

На правах рукописи



Селезнев Валентин Михайлович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
СКАНИРУЮЩИХ АНТЕНН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН  
ВОЛН**

Специальность 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

Научный руководитель:

**Мальцев Александр Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой статистической радиофизики и мобильных систем связи ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Официальные оппоненты:

**Останков Александр Витальевич**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

**Веденькин Денис Андреевич**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

Защита состоится «15» февраля 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.345.01 на базе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева и на сайте университета по адресу:

<http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.345.01



Белов Юрий Георгиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время вопрос повышения пропускной способности беспроводных систем связи становится все более актуальным вследствие появления новых мультимедийных услуг. Новые мобильные сети 5-ого поколения (5G) должны обеспечивать скорость передачи данных до нескольких десятков гигабит в секунду. Такие скорости могут быть достигнуты путем перехода систем связи в миллиметровый диапазон частот, использования существенно более широкополосных сигналов (с полосой до 8 ГГц) и особой гетерогенной архитектуры.

Комитетом по стандартизации IEEE уже приняты стандарты IEEE 802.11ad и IEEE 802.11ay, предназначенные для систем Wi-Fi и работающие в частотных диапазонах 57 – 64 ГГц и 57 – 71 ГГц соответственно. Новая концепция построения мобильных сотовых сетей LTE-Rel15 и 5G NR подразумевает развертывание в зонах покрытия существующих макросот в местах большого скопления пользователей (hot-spots) дополнительных малых сот миллиметрового диапазона длин волн с радиусом действия до 50 – 100 метров. Однако развертывание таких гетерогенных сетей в сложных для распространения радиосигналов миллиметрового диапазона городских условиях предъявляет особые требования к антенным системам. Используемые на малых базовых станциях и точках доступа антенны должны иметь диаграммы направленности (ДН) специальной формы, высокий коэффициент усиления (КУ) и возможность сканирования для отслеживания мобильных пользователей. При этом конкретную форму ДН и максимальный угловой сектор сканирования необходимо определять индивидуально для каждого случая развертывания сети.

Хорошо известно, что многоэлементные фазированные антенные решетки (ФАР) миллиметрового диапазона имеют сложную структуру, низкий коэффициент полезного действия (в силу ряда технологических проблем, возникающих в этом диапазоне) и высокую стоимость изготовления. В связи с этим в приложениях новых стандартов 5G предлагается использовать альтернативные варианты сканирующих антенн. Например, широкое распространение получили антенны с линзами из однородного диэлектрика [1]. Однако подобные антенны с высоким КУ имеют, как правило, большую массу.

Другим перспективным направлением исследований является разработка антенн с плоскими отражательными решетками, в которых сочетаются достоинства классических зеркальных антенн и многоэлементных ФАР. Существуют различные варианты сканирующих антенн с плоскими отражательными решетками. Например, в работе [2] представлены антенные системы с механическим сканированием. Главным недостатком таких антенных систем является низкая скорость переключения луча.

Интенсивные исследования также проводятся в области создания электронно-реконфигурируемых линзовых антенн и отражательных решеток на основе метаматериалов, содержащих перестраиваемые элементы, такие как варикапы [3-4], pin-диоды [5] и жидкие кристаллы [6]. К числу недостатков этих антенн следует отнести наличие больших потерь энергии внутри перестраиваемых линз или отражателей, узкую рабочую полосу частот, а также высокую стоимость изготовления. Таким образом, разработка дешевых сканирующих антенн миллиметрового диапазона с высоким КУ и рабочей полосой частот несколько гигагерц является актуальной задачей.

В настоящей диссертации рассматривается задача проектирования сканирующих антенн диапазона 60 ГГц, представляющих собой комбинацию компактной ФАР, обладающей функцией электронного управления лучом, и пассивной системы в виде линзы или отражателя. Основное назначение пассивных систем – формировать ДН заданной формы в плоскости угла места и в тоже время поддерживать возможность ФАР электронно сканировать пространство лучом в азимутальной плоскости.

Впервые общая концепция построения подобных антенн была предложена в патентах [7-8]. В последующих работах на кафедре статистической радиофизики и мобильных систем

связи (СР МСС) радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского была осуществлена реализация сканирующих антенн диапазона 60 ГГц, содержащих тороидально-эллиптические линзы из полиэтилена, интегрированные с 16-элементной ФАР производства компании Intel. В частности, в ходе выполнения международного проекта MiWEBA (Millimeter Wave Enhanced Backhaul and Access) проводились экспериментальные исследования характеристик тороидально-эллиптических линзовых антенн с вертикальными линейными апертурами 70, 90 и 112 мм [9]. Однако, как показали результаты экспериментальных исследований, изготовленные антенны наряду с целым рядом достоинств (высоким КУ, широкой рабочей полосой частот, простой конструкцией) обладают недостатками, среди которых следует отметить большой вес линз и отсутствие возможности электронного управления лучом в плоскости угла места.

В настоящей работе, используя сформированный на кафедре СР МСС научный задел в этой области, развивается общая концепция построения простых по конструкции сканирующих антенных систем миллиметрового диапазона длин волн, а также предлагается ряд новых конструктивных решений, позволяющих частично преодолеть отмеченные выше недостатки. Данное направление исследований является актуальным и перспективным, поскольку предлагаемые решения сочетают в себе достоинства целого ряда существующих вариантов антенных систем. В частности, они имеют простую конструкцию, низкую стоимость изготовления, способны осуществлять электронное сканирование лучом в широком секторе углов.

### Цель работы

Целью настоящей диссертации являлась разработка и экспериментальное исследование характеристик прототипов сканирующих линзовых и отражательных антенн миллиметрового диапазона длин волн (57.24 – 65.88 ГГц) с облучателем в виде ФАР. В соответствии с поставленной целью, в ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

1. Анализ существующих концепций построения и реализации сканирующих антенн, предназначенных для работы в системах радиосвязи миллиметрового диапазона.
2. Разработка линзовой антенной системы диапазона 57.24 – 65.88 ГГц с высоким КУ (не менее 20 дБи) и обладающей функцией широкоугольного сканирования лучом в азимутальной плоскости (в секторе не менее 90°) с одновременной подстройкой направления излучения в плоскости угла места (в секторе не менее 6°).
3. Разработка линзовой антенной системы диапазона 58 – 62 ГГц с высоким КУ (не менее 20 дБи) в широком секторе сканирования в азимутальной плоскости (не менее 90°) и имеющей при этом небольшую массу (менее 1 кг).
4. Разработка методики проектирования плоских отражательных решеток из пассивных микрополосковых элементов, формирующих заданные диаграммы направленности в плоскости угла места и обеспечивающих электронное сканирование лучом в азимутальной плоскости.
5. Реализация сканирующих антенн диапазона 57.24 – 63.72 ГГц с высоким КУ (не менее 20 дБи), содержащих плоские отражательные решетки из пассивных микрополосковых элементов.
6. Проведение экспериментальных исследований характеристик изготовленных прототипов сканирующих линзовых и отражательных антенн диапазона 57.24 – 65.88 ГГц с облучателем в виде ФАР.

## Методы исследования

При расчете профилей и основных характеристик линзовых антенн использовались методы геометрической и волновой оптики. Плоские отражательные решетки были синтезированы итерационным методом, который подразумевает многократное вычисление прямого и обратного преобразования Фурье. Для оценки технических параметров спроектированных антенн проводилось электромагнитное 3D-моделирование в программе CST Microwave studio. Измерения характеристик изготовленных прототипов сканирующих антенн проводились в дальней зоне с помощью специально разработанной экспериментальной установки.

## Научная новизна

1. Усовершенствована методика расчета профилей диэлектрических бифокальных линз, с помощью которой была разработана и реализована тороидально-бифокальная линзовая антенна диапазона 57.24 – 65.88 ГГц с высоким КУ, способная осуществлять широкоугольное электронное сканирование в азимутальной плоскости с подстройкой направления излучения в плоскости угла места.
2. Теоретически и экспериментально исследована возможность оптимизации формы диэлектрических линз для уменьшения массы сканирующих антенн диапазона 60 ГГц без существенного уменьшения их КУ и секторов сканирования.
3. Усовершенствована методика синтеза плоских отражательных решеток с помощью итерационного алгоритма, в котором используются оригинальные функции эталонных фазовых диаграмм, позволяющие получить более точное приближение к требуемой форме главного луча антенны.
4. Разработана методика проектирования плоских отражательных решеток из пассивных микрополосковых элементов, основанная на сочетании усовершенствованного итерационного метода синтеза с электромагнитным 3D-моделированием.

## Практическая значимость результатов

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. В связи с этим полученные результаты могут использоваться при проектировании интегрированных линзовых антенн, а также антенн с плоскими отражательными решетками. Потенциальная область применения предлагаемых в настоящей диссертации сканирующих антенных систем включает в себя базовые и радиорелейные станции диапазона 60 ГГц, обеспечивающие высокоскоростную передачу данных на расстояния 25 – 50 м и 100 – 300 м соответственно.

## Реализация и внедрение результатов

Результаты диссертационной работы, а именно: рассчитанные профили бифокальной и зонированной линз для сканирующих антенн диапазона 57 – 64 ГГц, методика синтеза плоских отражательных решеток, позволяющая получить более точное приближение к требуемой форме главного луча антенны, результаты электромагнитного моделирования и измерений характеристик сканирующих антенн с плоскими отражательными решетками диапазона 57 – 64 ГГц, использовались в ННГУ им. Н.И. Лобачевского при выполнении на кафедре статистической радиофизики и мобильных систем связи госбюджетных и хоздоговорных

научно-исследовательских работ. Кроме того, результаты диссертационного исследования вошли в отчет о выполнении соискателем НИОКР по теме «Разработка сканирующей линзовой антенной системы диапазона 57-64 ГГц для беспроводной автомобильной связи», проводившейся в рамках программы УМНИК.

Акты о внедрении результатов в ННГУ им. Н.И. Лобачевского приведены в приложении к диссертации.

### Обоснованность и достоверность

Представленные в настоящей диссертации положения и выводы не противоречат приведенным в научной литературе данным и подтверждаются результатами компьютерного электромагнитного 3D-моделирования разработанных антенн в программе CST Microwave studio, а также результатами экспериментальных исследований характеристик созданных прототипов сканирующих антенн, которые были получены с помощью поверенных средств измерений.

### Положения, выносимые на защиту

1. Методика расчета профилей диэлектрических бифокальных линз позволяет проектировать линзовые антенны с многоэлементными ФАР в качестве облучателей, имеющие высокие КУ, способные осуществлять электронное сканирование в азимутальной плоскости с подстройкой направления излучения в плоскости угла места.
2. Результаты расчетов (оптимизации) и практической реализации малогабаритной (тонкой) зонированной линзовой антенны диапазона 58 – 62 ГГц, обладающей высоким КУ, широким сектором сканирования в азимутальной плоскости.
3. Итерационный метод синтеза линейных отражательных решеток, в котором используются предложенные эталонные функции фазовых диаграмм, позволяет уменьшить относительную интегральную погрешность аппроксимации требуемых ДН на 2.5 – 3% по сравнению с известными методами и без больших вычислительных затрат найти близкие к оптимальным амплитудно-фазовые распределения токов на пассивных печатных элементах отражательных решеток, формирующих ДН заданного вида.
4. Методика проектирования плоских отражательных решеток из пассивных отражательных элементов, основанная на сочетании усовершенствованного итерационного метода синтеза с электромагнитным 3D-моделированием, эффективность которой подтверждена экспериментальными исследованиями изготовленных прототипов сканирующих антенн.

### Публикации и апробация результатов работы

Основные результаты работы отражены в 15 научных публикациях, в числе которых 5 статей в рецензируемых журналах (Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника [1], Радиотехника [2-3], Антенны [4], IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters [5]), 6 работ, представляющих собой опубликованные материалы докладов на конференциях [6-11], 1 патент на изобретение [12] и 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ [13-15].

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

1. Двадцать первой научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород. 2017 (2 доклада).

2. Третьей научно-технической конференции «Радиолокация. Теория и практика». АО ФНПЦ «ННИИРТ». Нижний Новгород, 2017.
3. Двадцать третьей научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород, 2019.
4. 2019 Conference on Microwave Techniques. Пардубице. Чешская Республика, 2019.
5. 2020 International Conference on Machine Learning and Intelligent Systems. Южная Корея, 2020.

#### Личный вклад автора

Соискатель принимал непосредственное участие в постановке и решении всех задач, сформулированных в диссертации, а также в обсуждении и физической интерпретации полученных результатов электромагнитного моделирования и экспериментальных исследований характеристик разработанных сканирующих антенн. Соискателем без соавторов оформлено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, а также опубликовано две статьи в журналах, включенных в перечень изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

#### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 103 наименований и приложения. Общий объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста, включающих 97 рисунков и 6 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, 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, практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приведены основные требования, предъявляемые стандартами IEEE 802.11ad и IEEE 802.11ay к антеннам базовых и релейных станций, работающих в окрестности частоты 60 ГГц. В частности, в **Разделе 1.1** показано, что разрабатываемые антенны для передачи данных на расстояние от 100 до 300 метров должны иметь узкий главный луч шириной менее  $20^\circ$  и максимальный КУ более 20 дБ. Кроме того, большинство развертываемых транспортных сетей требует наличия у антенн функции электронного сканирования в азимутальной плоскости в угловом секторе от  $30^\circ (\pm 15^\circ)$  до  $90^\circ (\pm 45^\circ)$ . В **Разделе 1.2** рассмотрены различные концепции построения сканирующих антенн миллиметрового диапазона длин волн. Проведенный анализ показал, что широкое распространение в будущих гетерогенных сетях 5G могут получить ФАР, линзовые антенны, а также антенны с плоскими отражательными решетками. В **Разделе 1.3** рассмотрены различные подходы, которые могут быть использованы для расчета характеристик излучения линзовых и отражательных антенн с большой апертурой. В данной работе использовался универсальный метод конечных разностей во временной области. Идеи этого метода лежат в основе программного пакета CST Microwave studio, в котором проводилось электромагнитное моделирование всех антенн, спроектированных в ходе выполнения настоящей работы.

**Глава 2** посвящена разработке сканирующих линзовых антенных систем. В **Разделе 2.1** рассмотрен расчет профилей линз в приближении геометрической оптики. Используя данное приближение, были проведены расчеты профилей эллиптических, зонированных и бифокальных линз.

На практике в качестве облучателя использовалась компактная ФАР, обладавшая функцией электронного сканирования лучом в азимутальной плоскости. Для реализации сканирующих способностей ФАР тороидальные формы линз определялась путем вращения на  $180^\circ$  соответствующих профилей вокруг вертикальных осей, проходящих через фокусы, вблизи которых располагалась ФАР.

Учитывая, что для некоторых приложений систем связи 5G требуются антенны с малым весом, в данной работе было решено сделать тороидальную линзу с зонированной гиперболической поверхностью, профиль которой может быть описан следующим выражением при  $n_2/n_1 > 1$ :

$$\left(x + \frac{m\lambda}{n_2/n_1 - 1}\right)^2 \left(n_2^2/n_1^2 - 1\right) + 2\left(L_f - \frac{m\lambda}{n_2/n_1 - 1}\right)\left(x + \frac{m\lambda}{n_2/n_1 - 1}\right)(n_2/n_1 - 1) - y^2 = 0, \quad (1)$$

где  $m = 0, 1, 2 \dots$  – номер зоны,  $L_f$  – расстояние между точкой расположения облучателя и гиперболой, соответствующей  $m = 0$ ,  $\lambda$  – рабочая длина волны. Спроектированная линза имеет вертикальную линейную апертуру 190 мм, толщину 20 мм и фокусное расстояние 90 мм. При таких размерах на апертуре линзы уложилось восемь зон ( $m = 0, 1, 2, \dots, 7$ ).

Особый практический интерес представляют бифокальные линзы с двумя преломляющими поверхностями (см. Рис. 1).

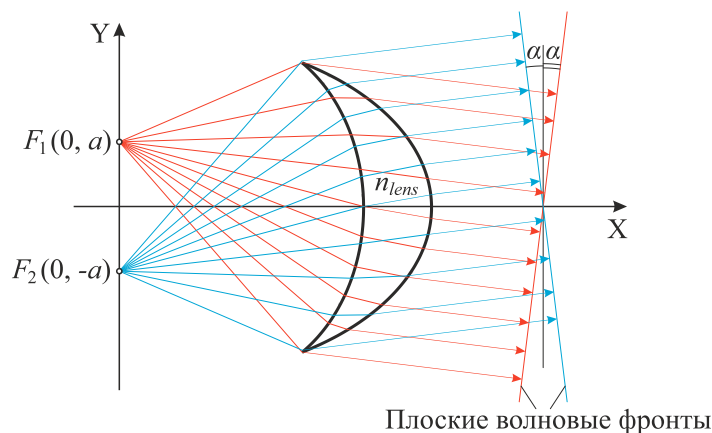


Рис. 1. Траектории лучей в бифокальной линзе.

В данной работе расчет профиля бифокальной линзы проводился с помощью метода Джента – Штернберга. Данный метод реализован в программе «Расчет профиля диэлектрической бифокальной линзы», с помощью которой при заданных параметрах  $a = 5$  мм,  $\alpha = 3^\circ$  и  $n_{lens} = 1.53$  (см. Рис. 1) был получен профиль бифокальной линзы, изображенный на Рис. 2.

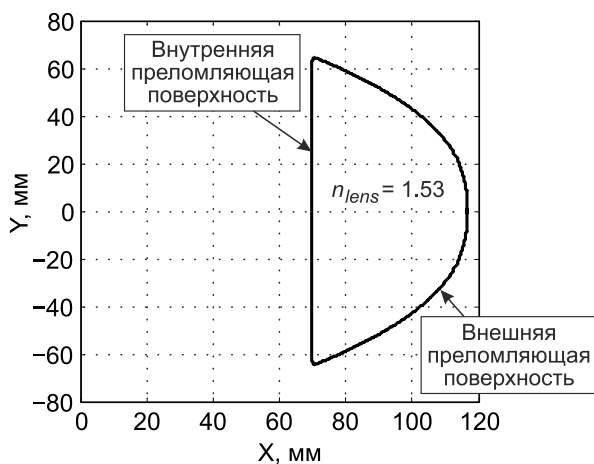


Рис. 2. Профиль бифокальной линзы, рассчитанный при  $a = 5$  мм,  $\alpha = 3^\circ$  и  $n_{lens} = 1.53$ .



Внутренняя и внешняя поверхности представленной линзы, описываются функциями:

$$Y_{внутр}(X) = \pm(14124X - 984180)^{0.5},$$

$$Y_{внешн}(X) = \pm(-730X + 85142)^{0.4}.$$
(2)

Однако в линзах с двумя преломляющими поверхностями возникают дополнительные отражения, снижающие общую эффективность антенной системы. Как видно из Рис. 2, профиль внутренней поверхности линзы можно аппроксимировать отрезком прямой. В связи с этим было решено заполнить полиэтиленом пространство между облучателями и линзой, чтобы активные элементы антенной решетки располагались на поверхности диэлектрика. Таким образом, у бифокальной линзы фактически осталась одна преломляющая поверхность (внешняя). При этом для сохранения синфазности поля в раскрыве антенны было увеличено расстояние между облучателями и внешней поверхностью линзы на 35 мм.

В **Разделе 2.2** представлены результаты электромагнитного моделирования спроектированных линзовых антенн в программе CST Microwave studio. Следует отметить, что электромагнитное 3D-моделирование линзовых антенных систем с ФАР в явном виде требовало больших вычислительных затрат. Поэтому на данном этапе исследований было решено использовать вместо ФАР эквивалентную рупорную антенну. Эффективность замены ФАР на рупорную антенну при моделировании в дальнейшем подтвердили результаты измерений характеристик прототипов сканирующих антенн.

**Глава 3** посвящена разработке сканирующих антенн с плоскими отражательными решетками, формирующими ДН карандашного, секторного и косекансного типа. В **Разделе 3.1** рассмотрены принципы работы антенн с плоскими отражательными решетками, состоящими из множества пассивных микрополосковых элементов, напечатанных на диэлектрической подложке.

В данной работе исследование отражательных свойств плоских печатных структур с двумя, тремя и четырьмя медными слоями толщиной 0.018 мм было проведено в программе CST Microwave studio для ячеек с поперечными размерами  $2.5 \times 2.5$  мм ( $0.5\lambda \times 0.5\lambda$ ) и квадратными патчами. Согласно результатам электромагнитного 3D-моделирования, представленным в **Разделе 3.2**, оптимальные характеристики получились у трехслойной ячейки, в которой отношение сторон верхнего патча к нижнему равно 0.7 (см. Рис. 3).

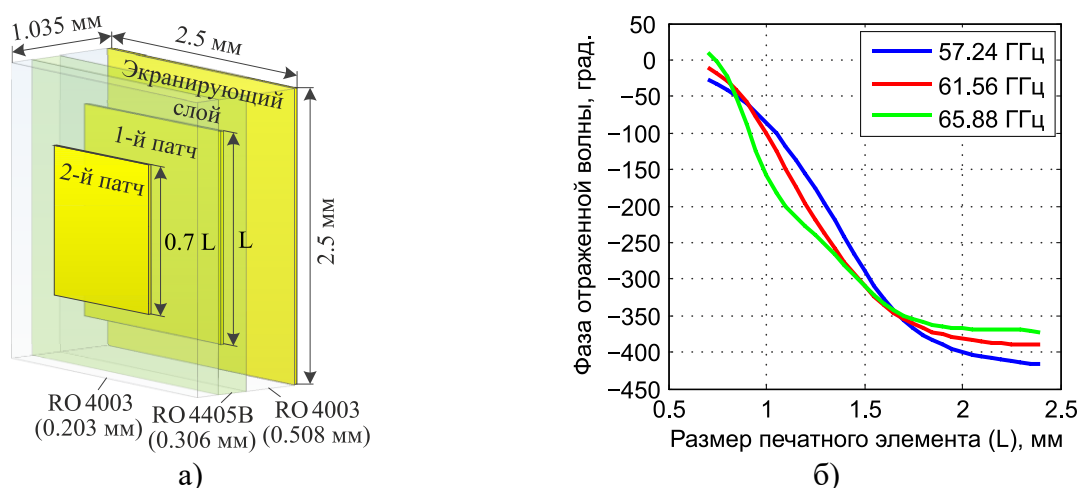


Рис. 3. Трехслойная отражательная ячейка: а) – геометрическая структура; б) – фазо-размерные зависимости, рассчитанные на различных частотах.

Как видно из Рис. 3б, фазо-размерная зависимость слабо меняется в полосе частот 57.24 – 65.88 ГГц. Для патчей размером от 0.7 до 2.4 мм максимальное отклонение значения фазы от центральной кривой, рассчитанной на частоте 61.56 ГГц, не превышает  $60^\circ$ . Таким образом,

трехслойная печатная структура, изображенная на Рис. 3а. легла в основу всех спроектированных отражательных решеток.

В Разделе 3.3 приведен краткий обзор методов синтеза отражательных решеток. В данной работе отражательные решетки были синтезированы с помощью итерационного метода, подразумевающего многократное вычисление прямого и обратного преобразования Фурье. При этом в качестве эталонных амплитудных диаграмм (модули комплексной ДН) использовались целые функции экспоненциального типа. В настоящей диссертации также предложены оригинальные эталонные функции фазовых диаграмм, с помощью которых можно получить более точное приближение к заданным ДН.

В Разделе 3.4 рассмотрены основные идеи итерационного метода, а также приведены примеры решения одномерных задач фазового синтеза 33-элементных линейных эквидистантных решеток, формирующих ДН секторного, карандашного и косекансного типа.

В качестве эталонной амплитудной диаграммы секторного типа в итерационном алгоритме использовалась функция  $D_{RS}(\zeta)$ :

$$D_{ref}(\zeta) = D_{RS}(\zeta) = \frac{\sin \pi \zeta}{\pi \zeta} \frac{36 + 7\zeta^2 + 5.5\zeta^4 - 0.5\zeta^6}{(1 - \zeta^2)(4 - \zeta^2)(9 - \zeta^2)}, \quad (3)$$

где  $\zeta = 10\sin\theta$  – обобщенная координата ( $\theta$  – угол места). Эталонная функция фазовой диаграммы  $\gamma_{ref}(\theta)$  была задана в виде параболы:

$$\gamma_{ref}(\theta) = \gamma_{RS}(\theta) = \begin{cases} g^2\theta^2 & -15^\circ < \theta < 15^\circ \\ 0 & |\theta| \geq 15^\circ \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – угол места,  $g = 0.021$  – подгоночный коэффициент. Для демонстрации эффективности использования в итерационном алгоритме заявленных функций был выполнен синтез отражательной антенной решетки с кусочно-линейной трапециевидной эталонной ДН  $D_{RT}(\theta)$ . Как показали результаты расчетов, относительные интегральные погрешности аппроксимации функций  $D_{RS}(\theta)$  и  $D_{RT}(\theta)$  в интервале углов от  $\theta_1 = -13^\circ$  до  $\theta_2 = 13^\circ$  составили 0.87% и 10%. Таким образом, использование в итерационном алгоритме функций типа (3) и (4) позволило получить более точное приближение к эталонной секторной ДН.

В ходе синтеза отражательной решетки с карандашной ДН в качестве эталонной амплитудной диаграммы  $D_{RHG}(\theta)$  использовалась целая функция экспоненциального типа (4) при  $\zeta = 52\sin\theta$ . Эталонная фазовая диаграмма полагалась равной нулю ( $\gamma_{ref}(\theta) \equiv 0$ ). Дополнительно была рассчитана ДН стандартной узконаправленной антенной решетки  $D_{HG}(\theta)$ , составленной из 33 элементов, токи в которых имеют одинаковую амплитуду и фазу. Согласно сделанным оценкам, эквивалентные КУ синтезированной и стандартной решетки равны 21.1 и 22 дБи соответственно. При этом уровень боковых лепестков (УБЛ) синтезированной антенной решетки не превысил -30 дБ. В свою очередь, УБЛ стандартной решетки оказался значительно выше и составил -13.2 дБ.

При синтезе отражательной решетки, формирующей косекансную ДН, в качестве эталонной амплитудной диаграммы  $D_{ref}(\zeta)$  использовалась функция  $D_{RC}(\zeta)$ :

$$D_{ref}(\zeta) = D_{RC}(\zeta) = \frac{\sin \pi \zeta}{\pi \zeta} \frac{585 - 581\zeta + 187.5\zeta^2 - 5\zeta^3 - 7.5\zeta^4 + \zeta^5}{7.5(1 - \zeta)(2 - \zeta)(3 - \zeta)(4 - \zeta)(5 - \zeta)}, \quad (5)$$

где  $\zeta = 12\sin\theta$ . Эталонная фазовая диаграмма  $\gamma_{ref}(\theta)$  была задана в виде:

$$\gamma_{ref}(\theta) = \gamma_{RC}(\theta) = \begin{cases} \arctan^{0.2}\theta & -8^\circ < \theta < 28^\circ \\ 0 & \theta \notin (-8^\circ, 28^\circ) \end{cases}. \quad (6)$$

Для оценки эффективности использования в итерационном алгоритме заявленных функций был выполнен синтез отражательной антенной решетки с кусочно-гладкой косекансной эталонной ДН  $D_{RIC}(\theta)$ . Сравнительный анализ полученных результатов показал, что относительные интегральные среднеквадратичные погрешности аппроксимации

эталонных ДН  $D_{RC}(\theta)$  и  $D_{RIC}(\theta)$  в интервале углов  $[-26^\circ, 4^\circ]$  составили 4.7% и 9.5% соответственно. Таким образом, использование в итерационном алгоритме функций типа (5) и (6) позволило получить более точное приближение к эталонной косекансной ДН.

В **Разделе 3.5** представлены разработанные модели сканирующих антенн, каждая из которых содержит плоскую отражательную решетку и компактную облучающую ФАР. Электронное управление лучом в азимутальной плоскости реализуются в спроектированных антеннах благодаря ФАР и особой конфигурации отражательной решетки (см. Рис. 5) в виде прямоугольной матрицы с одинаковыми столбцами, составленными из трехслойных печатных структур, рассмотренных в **Разделе 3.2**.

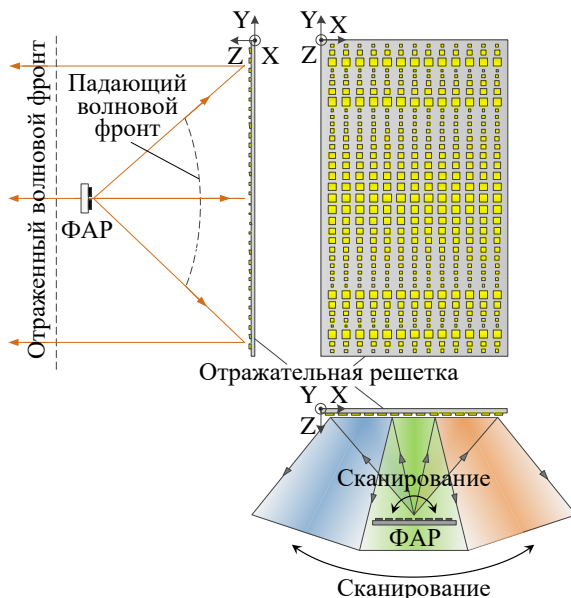


Рис. 5. Конфигурация сканирующей антенны с плоской отражательной решеткой.

В ходе выполнения работы были спроектированы плоские отражательные решетки в виде печатных плат, формирующих в плоскости угла места  $YOZ$  ДН секторного, карандашного и косекансного типа. Для оценки характеристик сканирующих антенн, содержащих такие отражательные решетки, проводилось электромагнитное 3D-моделирование в программе CST Microwave studio с эквивалентным ФАР рупорным облучателем. При этом во всех случаях облучающая рупорная антенна располагалась на расстоянии 70 мм от центра печатной платы, включавшей  $29 \times 33 = 957$  отражательных ячеек (29 одинаковых столбцов из 33 элементов каждый).

Согласно результатам моделирования, рассчитанная форма главных лучей ДН антенных систем в целом соответствует заданным эталонным математическим моделям, при этом рабочая полоса частот у всех рассмотренных решеток соответствует ширине основного канала стандартов IEEE 802.11ad, IEEE 802.11ay 2.16 ГГц. Однако главной особенностью представленных антенных систем является возможность электронного сканирования в азимутальной плоскости  $XOZ$  в секторе  $\pm 15^\circ$ .

**Глава 4** посвящена практической реализации разработанных сканирующих антенн диапазона 60 ГГц. В частности, в **Разделе 4.1** представлены изготовленные прототипы линзовых антенн.

В ходе выполнения данной работы было изготовлено 2 полиэтиленовых линзы с вертикальными линейными апертурами 130 и 190 мм. Первая из них имела бифокальный профиль, а вторая – зонированный (см. Рис. 6).

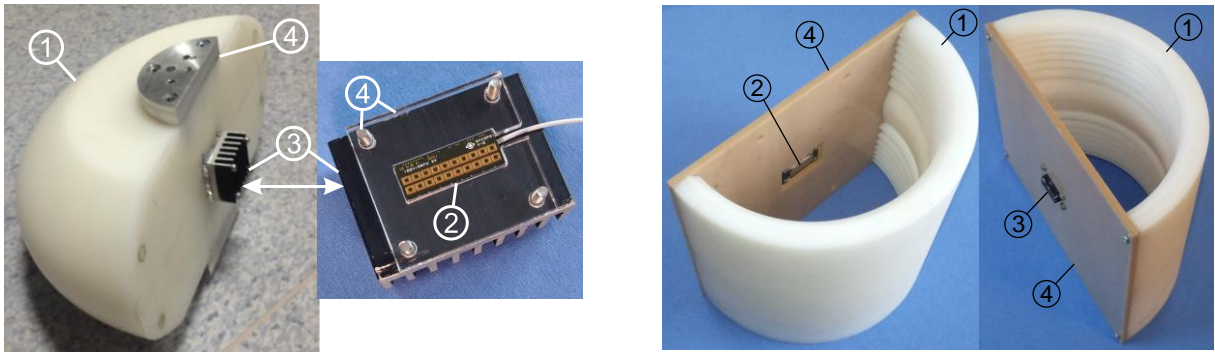


Рис. 6. Прототипы линзовых антенн в сборе: 1 – линза (бифокальная слева, зонированная справа), 2 – ФАР, 3 – теплоотводящий радиатор, 4 – крепежные элементы.

В качестве облучающей ФАР использовался антенный модуль (чип) диапазона 57.24 – 65.88 ГГц, разработанный компанией Intel. Данный модуль имеет КУ 12 – 15 дБи и способен осуществлять электронное сканирование лучом в азимутальной плоскости в секторе  $\pm 50^\circ$ . Кроме того, весь рабочий диапазон частот чипа 57.24 – 65.88 ГГц в соответствии со стандартом IEEE 802.11ad разделен на четыре канала шириной 2.16 ГГц.

В Разделе 4.2 представлены изготовленные прототипы сканирующих антенн с плоскими отражательными решетками. Следует отметить, что одна из отражательных решеток являлась аналогом классического цилиндрического прямофокусного рефлектора (см. Рис. 7а), а другая – офсетного с углом смещения облучателя  $15^\circ$  (см. Рис. 7б).

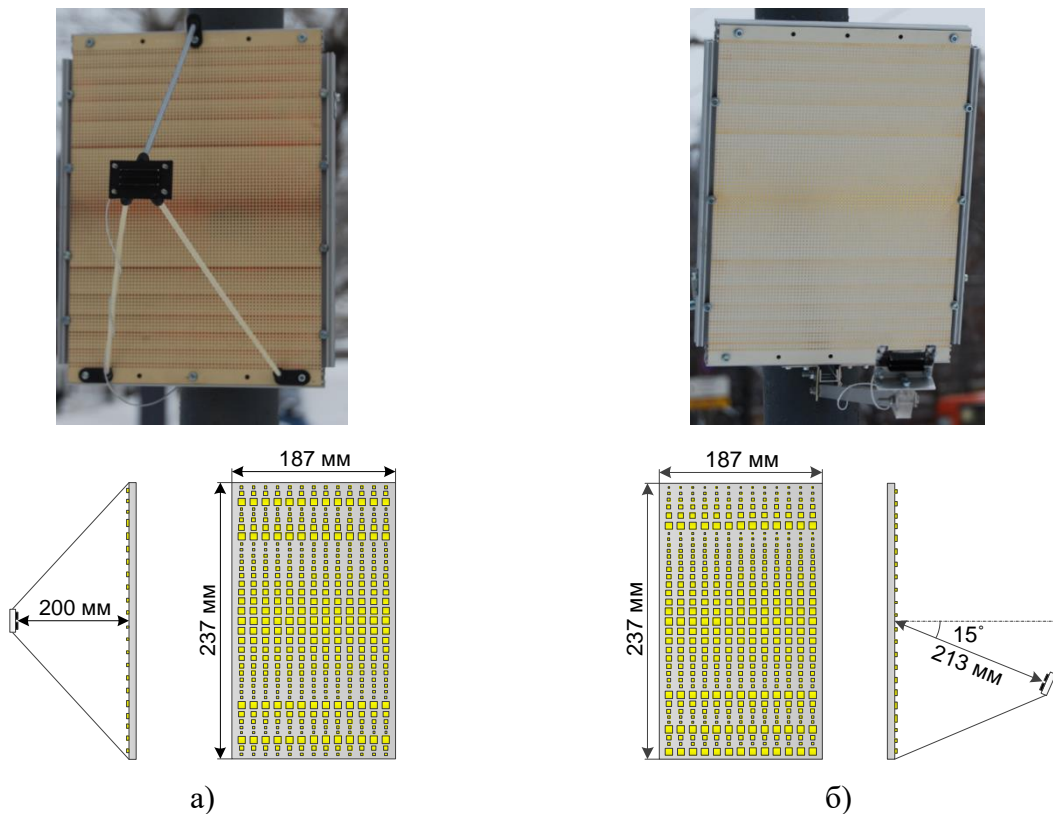


Рис. 7. Прототипы отражательных антенн: а) – прямофокусного типа; б) – офсетного типа.

В Разделе 4.3 приведено описание экспериментальной установки, с помощью которой проводились измерения характеристик прототипов антенн, созданных как в ходе выполнения настоящей работы, так и в рамках проекта MiWEBA (эллиптических линзовых антенн).

В Разделе 4.4 представлены результаты измерений характеристик всех прототипов сканирующих антенн (см. таблицу 1).

Таблица 1. Измеренные характеристики изготовленных прототипов антенных систем

Тип антенны / Размер вертикальной линейной апертуры	Рабочая полоса частот, ГГц (по уровню -3 дБ)	Макс. КУ, дБи	Ширина главного луча ДН в азимутальной / угломестной (А / У) плоскости	Сектор сканирования в азимутальной / угломестной (А / У) плоскости	УБЛ, дБ
Линзовая эллиптическая / 70 мм	57.24 – 65.88	24.8	9° / 5°	±35° А	-10
Линзовая эллиптическая / 90 мм	57.24 – 65.88	26.0	9.5° / 4°	±40° А	-10
Линзовая эллиптическая / 112 мм	57.24 – 65.88	27.5	9.5° / 3°	±40° А	-9
Линзовая бифокальная / 130 мм	57.24 – 65.88	27.5	9.5° / 2.5°	±40° / ±3°	-8
Линзовая зонированная / 190 мм	58 – 62	27.5	14° / 3°	±45° А	-10
Отражательная прямофокусная / 237 мм	57.24 – 63.72	24.5	14° / 2°	±15° А	-8
Отражательная офсетная / 237 мм	57.24 – 63.72	26.0	14° / 2°	±15° А	-8

Измеренные характеристики созданных прототипов антенных систем хорошо согласуются с результатами электромагнитного моделирования в CST Microwave studio и отвечают требованиям, предъявляемым стандартами IEEE 802.11ad и IEEE 802.11ay к приемо-передающему антенному оборудованию малых базовых станций (точек доступа Wi-Fi) и релейных станций, работающих в окрестности частоты 60 ГГц на расстояния 25 – 50 м и 100 – 300 м соответственно.

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

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен анализ различных концепций построения и технологий реализации современных сканирующих антенн, предназначенных для работы в системах мобильной радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн. Сформулированы требования, предъявляемые к таким антеннам. Установлено, что для новых базовых и релейных станций, работающих в соответствии со стандартами IEEE 802.11ad и IEEE 802.11ay, перспективными вариантами являются антенны с линзами из однородного диэлектрика и пассивными плоскими отражательными решетками.
2. Проведен расчет профилей фокусирующих линз в приближении геометрической оптики. Используя данное приближение, были разработаны оригинальные линзы из полиэтилена, имеющие зонированный (составленный из отрезков гипербол) и бифокальный профили. При этом впервые предложена тороидально-бифокальная линза с одной преломляющей поверхностью. Как показали результаты электромагнитного моделирования, антенна с такой линзой имеет уровень

- боковых лепестков на 2 – 2.5 дБ меньше, чем у аналогичной бифокальной линзовой антенны с двумя преломляющими поверхностями.
3. Разработан и создан прототип тороидально-бифокальной линзовой антенны диапазона 57.24 – 65.88 ГГц. Полученные результаты электромагнитного моделирования и измерений свидетельствуют о том, что использование данной антенны в малых релейных станциях, расположенных друг от друга на расстояниях 100 – 300 м и на высотах 10 – 30 м, позволит повысить качество и надежность передачи данных в реконфигурируемых транспортных сетях со скоростями 2.5 – 4.6 Гбит/с.
  4. Разработан и создан прототип зонированной линзовой антенны диапазона 58 – 62 ГГц. Как показали результаты электромагнитного моделирования и экспериментальных исследований характеристик, данная антенна с облучателем в виде ФАР имеет высокий КУ 27.5 дБи, способна осуществлять электронное широкоугольное сканирование в азимутальной плоскости в секторе  $\pm 45^\circ$  и при этом весит 900 г, то есть в 2 – 2.4 раза меньше, чем антенны с гладкими (незонированными) линзами из того же материала и с близкими по значению КУ. Таким образом, использование разработанной зонированной линзовой антенны в мобильных системах связи 5G позволит уменьшить вес релейных станций диапазона 60 ГГц, осуществляющих передачу данных со скоростями 2.5 – 4.6 Гбит/с на расстояния 100 – 300 м, и при этом сохранить качество и устойчивость радиосвязи между узлами реконфигурируемых транспортных сетей.
  5. Разработаны оригинальные модели пассивных плоских отражательных решеток, формирующих ДН секторного, карандашного и косекансного типов. Отражательные решетки были синтезированы с помощью усовершенствованного итерационного метода, в котором эталонная амплитудная ДН принадлежит к классу целых функций экспоненциального типа. При этом при синтезе отражательных решеток в данной работе впервые использовались оригинальные эталонные функции фазовых диаграмм, позволившие получить более точное приближение к требуемой форме главного луча. Как показали результаты электромагнитного моделирования в CST Microwave studio, формы главных лучей антенн, содержащих такие отражательные решетки, в целом соответствуют заданным эталонным математическим моделям, что подтверждает эффективность предложенного итерационного метода. На основе разработанных моделей плоских отражательных решеток могут быть созданы прототипы сканирующих антенн, предназначенных для точек доступа в интернет и малых релейных станций гетерогенных сетей 5G, развернутых, в частности, в крупных объектах социальной инфраструктуры.
  6. Разработаны и созданы два прототипа сканирующих антенн с оригинальными плоскими отражательными решетками, один из которых являлся аналогом прямофокусной зеркальной антенны, а другой – офсетной. Как показали результаты электромагнитного моделирования и измерений, данные антенны могут найти применение в приложениях реконфигурируемых транспортных сетей 5G, в которых требуются недорогие антенны с небольшой массой и плоскостным форм-фактором, в частности, в малых релейных станциях диапазона 60 ГГц, осуществляющих передачу данных со скоростями 2.5 – 4.6 Гбит/с на расстояния 100 – 150 м.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК:*

1. Мальцев, А.А. Сканирующая тороидально-бифокальная линзовая антенная система диапазона 57 – 64 ГГц / А.А. Мальцев, **В.М. Селезнев**, А.С. Рульков, О.В. Болховская //

Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 22. № 3. – С. 36-47.

2. **Селезнев, В.М.** Сканирующая антенна с плоской отражательной решеткой, предназначенная для беспроводных систем связи V-диапазона / **В.М. Селезнев** // Радиотехника. – 2022. – Т. 86. № 3. – С. 115-123.
3. **Селезнев, В.М.** Широкополосная сканирующая линзовая антенна для приложений 5G миллиметрового диапазона / **В.М. Селезнев** // Радиотехника. – 2022. – Т. 86. № 6. – С. 122-130.
4. **Селезнев, В.М.** Разработка сканирующих антенных систем диапазона 60 ГГц с плоскими отражателями из пассивных микрополосковых элементов / **В.М. Селезнев, О.В. Болховская, А.А. Мальцев** // Антенны. – 2022. – № 5. – С. 30-48.

*Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях, индексируемых в международных базах данных (Web of Science и Scopus):*

5. Maltsev, A. Scanning Toroidal Lens-Array Antenna With a Zoned Profile for 60 GHz Band / A. Maltsev, O. Bolkhovskaya, **V. Seleznev** // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2021. – V. 20. No. 7. – P. 1150-1154.
6. Bolkhovskaya, O. Steerable Bifocal Lens-Array Antenna at 57-64 GHz / O. Bolkhovskaya, **V. Seleznev**, A. Rulkov, A. Maltsev // 2019 Conference on Microwave Techniques (COMITE). – 2019. – P. 1-6.
7. Bolkhovskaya, O. Cost-Efficient RAA Technology for Development of the High-Gain Steerable Antennas for mmWave Communications / O. Bolkhovskaya, A. Maltsev, **V. Seleznev**, I. Bolotin // Volume 332: Machine Learning and Artificial Intelligence. – 2020. – P. 346-353.

*Материалы конференций:*

8. Голубь, В.Д. Метод расчета рефлекторных антенн миллиметрового диапазона длин волн с планарным отражателем из пассивных микрополосковых элементов / В.Д. Голубь, **В.М. Селезнев, О.В. Болховская** // Труды XXI научной конференции по радиофизике. – Н. Новгород: ННГУ, 2017. – С. 327-329.
9. Литовский, Д.А. Разработка сканирующих линзовых антенных систем миллиметрового диапазона длин волн / Д.А. Литовский, **В.М. Селезнев** // Труды XXI научной конференции по радиофизике. – Н. Новгород: ННГУ, 2017. – С. 341-344.
10. Голубь В.Д. Проектирование пассивных отражательных элементов для разработки антенных решеток миллиметрового диапазона длин волн с заданными характеристиками / В.Д. Голубь, О.В. Болховская, **В.М. Селезнев** // Труды III научно-технической конференции «Радиолокация. Теория и практика». – Н. Новгород: АО ФНПЦ «ННИИРТ», 2017. – С. 162-169.
11. **Селезнев, В.М.** Сканирующая рефлекторная антенна миллиметрового диапазона длин волн 60 ГГц / **В.М. Селезнев, А.С. Рукльков** // Труды XXIII научной конференции по радиофизике. – Н. Новгород: ННГУ, 2019. – С. 384-386.

*Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:*

12. Патент 2660385 С1, Российская Федерация, МПК H01Q 3/24. Сканирующая линзовая антенна / Болховская О.В., **Селезнев В.М.**, Голубь В.Д.; патентообладатель: ООО "Радио Модуль НН". № 2017126581; заявл. 24.07.2017; опубл. 06.07.2018.
13. Свид. 2017663555 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет профиля диэлектрической бифокальной линзы / **Селезнев В.М.**, Болховская О.В.; заявитель и правообладатель: ООО "Радио Модуль НН". – № 2017660443; заявл. 18.10.2017; опубл. 07.12.2017, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
14. Свид. 2018664345 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа синтеза плоских антенных решеток на основе пассивных отражательных элементов / **Селезнев В.М.**, Болховская О.В., Рукльков А.С., Голубь В.Д.;

заявитель и правообладатель: ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – № 2018661637; заявл. 24.10.2018; опубл. 14.11.2018, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

15. Свид. 2019614854 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчёт диаграмм направленности диэлектрических линзовых антенн / Селезнев В.М.; правообладатель: Селезнев Валентин Михайлович. – № 2019613479; заявл. 02.04.2019; опубл. 15.04.2019, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karki, S.K. Lens antenna design for E-band point-to-point radio links / S.K. Karki, J. Ala-Laurinaho, V. Viikari, R. Valkonen // 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). – 2017. – P. 1625-1631.
2. Nayeri, P. Bifocal Design and Aperture Phase Optimizations of Reflectarray Antennas for Wide-Angle Beam Scanning Performance / P. Nayeri, F. Yang, A.Z. Elsherbeni // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – V. 61. No. 9. – P. 4588-4597.
3. Venneri, F. Design and Validation of a Reconfigurable Single Varactor-Tuned Reflectarray / F. Venneri, S. Costanzo, G. Di Massa // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – V. 61. No. 2. – P. 635-645.
4. Xi, Q. A Reconfigurable Planar Fresnel Lens for Millimeter-Wave 5G Frontends / Q. Xi, C. Ma, H. Li, B. Zhang, C. Li, L. Ran // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2020. – V. 68. No. 11. – P. 4579-4588.
5. Kamoda, H. 60-GHz Electronically Reconfigurable Large Reflectarray Using Single-Bit Phase Shifters / H. Kamoda, T. Iwasaki, J. Tsumochi, T. Kuki, O. Hashimoto // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2011. – V. 59. No. 7. – P. 2524-2531.
6. Li, X. Broadband Electronically Scanned Reflectarray Antenna With Liquid Crystals / X. Li [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2021. – V. 20. No. 3. – P. 396-400.
7. Patent No. WO 2007/136293 A1. Millimeter-wave reflector antenna system and methods for communicating using millimeter-wave signals / Alamouti S.M., Maltsev A.A., Chistyakov N.V., Maltsev A.A. Jr., Sergeev V.S. Filing Date: 23.05.2006. Publication Date: 29.11.2007.
8. Patent No. US 8 193 994 B2. Millimeter-wave chip-lens array antenna systems for wireless networks / Alamouti S.M., Maltsev A.A., Sergeev V.S., Maltsev A.A. Jr., Chistyakov N.V. Filing Date: 23.05.2006. Publication Date: 05.06.2012.
9. Maltsev, A. Millimeter-wave Toroidal Lens-Array Antennas Experimental Measurements / A. Maltsev, A. Lomayev, A. Pudeyev, I. Bolotin, O. Bolkhovskaya, V. Seleznev // 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. – 2018. – P. 607-608.