

УТВЕРЖДАЮ

проректор по науке, инновациям и
цифровизации ФГБОУ ВО «Воронеж-
ский государственный университет»,
доктор физико-математических наук,
профессор




Д.В. Костин

“ 24 ” января 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Селезнева Валентина Михайловича «Разработка и исследование характеристик сканирующих антенн миллиметрового диапазона длин волн», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

Диссертация посвящена разработке и экспериментальному исследованию характеристик сканирующих антенн диапазона 60 ГГц, представляющих собой комбинацию компактной фазированной антенной решетки (ФАР), обладающей функцией электронного управления лучом, и пассивной системы в виде диэлектрической линзы или плоской отражательной решетки. С помощью пассивных систем достигаются высокие значения коэффициентов усиления (КУ), осуществляется формирование диаграмм направленности (ДН) заданной формы в плоскости угла места и в тоже время сохраняется возможность электронного сканирования пространства лучом в азимутальной плоскости.

Актуальность темы диссертации

Одним из перспективных подходов к построению систем мобильной связи 5-го поколения (5G) является развертывание неоднородных сетей, в которых современные 4G-технологии доступа в Интернет, работающие в диапазонах частот ниже 6 ГГц, интегрированы с новыми широкополосными системами связи миллиметрового диапазона длин волн. Важными элементами

таких неоднородных сетей должны стать компактные дешевые релейные и базовые станции (точки доступа в Интернет) миллиметрового диапазона длин волн, оснащенные антеннами с высокими КУ, чтобы дальность высокоскоростной радиосвязи составляла несколько сотен метров. Другим требованием, предъявляемым разработчиками 5G-сетей к приемо-передающему антенному оборудованию является наличие электронного сканирования лучом. Способность быстро переключать луч позволит системам связи поддерживать устойчивое соединение с мобильными пользователями и между узлами транспортных сетей 5G в изменяющихся условиях приемо-передачи сигналов. Таким образом, разработка недорогих сканирующих антенн миллиметрового диапазона длин волн с высокими КУ является актуальной задачей. Актуальность темы диссертации также подтверждается большим количеством публикаций в научно-технической литературе, посвященных рассматриваемым вопросам.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 103 наименований и приложения. Общий объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста.

Во **введении** отмечена актуальность темы диссертации, рассмотрено современное состояние проблемы разработки и создания новых сканирующих антенн с высоким КУ для беспроводных систем связи миллиметрового диапазона длин волн, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **Главе 1** приведен подробный обзор различных концепций построения и технологий реализации современных сканирующих антенн, предназначенных для работы в системах мобильной радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн.

В **Главе 2** описаны основные этапы разработки сканирующих линзовых антенных систем диапазона 60 ГГц. В частности, приведены результаты расчетов профилей зонированной и бифокальной линз из полиэтилена. Кроме того, представлены результаты электромагнитного моделирования спроектированных линзовых антенн в программе CST Microwave studio.

Глава 3 посвящена разработке сканирующих антенн с плоскими пассивными отражательными решетками, формирующими ДН карандашного, секторного и косекансного типов. Рассмотрены принципы работы таких антенн, представлены результаты электромагнитного моделирования в про-

грамме CST Microwave studio трехслойных пассивных отражательных ячеек с поперечными размерами 2.5×2.5 мм ($0.5\lambda \times 0.5\lambda$), на основе которых были спроектированы все отражательные решетки, представленные в диссертации.

Рассмотрены основные идеи усовершенствованного итерационного метода синтеза отражательных решеток, в котором эталонная амплитудная ДН принадлежит к классу целых функций экспоненциального типа, а фазовая ДН определяется оригинальными эталонными функциями, с помощью которых можно получить более точное приближение к требуемой форме главного луча антенны. Эффективность усовершенствованного итерационного метода демонстрируется на примерах решения одномерных задач фазового синтеза 33-элементных линейных эквидистантных решеток, формирующих ДН секторного, карандашного и косекансного типа в вертикальной плоскости.

Результаты фазового синтеза линейных решеток используются автором при разработке моделей сканирующих антенн диапазона 60 ГГц, каждая из которых содержит компактную облучающую ФАР и плоскую отражательную решетку в виде прямоугольной матрицы с одинаковыми столбцами, составленными из трехслойных печатных структур. В конце главы приведены результаты электромагнитного моделирования в CST Microwave studio трех сканирующих антенн диапазона 60 ГГц с спроектированными плоскими отражательными решетками, формирующими в плоскости угла места ДН секторного, карандашного и косекансного типов соответственно.

В **Главе 4** представлены два прототипа сканирующих линзовых антенн с вертикальными линейными апертурами 130 и 190 мм. Линза в первом прототипе имеет бифокальный профиль, а во втором – зонированный (составленный из отрезков гипербол). Кроме того, представлены два прототипа сканирующих антенн с плоскими отражательными решетками, одна из которых является аналогом классического цилиндрического прямофокусного рефлектора, а другая – офсетного с углом смещения облучателя 15° . В главе также приведены результаты измерений характеристик всех изготовленных прототипов сканирующих антенн диапазона 60 ГГц.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна результатов диссертационного исследования

По итогам изучения диссертации и доступных публикаций автора могут быть отмечены следующие наиболее значимые результаты исследований, имеющие на научную новизну:

- усовершенствованная методика расчета профилей диэлектрических бифокальных линз, с помощью которой могут быть реализованы бифокальные линзовые антенны миллиметрового диапазона длин волн, имеющие высокие КУ, низкие уровни боковых лепестков и способные осуществлять двумерное электронное сканирование.

- результаты теоретических и экспериментальных исследований возможности оптимизации формы диэлектрических линз путем их зонирования для уменьшения массы сканирующих антенн диапазона 60 ГГц без существенного уменьшения их КУ и секторов сканирования.

- методика синтеза плоских отражательных решеток с помощью усовершенствованного итерационного алгоритма, в котором используются оригинальные функции эталонных фазовых диаграмм, позволяющие получить более точное приближение к требуемой форме главного луча антенны.

- методика проектирования плоских отражательных решеток из пассивных микрополосковых элементов, основанная на сочетании усовершенствованного итерационного алгоритма синтеза с электромагнитным 3D-моделированием.

Обоснованность и достоверность результатов исследований

Все представленные в настоящей диссертации результаты согласуются с известными теоретическими результатами и не противоречат приведенным в научной литературе данным. Достоверность приведенных положений и выводов подтверждается результатами электромагнитного моделирования разработанных антенн в программе CST Microwave studio, а также результатами экспериментальных исследований характеристик изготовленных прототипов сканирующих антенн, которые были получены с помощью поверенной измерительной аппаратуры.

Значимость результатов диссертационного исследования для науки и техники

Усовершенствованная методика расчета профилей диэлектрических бифокальных линз, результаты исследований возможности оптимизации формы диэлектрических линз, а также методика проектирования плоских отражательных решеток, основанная на сочетании усовершенствованного итерационного метода синтеза с электромагнитным 3D-моделированием вносят вклад в развитие методологических основ проектирования сканирующих антенн миллиметрового диапазона длин волн. Представленные в диссертации

результаты могут быть использованы при создании антенн с улучшенными характеристиками для новых высокоэффективных технологий беспроводной передачи данных от базовых станций пользователям и между узлами транспортных сетей 5G со скоростями до нескольких десятков гигабит в секунду.

Таким образом, диссертационная работа содержит **значимые научные результаты по заявленной специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»** и, в частности, п.п. 2 (Исследование характеристик антенн и микроволновых устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т.д.) и 3 (Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных микроволновых устройств, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами).

Практическая значимость результатов диссертационного исследования

Созданные в ходе выполнения работы прототипы сканирующих антенн отвечают требованиям, предъявляемым стандартами IEEE 802.11ad и IEEE 802.11ay к приемо-передающему антенному оборудованию базовых и релейных станций диапазона 60 ГГц. Использование представленных в настоящей диссертации сканирующих антенн в базовых и радиорелейных станциях диапазона 60 ГГц, позволит повысить качество и надежность высокоскоростной передачи данных на расстояния 25 – 50 м и 100 – 300 м соответственно.

Результаты диссертационной работы, использовались в ННГУ им. Н.И. Лобачевского при выполнении на кафедре статистической радиофизики и мобильных систем связи госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских работ. Акты о внедрении результатов в ННГУ им. Н.И. Лобачевского приведены в приложении к диссертации.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Основные положения и выводы диссертации могут представлять интерес для широкого круга специалистов, занимающихся разработкой новых приложений мобильных сетей 5G миллиметрового диапазона длин волн.

Результаты диссертационного исследования по разработке методики проектирования плоских отражательных решеток из пассивных микрополосковых элементов рекомендуются к внедрению на предприятиях, специализирующихся на разработке и производстве телекоммуникационного оборудования, в частности, на предприятиях холдинга «Росэлектроника» Госкорпо-

рации Ростех, НПП «Прима» (г. Нижний Новгород), АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж) и в таких ИТ-компаниях, как YADRO.

Возможно использование результатов диссертационной работы в ряде других направлений, в числе которых сервисы дополненной и виртуальной реальности, а также различные технологии интернета вещей.

Замечания по диссертационной работе

1. В Главе 3 представлен усовершенствованный итерационный метод синтеза отражательных решеток, эффективность которого подтверждают примеры решения задач фазового синтеза линейных решеток, а также результаты электромагнитного моделирования в CST Microwave studio трех антенн с плоскими отражательными решетками, формирующими в плоскости угла места ДН секторного, карандашного и косекансного типа. Однако для более убедительной демонстрации преимуществ предложенного метода следует получить результаты экспериментальных исследований прототипов заявленных антенн и провести сравнение их характеристик с аналогами.

2. На стр. 93 приведен пример возможной архитектуры микроячейки гетерогенной сети 5G, содержащей разработанную антенну с плоской отражательной решеткой, формирующей косекансную ДН. При этом для других спроектированных антенн отсутствуют аналогичные примеры, которые могут представлять интерес, в частности для разработчиков новых мультимедийных сервисов и приложений мобильных сетей 5G.

3. Согласно приведенным на стр. 69 результатам электромагнитного моделирования в CST Microwave studio, спроектированная зонированная линзовая антенна имеет рабочий диапазон частот 58 – 62 ГГц. При этом в Главе 4 представлены результаты измерений характеристик прототипа данной антенны только во втором частотном канале стандарта IEEE 802.11ad (59.40 – 61.56 ГГц) и ничего не сказано о результатах измерений характеристик в других каналах. В связи с этим автору следует уточнить рабочий диапазон частот зонированной линзовой антенны.

Приведенные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, научной и практической значимости полученных результатов и могут рассматриваться, как рекомендации для дальнейших исследований.

Заключение

Диссертация Селезнева Валентина Михайловича «Разработка и исследование характеристик сканирующих антенн миллиметрового диапазона длин волн» представляет собой законченную научно-квалификационную работу по актуальной проблеме. Новые научные результаты, полученные автором, имеют существенное значение для разработки сканирующих антенн миллиметрового диапазона длин волн, предназначенных для беспроводных систем связи 5G.

По результатам рассмотрения диссертации не обнаружены какие-либо факты использования заимствованных материалов без ссылки на источники.

Диссертация соответствует специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

По теме диссертации автором опубликовано 15 работ, в числе которых 4 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК, 1 статья в рецензируемом научном журнале, индексируемом в международных базах данных Web of Science и Scopus, 6 работ, представляющих собой опубликованные материалы докладов на конференциях, 1 патент на изобретение и 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям пунктов 9 – 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (ред. от 11.09.2021). Автор диссертации Селезнев Валентин Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Отзыв обсуждён и одобрен на заседании кафедры радиофизики Воронежского государственного университета 16.01.2024, протокол №1, на заседании присутствовало 12 сотрудников кафедры, из них 3 доктора наук. Результаты голосования «за» – 12, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Отзыв составил:

Заведующий кафедрой радиофизики

Федерального государственного бюджетного учреждения

высшего образования «Воронежский государственный университет»
доктор физико-математических наук, (специальность 01.04.03 - Радиофизика)

Корчагин Юрий Эдуардович

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, <https://www.vsu.ru/>, +7 (473) 220-75-21, office@main.vsu.ru

