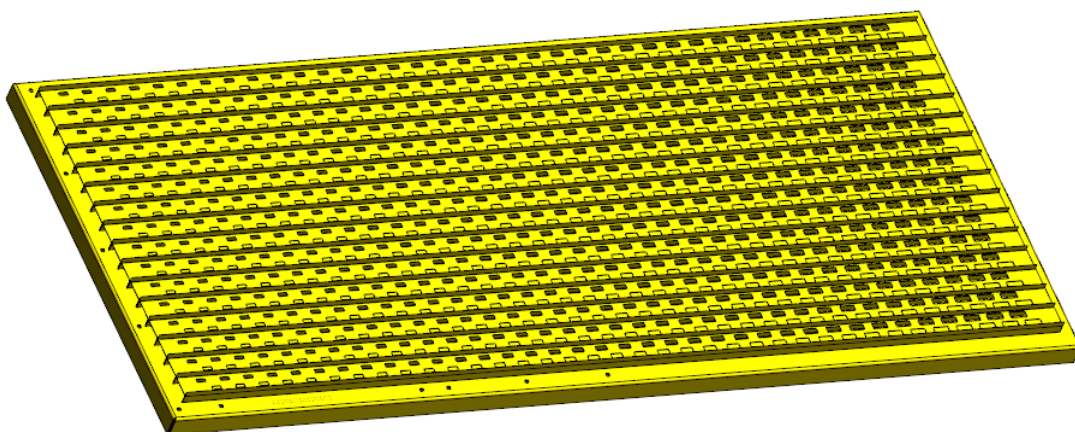


Рис. 1. Модель волноводно-щелевой антенной решетки приемной антенной системы мобильного терминала спутниковой связи

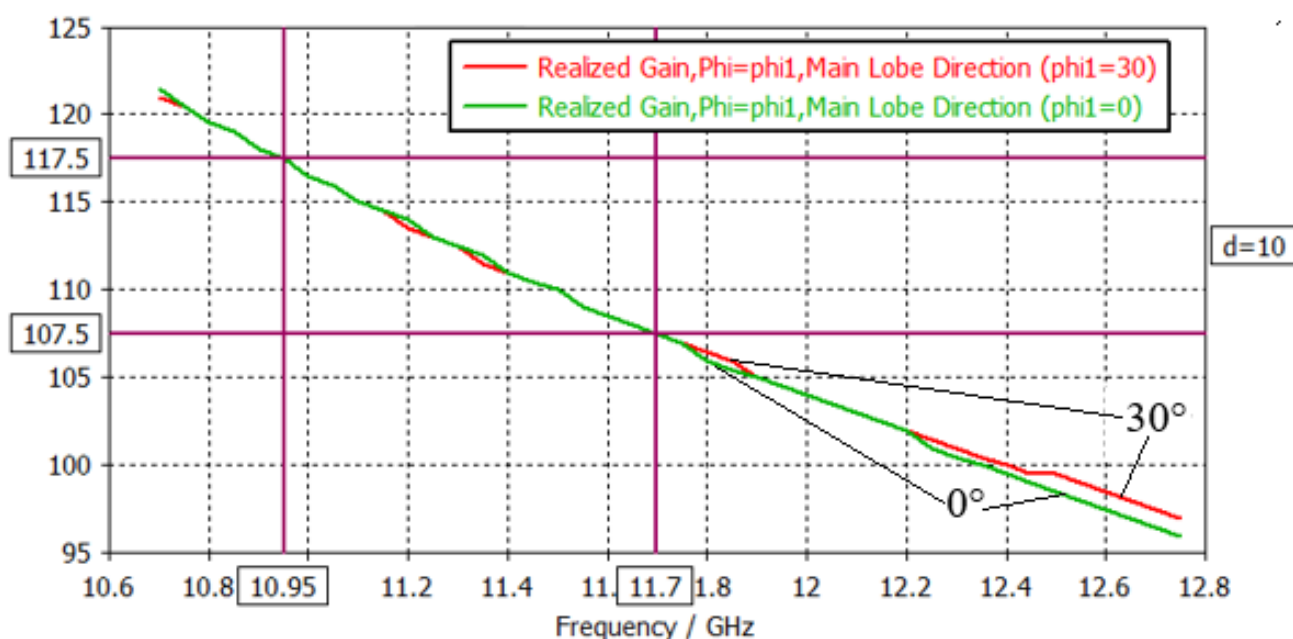


Рис. 2 Частотные зависимости ориентации главного лепестка в азимутальной плоскости при синфазном распределении поля в угломестной плоскости и отклонении на угол 30° в угломестной плоскости

Разработаны проходные и отражательные фазовращатели на основе квадратурного моста с управляемыми емкостными нагрузками. При выборе схемы фазовращателя было отдано предпочтение фазовращателю, построенному на основе квадратурного моста с управляемыми емкостными нагрузками, реализованными в виде варикапов. Для проектирования фазовращателей на гибридном мосте с 4-мя варикапами были использованы варикапы SMV2019-040LF в корпусе SOD-882 ($LS = 0.45 \text{ nH}$). Топология фазовращателя приведена на рис. 3

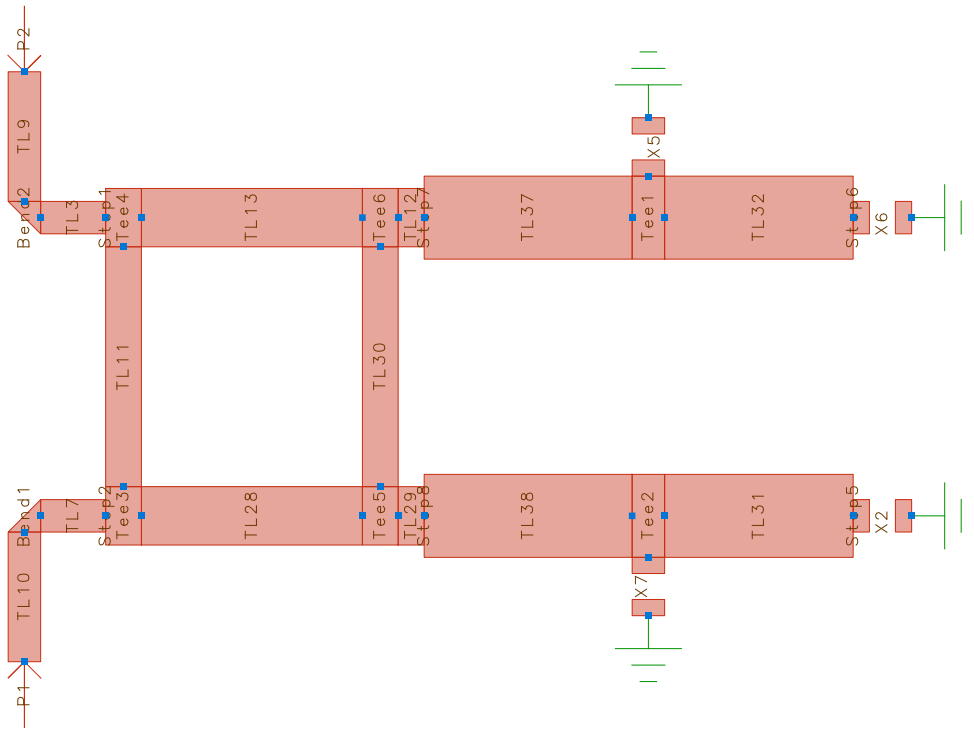


Рис. 3 Топология фазовращателей на гибридном мосте с 4-мя варикапами SMV2019-040LF в корпусе SOD-882

Разработана математическая модель излучающей апертуры ФАР, основанная на использовании полубесконечных плоских волноводов (область 3 на рис. 4), разделенных между собой короткозамкнутыми пазами (область 2 на рис. 4), рис. 4.

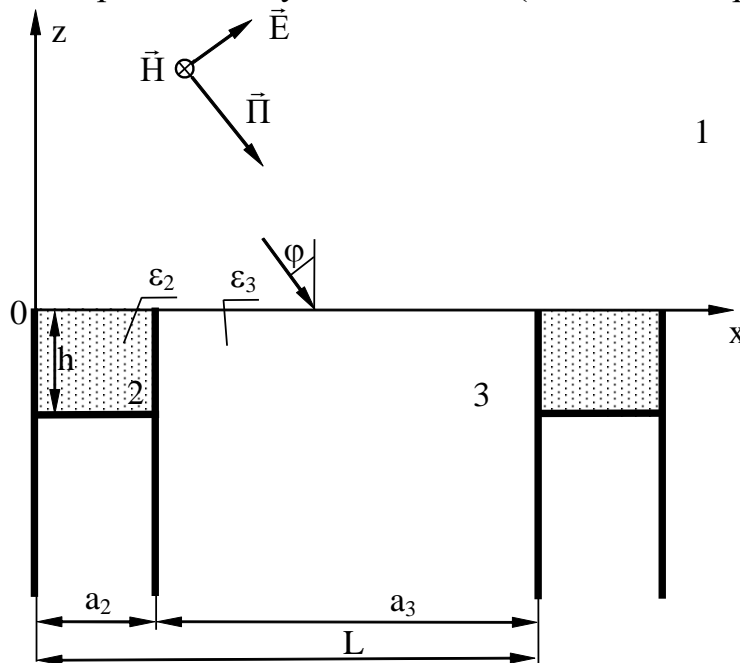


Рис. 4. Модель излучающей апертуры ФАР

Была получена редуцированная система уравнений, при сшивании касательной компоненты электрического поля, которая имеет вид:

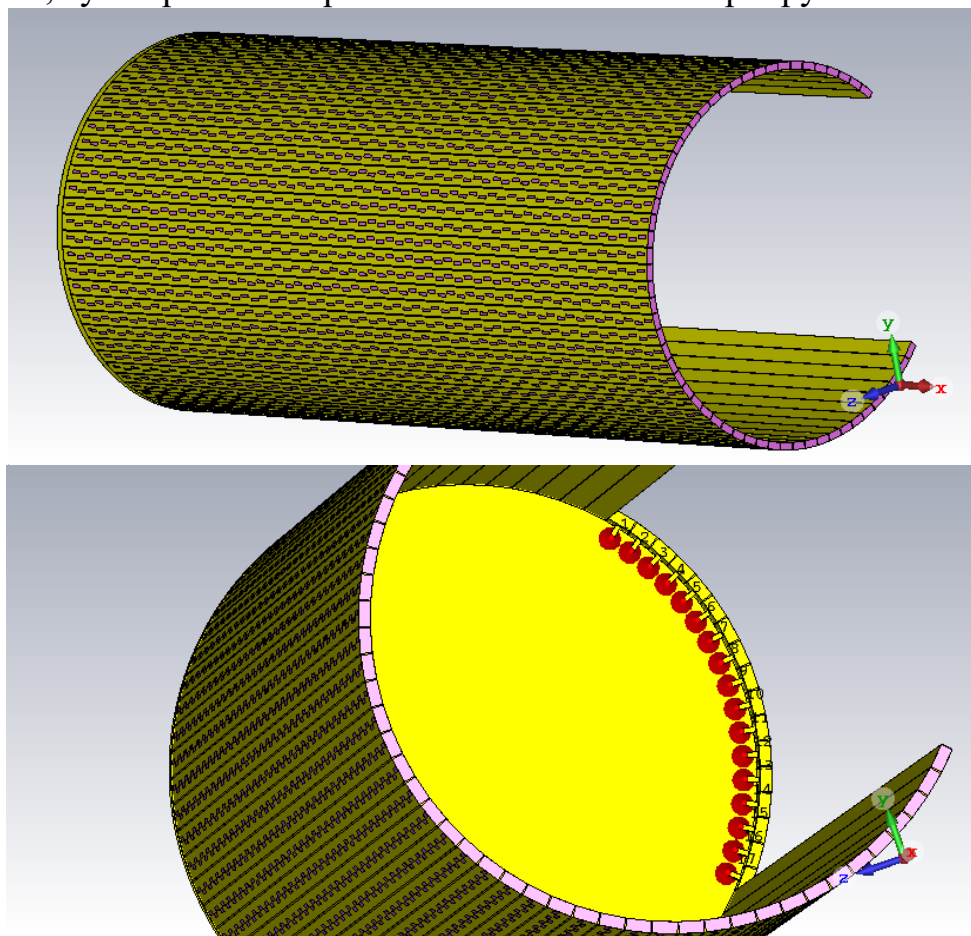
$$j\gamma_n A_n - \frac{1}{\epsilon_2} \sum_{m=0}^{M_2-1} d_m^{(2)} D_m^{(2)} b_{nm} \sin[d_m^{(2)} h] = \delta_{n,0} j\gamma_0, \quad n = -N_1 \div N_2,$$

$$j\gamma_n A_n + \frac{1}{\varepsilon_3} \sum_{m=0}^{M_3-1} d_m^{(3)} D_m^{(3)} c_{nm} = \delta_{n,0} j\gamma_0, \quad n = -N_1 \div N_2$$

$$M = M_2 + M_3 = N_1 + N_2 + 1.$$

Третья глава посвящена исследованию и разработке перспективных путей построения фазированных антенных решеток для мобильных и бортовых терминалов спутниковой связи.

Разработана и исследована цилиндрическая волноводно-щелевая антенная решетка с диаграммообразующей системой на основе плоской линзы Лüneберга, которая позволяет формировать одновременно несколько лепестков диаграммы направленности в угломестном секторе шириной 90° и обеспечивает стабильность коэффициента усиления при изменении угла места, а также позволяет снизить проявление эффектов связанных с ослеплением решетки за счет круговой формы основания цилиндра, на боковой поверхности которой размещены ее волноводно-щелевые элементы. Конструкция и параметры цилиндрической волноводно-щелевой антенной решетки с диаграммообразующей системой на основе плоской линзы Лüneберга показана на рис. 5. Полоса рабочих частот антенной системы – от 10.9 до 14.5 ГГц; поляризация – вертикальная. Из приведенных зависимостей видно, что в полосе частот, характеризующейся максимальным значением коэффициента стоячей волны около 2, суммарные потери в антенной системе варьируются от 2.5 до 4.8 дБ.



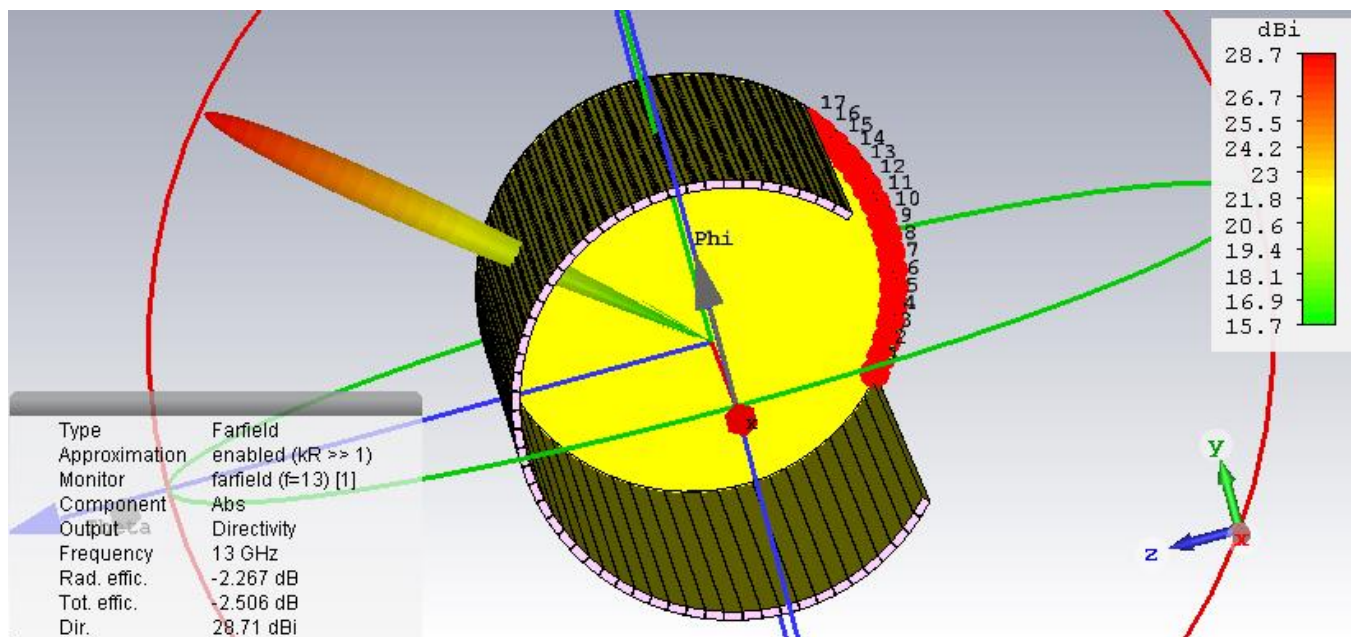
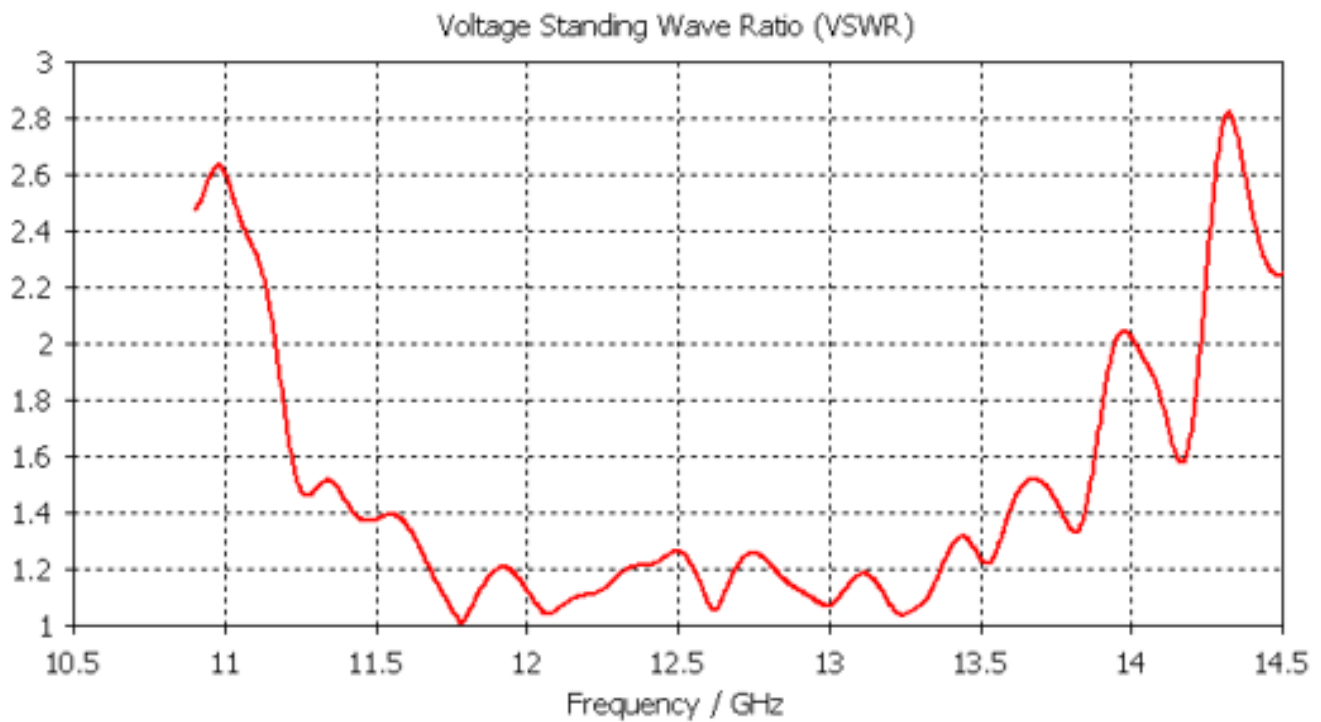


Рис. 5 Исследуемая модель цилиндрической волноводно-щелевой антенной решетки с диаграммообразующей системой на основе плоской линзы Лüneберга, коэффициент стоячей волны на входе антенны, диаграммы направленности антенной системы на частоте 13 ГГц

Исследована возможность реализации линейной фазированной антенной решетки, состоящей из 8 элементов, запитываемой с помощью линзы Ротмана, выполненных на единой многослойной печатной плате (рис. 6), которая позволяет сканировать в азимутальной плоскости в рабочем диапазоне частот от 8 до 18 ГГц.

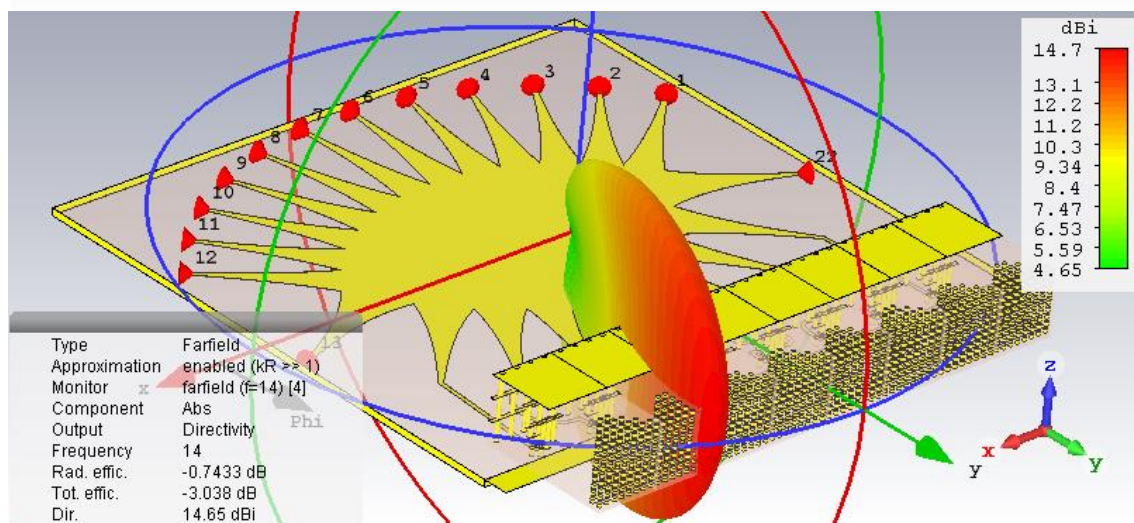
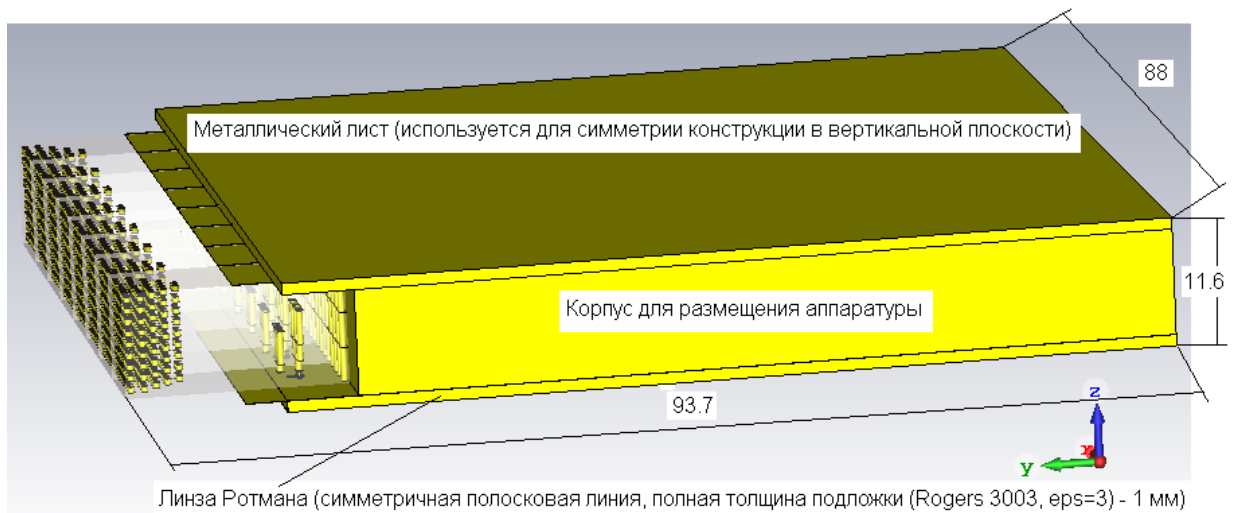


Рис. 6 Модель линейной ФАР из 8 элементов, запитываемой с помощью линзы Ротмана, выполненных на одной многослойной печатной плате, главный лепесток ФАР на частоте 14 ГГц

Разработана методика проектирования волноводной линзы Ротмана с ТЕМ-волной и основной магнитной волной волноводного типа Н10 (рис. 7), где использование волноводной волны основного магнитного типа в теле линзы Ротмана и в линиях задержки позволяет существенно уменьшить потери мощности (по сравнению с коаксиальными кабелями), что дает возможность существенно повысить коэффициент полезного действия пассивных ФАР с линзой Ротмана, кроме того, запитка тела линзы прямоугольными волноводами с соседними широкими стенками, дает возможность увеличить число входов и выходов линзы Ротмана, функционирующей в узкой полосе частот Ку- диапазона, состоящей из 24 элементов, расположенных с периодом 12 мм.

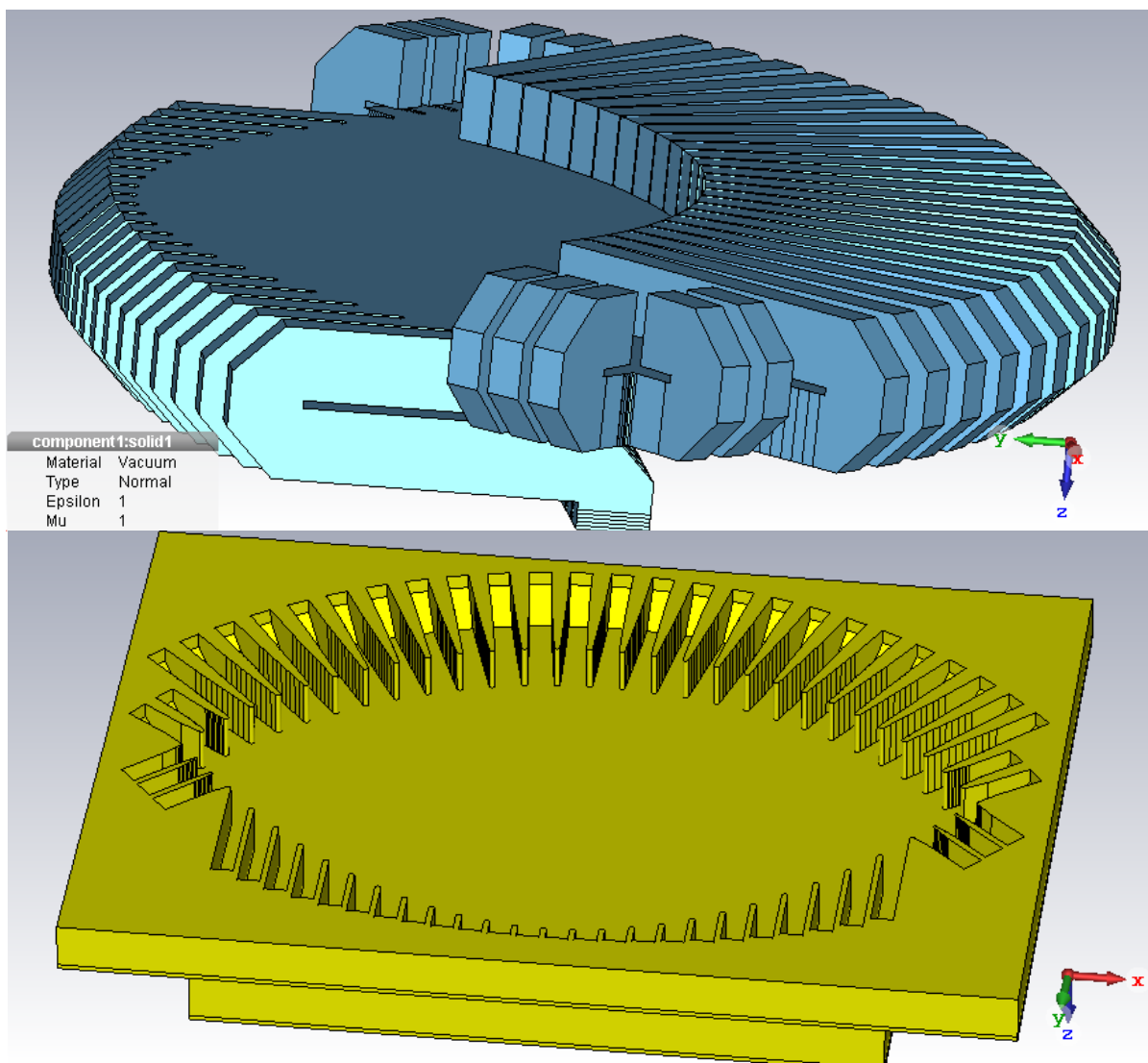


Рис. 7 Полости волноводной линзы Ротмана и ее модель с основной волной магнитного типа с 25 положениями луча для запитки ФАР

В главе 4 изложены результаты исследований многолучевой антенной решетки, состоящей из сегменто-параболических антенн, запитанных с помощью печатной линзы Ротмана. Антенная решетка состоит из 24 параболических секторных антенн с короткозамкнутыми карманами с емкостным характером поверхностного импеданса, используемых для уменьшения интенсивности поверхностных волн, бегущих вдоль решетки, интерферирующих с объемными волнами и ухудшающими согласование элементов с фидерным трактом и диаграмму направленности ФАР, особенно – при максимальном отклонении луча от нормали, рис. 8.

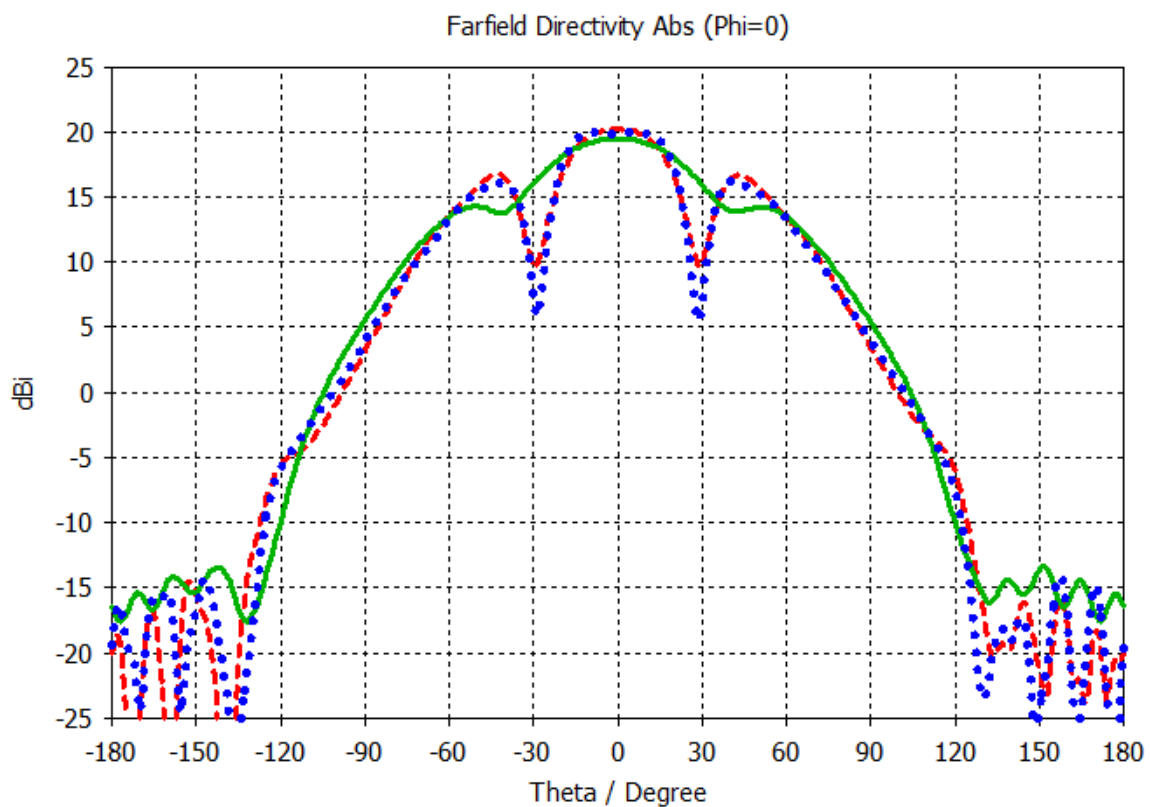
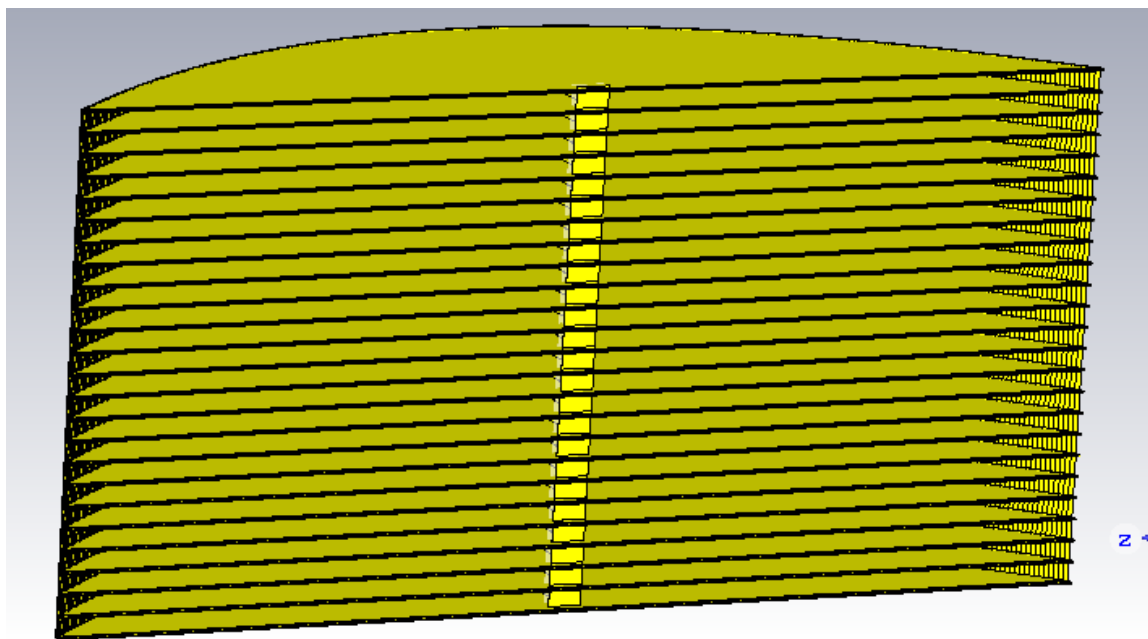


Рис. 8 Общий вид антенной решетки из 24 сегменто-параболических антенн, Диаграммы направленности сегменто-параболического элемента в составе линейной решетки: пунктирная линия – глубина пазов 0.5 мм; сплошная линия – глубина пазов 3 мм; линия из точек – глубина пазов 5 мм

Также рассмотрен способ минимизации ослепления ФАР при широкоугольном сканировании в широкой полосе частот, который заключается в размещении диэлектрических клиньев с длиной до двух длин волн в свободном пространстве, в раскрывах сегменто-параболических элементов антенной решетки (рис. 9), что позволяет существенно расширить область сканирования, улучшить согласование соседних элементов и увеличить степень их развязки.

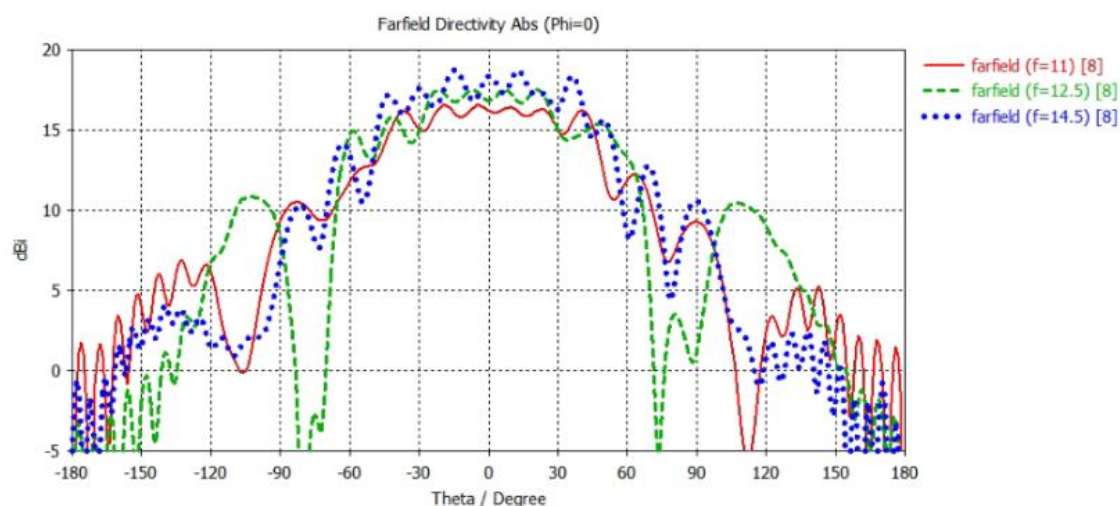
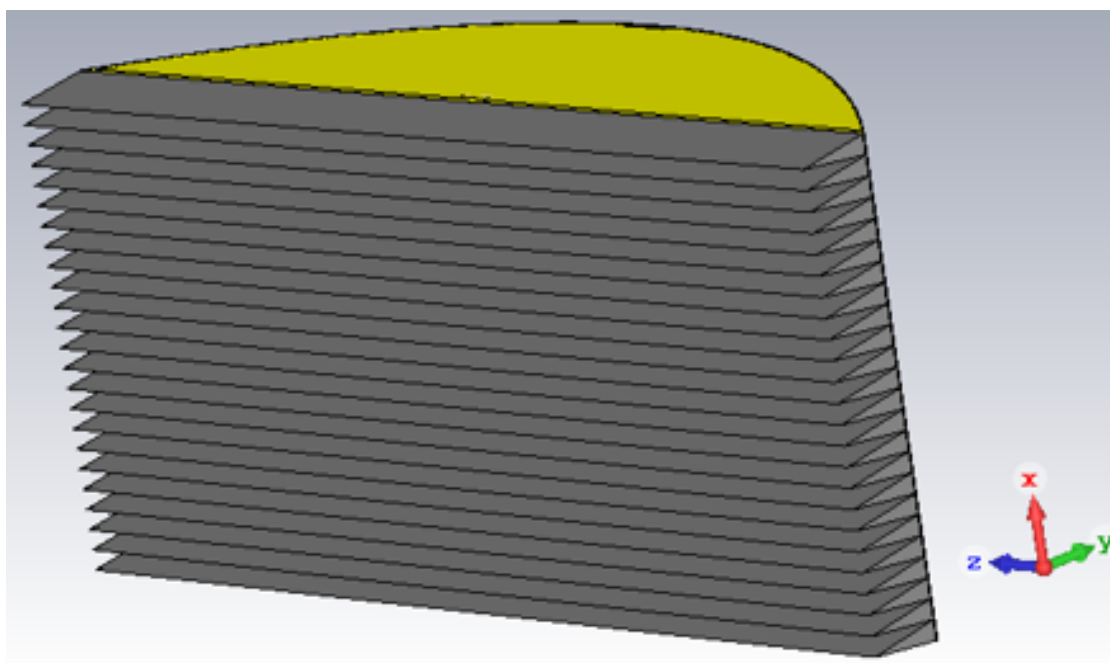


Рис.9 Модель антенной решетки с полистироловыми клиновидными вставками длиной 50 мм, диаграммы направленности в угломестной плоскости 8-го сегменто-параболического элемента с диэлектрическим клином в его раскрытие, находящегося в составе ФАР из 16 излучателей

Исследованы перспективные направления улучшения активного согласования элементов при широкоугольном сканировании в широкой полосе частот при помощи волноводного питания сегменто-параболических элементов антенны (рис. 10): слева расположен волноводный вход антенного элемента и поглотитель; справа – несимметричный волноводный рупор, расширяющийся в E- плоскости.

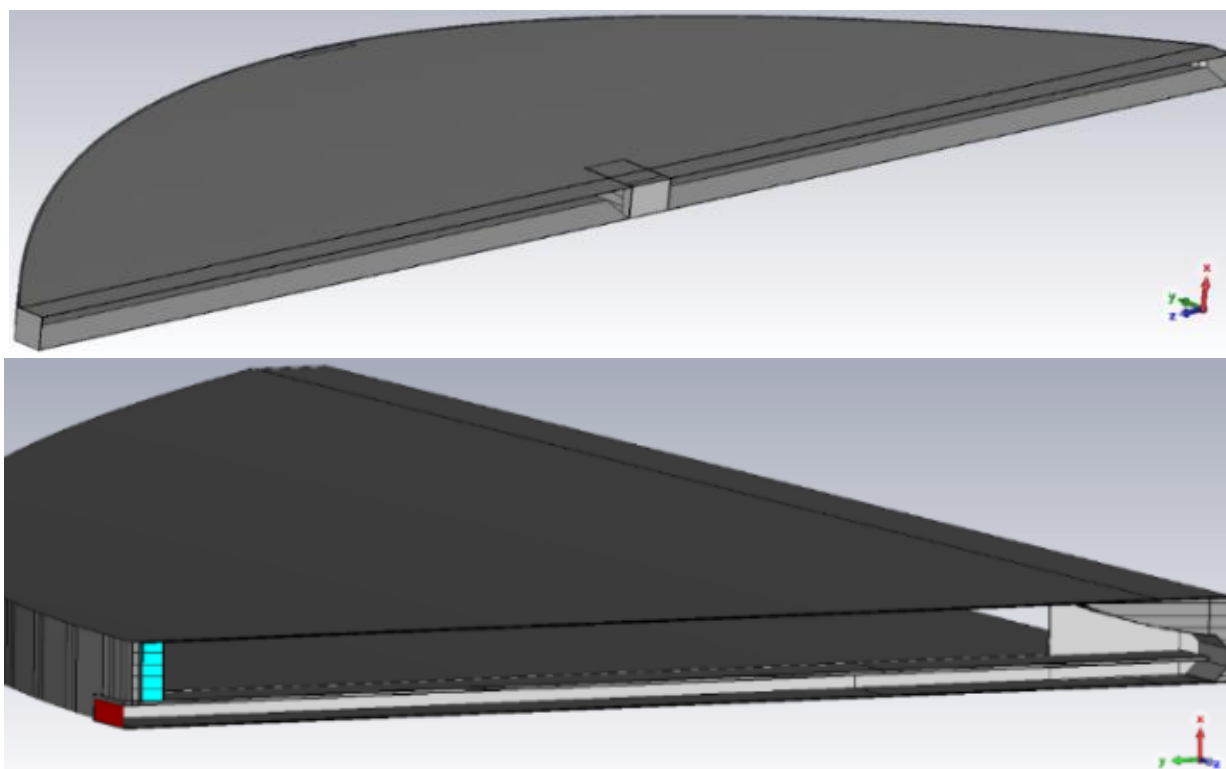


Рис. 10. Общий вид сегменто-параболического элемента с волноводным питанием, разрез в E- плоскости; слева расположен волноводный вход антенного элемента и поглотитель; справа – несимметричный волноводный рупор

Диаграммы направленности ФАР из 24 сегменто-параболических элементов при отклонении луча на угол 45° от нормали приведена на рис. 11.

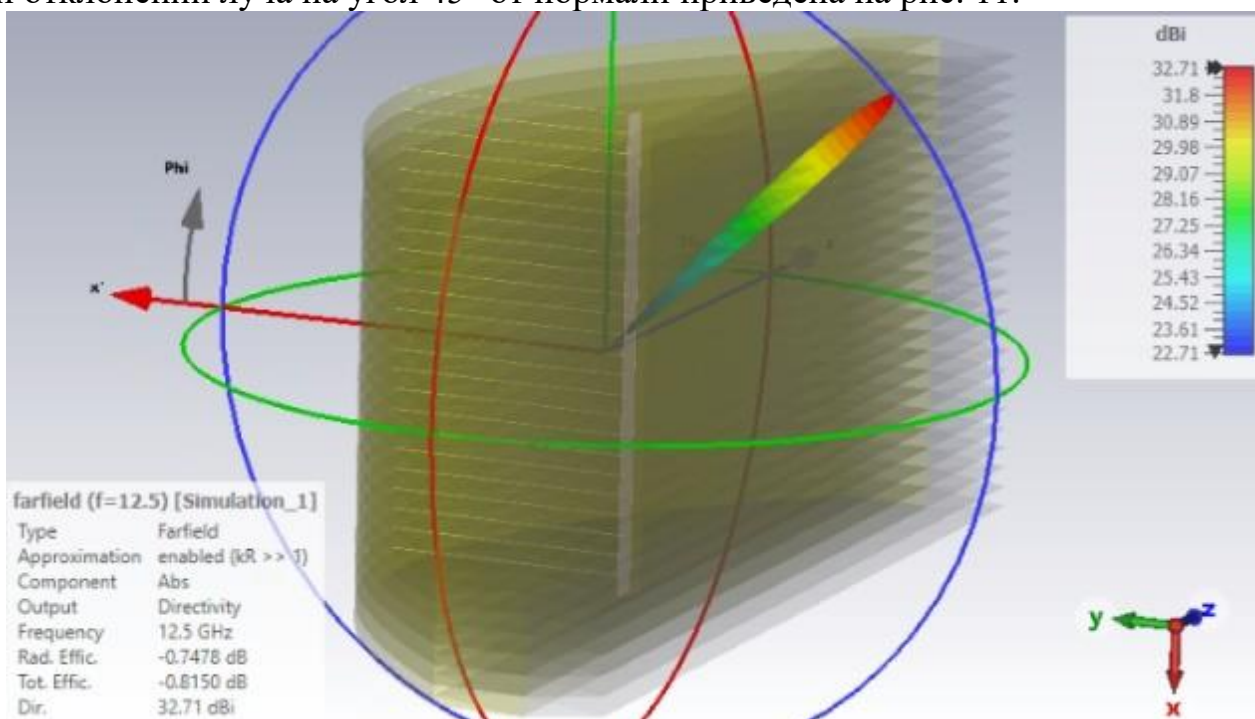


Рис. 11 Диаграмма направленности фазированной антенной решетки в при отклонении луча на угол 45° от нормали

Разработана печатная линза Ротмана, реализованная в виде симметричной полосковой линии, используемая в качестве диаграммообразующей схемы фазированной антенной решетки (рис. 12).

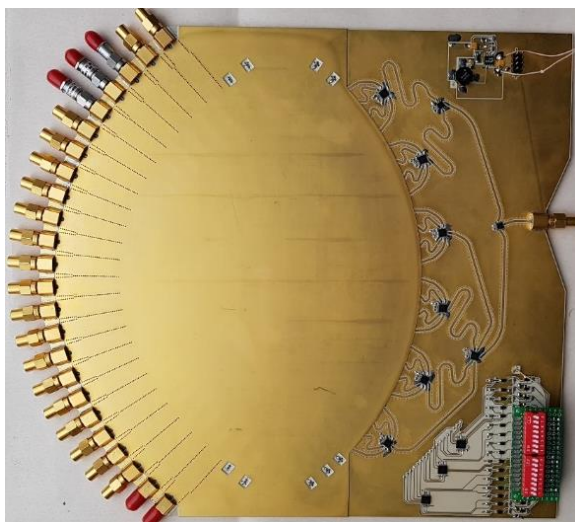


Рис. 12 Макет линзы Ротмана и СВЧ- коммутатора

Изготовлен макет приемной активной ФАР, состоящей из сегменто-параболических элементов, возбуждаемой с помощью печатной линзы Ротмана и многоканального СВЧ- коммутатора, рис. 13. Разработанная ФАР предназначена для сканирования в угло-местной области в пределах $\pm 45^\circ$ относительно плоскости апертуры антенной решетки, сканирование в азимутальной плоскости осуществляется путем вращения антенной системы на платформе.

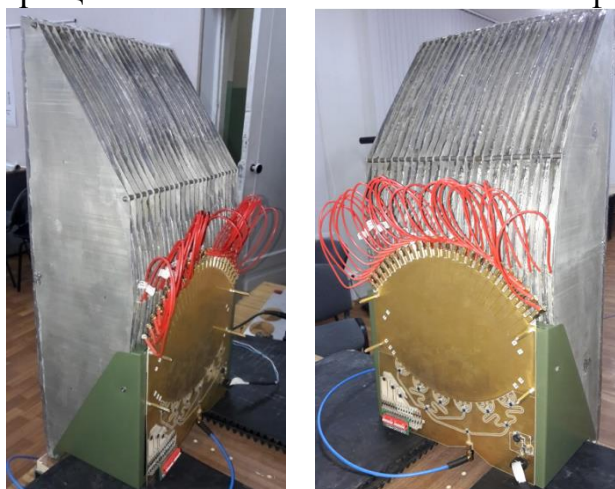
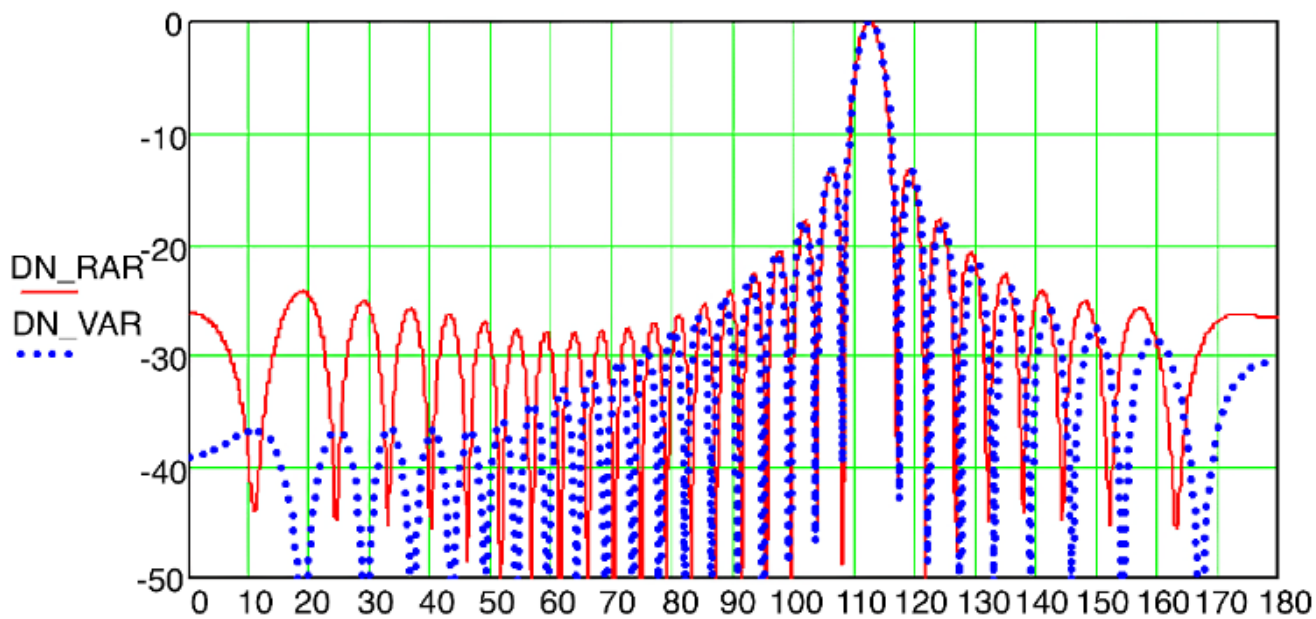
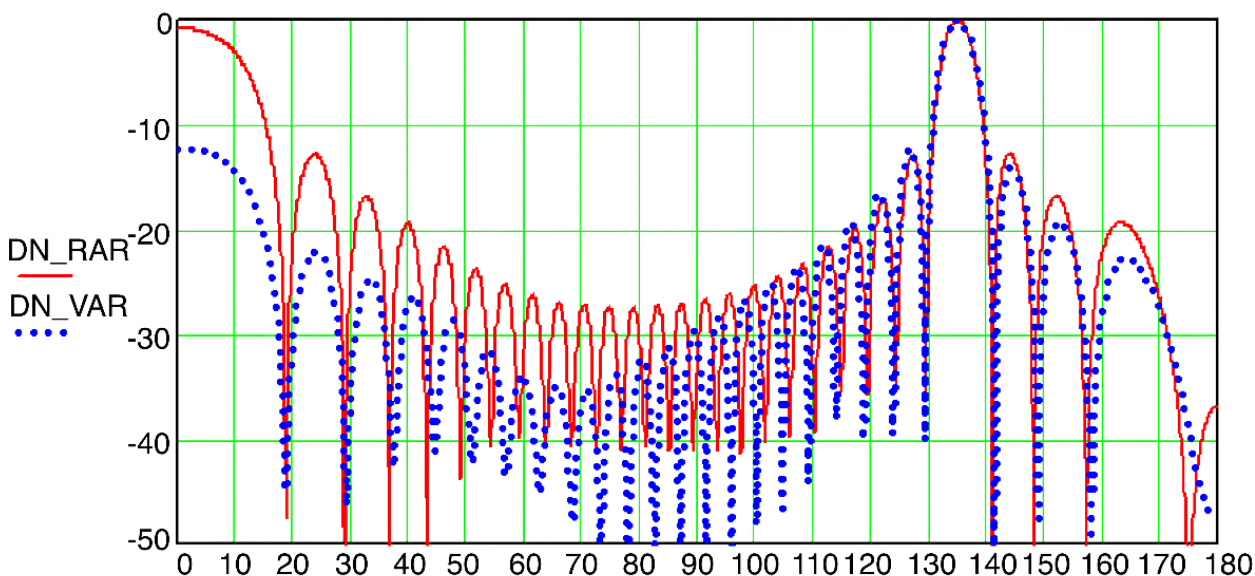


Рис. 13. Фото изготовленного макета приемной активной ФАР Ку- диапазона, состоящей из сегменто-параболических антенных элементов

Показана перспективность использования методов формирования «виртуальных» антенных решеток для снижения боковых лепестков приемной антенной системы, включающей в себя, помимо физических элементов ФАР, «виртуальные» элементы – вычисленные значения компонент электромагнитного поля в ряде дополнительных точек пространства. Использование интерполяционной виртуальной антенной решетки помогает решить проблему возрастания уровня боковых лепестков при отклонении главного лепестка на угол 45° от нормали к апертуре – уровень боковых лепестков интерполяционной антенной решетки при сканировании в секторе $\pm 45^\circ$ не превышает -12 дБ (рис. 14).



А)



Б)

Рис. 14 Диаграммы направленности физической антенной решетки и интерполяционной виртуальной антенной решетки на частоте 14.5 ГГц при отклонении главного лепестка в угло-местной плоскости на угол 22.5° (А) и угол 45° (Б)

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации разработана методика проектирования волноводной линзы Ротмана с ТЕМ- волной, а также - с основной магнитной волной волноводного типа H_{10} . Разработана методика проектирования ФАР, минимизирующая ослепление решетки при широкоугольном сканировании, благодаря размещению короткозамкнутых карманов с емкостным поверхностным импедансом с глубиной более четверти и менее половины длины волны, а также благодаря использованию диэлектрических стержней переменной ширины. Разработана и апробирована методика формирования «виртуальных» антенных решеток для снижения уровня

боковых лепестков приемной антенной системы, включающей в себя, помимо физических элементов ФАР, «виртуальные» элементы – вычисленные значения компонент электромагнитного поля в ряде дополнительных точек пространства

Основными результатами диссертации являются:

1. Проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологии производства мобильных терминалов спутниковой связи.

2. Сформулированы основные технические требования к антенной системе терминала высокоскоростной спутниковой связи мобильного или бортового базирования, предложена концепция его построения и структура, основанные на использовании волноводно-щелевых антенн и проходных фазовращателей, построенных на основе квадратурных мостов, плечи которых нагружены на варикапы.

3. Проработаны варианты конструкции антенных систем для мобильных и бортовых терминалов высокоскоростной спутниковой связи, перспективных для серийного производства терминалов подвижной связи Ku-диапазона, предназначенных для военных и гражданских потребителей.

4. Разработана методика проектирования и проведено исследование многолучевых антенных систем, построенных на основе плоской линзы Ротмана и плоской линзы Люнеберга, предназначенных для мобильных и бортовых систем спутниковой связи и передачи экстренных сообщений.

5. Разработана методика проектирования и проведено исследование многолучевой антенной решетки из сегменто-параболических антенн, запитанных с помощью печатной линзы Ротмана. Показана перспективность использования интерполяционных антенных решеток для существенного снижения уровня боковых лепестков при широкоугольном сканировании в широкой полосе частот. Показана возможность неискаженного излучения сверхширокополосных сигналов с помощью разработанной антенной системы.

Основные результаты исследования опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Д.К. Проскурин, Ю.Г. Пастернак, К.С. Сафонов, Ф.С. Сафонов. Методология дефектоскопии и калибровки оптических фазированных антенных решеток, основанная на аппроксимации пространственной структуры поля с помощью метода вспомогательных источников // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 14. № 1. 2018 4. С. 101-108.

2. Д.К. Проскурин, Ю.Г. Пастернак, К.С. Сафонов, Ф.С. Сафонов. Исследование метода аппроксимации электромагнитного поля в области расположения оптической антенной решетки, основанного на использовании вспомогательных источников поля // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 14. № 1. 2018 4. С. 122-132.

3. С.Р. Войтенко, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, К.С. Сафонов, Ф.С. Сафонов, С. М. Фёдоров. Методика дефектоскопии и калибровки фазированных

антенных решеток оптического диапазона // Телекоммуникации.– Москва: Наука и технологии.– 2019.– № 11. С. 15-21.

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

5. Ашихмин А.В., Иванов А.В., Пастернак Ю.Г., Першин П.В., Сафонов К.С., Федоров С.М., Зеленин И.А. Интегрирование антенной решетки из несимметричных вибраторов с линзой Ротмана на многослойной печатной плате // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 3. С. 54-59.

6. Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Сафонов К.С. Математическая модель излучающей апертуры ФАР, состоящей из сегментно-параболических антенн // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 6. С. 69-78.

7. Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Сафонов К.С., Федоров С.М. Разработка фазированной антенной решетки с запиткой от печатной линзы Ротмана для мобильного терминала спутниковой связи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24 № 2. С. 88-102.

8. Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Сафонов К.С. Антенная решетка с коммутационным сканированием в угло-местной плоскости // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24. № 3. С. 100-106.

9. Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Сафонов К.С., Федоров С.М. Фазированная антенная решетка из сегментно-параболических антенн для мобильного терминала спутниковой связи и метод формирования виртуальных каналов приема сигналов // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 3. С. 65-75.

10. 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

11. Pasternak Y.G., Safonov K.S., Safonov F.S., Fedorov S.M., Volodko A.V., Ischenko E.A. Formation of spatial responses of the optical field in the region of location of the optical antenna array // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. "International Conference Aviation Engineering and Transportation, AviaEnT 2020" 2021. С. 012030.

Статьи и материалы конференций

12. Д. К. Проскурин, Ю. Г. Пастернак, К. С. Сафонов, Ф. С. Сафонов. Исследование метода аппроксимации электромагнитного поля в области расположения оптической антенной решетки, основанного на использовании

вспомогательных источников поля // XXIV Международная НТК «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. Изд-во ВГУ. 2018. Т. 5. С. 64-83.

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

14. Донских М.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Попов И.В., Сафонов К.С. Конструкция терминала подвижной связи Ku-диапазона // XXV Международная научно-техническая конференция «радиолокация, навигация, связь», Воронеж изд-во ВГУ 2019. С. 153-163.

15. Safonov K.S., Donskih M.A., Pasternak Yu.G., Pendiurin V.A., Popov I.V. The design of the mobile communication terminal ku-band // Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности. Материалы IX Международной научно-практической конференции. 2019. С. 503-506.

16. Ашихмин А.В., Иванов А.В., Пастернак Ю.Г., Першин П.В., Сафонов К.С. Исследование возможности реализации линейной вибраторной антенной решетки, питаемой с помощью линзы Ротмана, в виде единой многослойной печатной платы // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах. 2020. С. 189-199.

Подписано в печать ____ . ____ .2024.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

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

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14