

На правах рукописи



Шабалин Семен Андреевич

**Разработка и исследование способов построения фазированных
антенных решеток миллиметрового диапазона для радиолокационных
систем интеллектуальных транспортных средств**

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 бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Научный руководитель: **Мякинъков Александр Валерьевич**, доктор технических наук, доцент, директор учебно-научного института радиоэлектроники и информационных технологий НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты: **Алешкин Андрей Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Передающие, антенно-фидерные устройства и средства СЕВ» военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург
Белов Юрий Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского радиофизического института Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Ведущая организация: **Акционерное общество «Самарское инновационное предприятие радиосистем»**, г. Самара

Защита состоится «26» октября 2023 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:
<https://www.mtu.ru/structure/view/podrazdeleniya/fpsvk/obyavleniya-o-zashhitah>

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Белов Юрий Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

В настоящее время транспортные средства все в большей степени оборудуются различными электронными устройствами. Функции данных устройств варьируются от сигнализации о неисправности определённого блока до участия в процессе движения и оказания воздействия на органы управления в случае экстренной ситуации или в соответствии с командами, задаваемыми человеком. В части решения вопроса повышения безопасности эксплуатации транспортного средства наиболее перспективным и активно развивающимся направлением является применение систем интеллектуальной помощи водителю (Advanced Driver Assistant System), которые, как правило, размещаются под бампером или решеткой радиатора автомобиля. При этом в процессе движения и выполнении различных маневров обеспечивается предотвращение столкновений, в том числе предупреждение о возможном лобовом столкновении, контроль «слепых» зон, помощь при смене полосы, предупреждение о возможном ударе сзади, адаптивный круиз-контроль при движении по автостраде, круиз-контроль в режиме старт-стоп [1-4]. Основой подобных систем зачастую являются радары, которые практически не подвержены изменению характеристик обнаружения при любых погодных условиях и времени суток. При этом, разработка такого рода устройств является трудоемкой и сложной задачей как в области проектирования системы обработки, так и в области построения антенны, поскольку, ввиду специфики применения, радар должен удовлетворять требованиям по дальности обнаружения, сектору обзора, типу зондирующего сигнала, обладать способностью обнаруживать, разрешать и определять класс множества целей и другим требованиям.

Использование радаров в транспортных системах не ограничено автомобильной тематикой. В последнее время радары активно внедряются в инфраструктуру железнодорожных (ж/д) переездов [**Error! Reference source not found.**]. При этом большинство переездов в России оборудованы шлагбаумами и специальными устройствами ограждения, которые лишь предупреждают и препятствуют прохождению посторонних объектов через переезд при приближении поезда. Опыт зарубежных производителей радаров для ж/д переездов показывает эффективность применения радиолокационных систем (РЛС), что в значительной степени определяет актуальность рассмотрения данного вопроса.

В настоящее время острая проблема обеспечения безопасности движения, особенно в условиях ограниченной видимости, стоит и для малой авиации с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Использование существующих решений, значительная часть из которых предназначена для пассажирских лайнеров и военной авиации, ограничено из-за больших масса-габаритных параметров радарных систем. Применение, например, автомобильных радаров недопустимо из-за несоответствия предъявляемым требованиям по дальности обнаружения, угловому разрешению, а также точности определения координат различных целей, что приводит к необходимости определения принципиально новых решений по разработке радара для подобных транспортных средств.

Способ формирования и параметры зондирующего сигнала, набор весовых коэффициентов, выбор частоты дискретизации и др. определяются особенностями применяемой в радаре системы обработки сигналов. При этом, возможность достижения заданной вероятности обнаружения, дальности и уровня разрешающей способности по углу различного класса объектов радарной системой во многом зависит от технологии изготовления, способа размещения на плате и типа приемо-передающего модуля. При этом предъявляются строгие требования к параметрам формируемых диаграмм

направленности (ДН) передатчиком и приемником, антенны которых представляют собой антенные решетки (АР), а также к масса-габаритным показателям антенн для реализации компактных решений. В связи с этим в настоящей работе рассматриваются варианты проектирования архитектур антенных систем радаров отмеченных направлений, работающих в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн.

Цель работы

Целью работы является исследование и разработка способов построения АР миллиметрового и сантиметрового диапазонов для радаров, используемых для обеспечения безопасности на транспорте, в том числе: радаров интеллектуальных наземных транспортных средств, радаров контроля движения на ж/д переездах и радаров для беспилотных летательных аппаратов.

Задачи работы

1. Выбор и обоснование архитектуры антенных решеток для радаров миллиметрового и сантиметрового диапазонов как часть работы по импортозамещению систем интеллектуальной помощи водителю в отношении вида и структуры элементов АР, топологии АР, способа формирования лучей диаграммы направленности на передачу и прием.
2. Разработка структурных элементов АР, исследование и оптимизация их характеристик.
3. Разработка и исследование способов построения топологии антенных систем автомобильных радаров, обеспечивающих максимизацию дальности обнаружения целей и наилучшее угловое разрешение в физическом луче (без применения алгоритмов сверхразрешения) при ограниченном количестве приемо-передающих модулей.
4. Построение конструкции антенных решеток передающей и приемной позиций просветного радара, размещаемого на ж/д переезде совместно с моностатическим для повышения вероятности обнаружения объектов на ж/д переезде.
5. Исследование способа высокоточного измерения координат объекта в двух ортогональных плоскостях и разработка способа построения антенной системы радара для малой и беспилотной авиации, обеспечивающего возможность реализации трехкоординатного обзора и функции построения карты высот в зоне посадки БПЛА.
6. Электродинамическое моделирование и оптимизация разработанных топологий антенных решеток в САПР.
7. Исследование способа получения оценки основных характеристик луча ДН АР в безэховой камере без применения классической процедуры измерения амплитуды отраженного сигнала с множества направлений.

Методы исследования

Результаты работы получены с использованием теории антенн, численных методов электродинамического моделирования в САПР, методов математического моделирования и натуральных испытаний.

Научная новизна

1. Предложен способ построения антенной решетки, который при ограниченном количестве приемных и передающих каналов обеспечивает заданное сочетание дальности обнаружения объектов и рэлеевского разрешения по угловой координате и, в отличие от известных способов, основанных на использовании технологии ММО, не ведет к возникновению энергетических потерь, связанных с

- разреженным характером решетки. (Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных устройств СВЧ, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих, и других, с существенно улучшенными параметрами).
2. Разработана архитектура антенной решетки для высоконадежного радара контроля движения на ж/д переезде, обеспечивающая обзор широкого сектора углов (свыше девяноста градусов) с высокой разрешающей способностью (в несколько градусов), которая, в отличие от известных решений, основана на двухэтапном формировании гребенки интерференционных лучей передающей антенны путем переключения фаз передающих каналов при последующей пространственной селекции лучами приемной решетки с цифровым диаграммообразованием. (Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных устройств СВЧ, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих, и других, с существенно улучшенными параметрами).
 3. Показана возможность применения просветного эффекта для повышения надежности работы радиолокационного комплекса на ж/д переезде и предложен способ обнаружения стационарных целей вблизи линии базы, что достигается за счет специально-спроектированных антенн, обеспечивающих формирование нулей ДН вдоль линии базы. (Разработка методов проектирования и оптимизации антенных систем и СВЧ устройств широкого применения).
 4. Предложен секторный способ сканирования пространства в двух ортогональных плоскостях передающей фазированной антенной решеткой радара для беспилотного летательного аппарата с поочередным формированием набора узких лучей приемной решетки в каждом из секторов. Данный подход, в отличие от известных решений, основанных на технологии ММО, позволяет формировать максимальную физическую апертуру приемной антенны, состоящей из подрешеток, при заданном числе каналов. (Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных устройств СВЧ, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих, и других, с существенно улучшенными параметрами).
 5. Разработан способ получения характеристик луча ДН антенны, основанный на вычислении преобразования Фурье от наведенного амплитудно-фазового распределения поля по апертуре при приеме сигнала лишь с одного направления. (Исследование и разработка метрологического обеспечения проектирования, производства и эксплуатации антенных систем и СВЧ устройств).

Практическая значимость результатов

1. Разработан прототип автомобильного радара, АР которого реализована в соответствии с рассмотренным в работе способом, обеспечивающим управляемый компромисс между дальностью обнаружения объектов и разрешающей способностью по угловой координате при заданных ограничениях на габариты антенны и число каналов.
2. Разработана архитектура и схема размещения на СВЧ плате антенны РЛС, предназначенной для контроля движения на ж/д переезде, в состав которой входят моностатический и просветный радар.
3. Разработаны топологии АР посадочного и полетного радаров для малогабаритной авиации с использованием секторного сканирования пространства в двух ортогональных плоскостях для обеспечения трехкоординатного обзора пространства в передней и нижней полуплоскости относительно носителя.

4. Разработанный способ оценивания ДН АР в значительной степени упрощает процесс определения ее направленных свойств, что особенно важно при измерении характеристик антенн серийных образцов радаров.

Обоснованность и достоверность

Предложенные в настоящей диссертации положения и выводы согласуются с данными, приведенными в научной литературе, и подтверждаются результатами компьютерного электродинамического моделирования в программе ADS и экспериментальными исследованиями в безэховой камере с помощью поверенной аппаратуры.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенный способ построения фазированной антенной решетки миллиметрового диапазона, состоящей из неперекрывающихся подрешеток передающей и приемной частей при максимальном разнесении фазовых центров одной из них, для заданного числа передающих и приемных каналов и ограничений в отношении геометрического размера апертуры позволяет достичь характеристик, близких к оптимальным, в отношении сочетания дальности обнаружения и углового разрешения.
2. Применение разработанной конструкции передающей и приемной антенных решеток с подавлением излучения и приема в направлении линии базы для просветного радара сантиметрового диапазона длин волн (2,4 ГГц, 5 ГГц) обеспечивает возможность использования просветного эффекта для повышения эффективности радиолокационного комплекса системы безопасности железнодорожного переезда по обнаружению стационарных объектов в зоне переезда по сравнению с системой, где применяются только радары, реализующие обнаружение сигнала обратного рассеяния.
3. Однозначное определение угловых координат целей в двух ортогональных плоскостях при заданной разрешающей способности и ограничении числа каналов АР вертолетного радара ближнего действия обеспечивается за счет секторного сканирования при переключении передающих подрешеток и формированию набора парциальных приемных лучей в пределах выбранного сектора.
4. Диаграмма направленности фазированной антенной решетки может быть оценена с незначительной по сравнению с классическим методом погрешностью (единицы децибел в области боковых лепестков) по измерению амплитудно-фазового распределения в приемных каналах сигнала, отраженного от тестового уголкового отражателя при одном фиксированном угловом положении отражателя относительно антенны для каждого луча диаграммы направленности.

Публикации и апробация результатов работы

Основные результаты работы отражены в 16 научных публикациях, среди которых 3 статьи в журналах, входящих в список ВАК, 10 статей в журналах и сборниках, индексируемых в международных базах данных (Scopus, Web of Science), а также в свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты работы обсуждались на российских и международных конференциях:

1. XXIV Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2018), Нижний Новгород, 20 апреля 2018.

2. XXIV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC 2018), Воронеж, 17-19 апреля 2018.
3. Конференция молодых исследователей России по электротехнике и электронике IEEE (2019 ElConRus), Санкт-Петербург, 28-31 января 2019.
4. The 21th International Radar Symposium (IRS), Ulm, Germany, 26-28 June 2019.
5. Конференция молодых исследователей России по электротехнике и электронике IEEE (2020 ElConRus), Санкт-Петербург, 27-30 января, 2020.
6. The 22th International Radar Symposium (IRS), Berlin, Germany, 21-22 June 2021.
7. Международный форум Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications – 2021 (IEET-2021), Ижевск, 30 ноября 2021.

Личный вклад автора

Принимал участие в разработке антенных систем РЛС, функционирующих в условиях проезжей части, ж/д переезда, а также радара для малой авиации и БЛА. Выполнил построение топологий АР, провел исследование разработанных моделей антенн в САПР и анализ полученных результатов. Совместно с научным руководителем исследовал способы оценки характеристик луча ДН антенн прототипов автомобильных радаров миллиметрового диапазона.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем работы составляет 178 страниц машинописного текста, включающих 135 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 103 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обозначены актуальность, цель и задачи работы, текущее состояние рассматриваемого научного направления, методы исследования, практическая ценность и научная новизна работы, также обозначены конкретное внедрение результатов исследования, апробация работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе рассматриваются основные типы антенн, используемые в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн, и вопрос определения способа построения антенной системы для РЛС интеллектуальных транспортных средств. Описаны структурные особенности данных антенн, а также их достоинства и недостатки, связанные с их применением в условиях дорожной ситуации.

Ведущие производители радаров интеллектуальных транспортных средств реализуют антенны в виде АР. Такой выбор обусловлен тем, что направление и параметры соответствующей ДН такой антенны регулируются изменением АФР токов на ее излучающих элементах. Кроме того, наличие большого числа элементарных излучателей позволяет добиться в общем случае высокого показателя КНД по сравнению с одиночными излучателями и узкого луча ДН для достижения соответствующих поставленным задачам характеристик углового разрешения. Одним из самых популярных методов построения АР является технология на основе отрезков микрополосковых линий передачи, ввиду простоты ее структуры, низкого профиля и малой стоимости производства.

Отмечены основные достоинства антенных систем автомобильных радаров ведущих мировых производителей в части обеспечиваемой ширины сектора обзора, дальности обнаружения, рабочей полосы частот, разрешающая способность по углу, которые определяют популярность применения данных систем на борту большинства современных автомобилей. Также описан разработанный в НГТУ совместно с индустриальным партнером АО «ПКК Миландр» автомобильный радар MAPC – 2A1/10, работающий в сантиметровом диапазоне волн [6], с оригинальной конструкцией антенны.

Во втором разделе дается описание методики построения структурных элементов AP на базе отрезков микрополосковой линии передачи. Также рассматривается процедура проектирования патч-антенны, в частности, особенности, связанные с расчетом размеров элемента излучения, способы подведения мощности от приемо-передающего модуля к конкретному излучателю антенны и объединению патчей в единую структуру столбца AP. Данное описание, не претендуя на научную новизну в масштабах мировой науки, демонстрирует накопленный опыт коллектива и автора работы в области разработок такого класса при том, что практика разработки и производства соответствующих устройств в РФ крайне ограничена.

Выбор прямоугольной формы излучателя обусловлен простотой процесса анализа и производства, а также низкого уровня кросс-поляризации, который может быть дополнительно уменьшен при применении соответствующих решений [7]. Каждый патч проектируется исходя из условия формирования максимума излучения в направлении ортогональном плоскости антенны. Это достигается соответствующим выбором рабочей моды (конфигурации поля), главным образом, за счет изменения длины и ширины патча. Для достижения чисто действительного входного сопротивления патча, в качестве начального приближения его длины берется половина длины волны в подложке. Дальнейшая корректировка связана с тем фактом, что поле, в отличие от полосковой линии, сосредоточено не только в диэлектрике, но частично и в воздухе из-за чего на краях патча возникает эффект загибания линий электрического поля, что приводит к увеличению электрической длины элемента.

Выбор способа подведения мощности к элементу AP зависит от ряда факторов, среди которых можно выделить: рабочую полосу частот, параметры диэлектрика, технологию производства платы и антенной системы, в частности, и др. Кроме того важным является вопрос выбора точки и/или области антенны, к которой будет подводиться мощность. В зависимости от варианта решения данного вопроса и конфигурации антенной системы, характеристики излучения могут претерпевать значительные искажения. В связи с этим отмечены способы подведения мощности к элементам AP через щель, коаксиальный разъем и с использованием коаксиальной линии в различных слоях платы. Также описаны достоинства и недостатки выбора точки подведения мощности к структуре от микросхемы в рамках конкретных задач, определяемых предъявляемыми требованиями к основным характеристикам антенны.

Один столбец AP может быть представлен как комбинация двух компонентов: прямоугольных патчей и соединяющих их микрополосковых линий (Рис. 1).

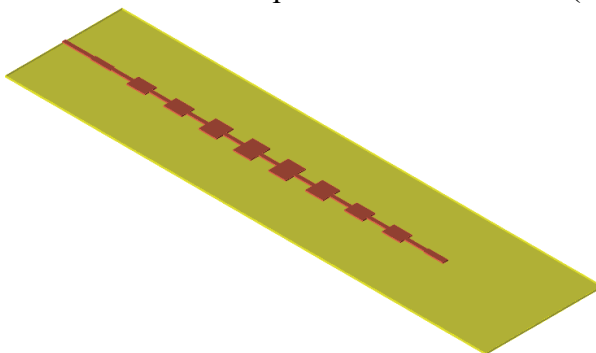


Рис. 1. Топология столбца AP

Масса-габаритные показатели для транспортных радарных систем играют важную роль в силу области их применения также, как и обеспечение заданных характеристик формируемого поля антенной. В связи с этим, среди различных вариаций построения столбца выбор сделан в пользу последовательной схемы с излучателями в линию, поскольку данное решение обеспечивает меньшие габариты антенны (в сравнении с параллельной схемой), а также возможность размещения столбцов эквидистантно с шагом $\lambda/2$. При этом значение коэффициента передачи соседних столбцов достигает порядка минус 25 дБ в рабочей полосе частот, что при уровне излучаемой мощности около 10 мВт является приемлемым результатом. Важным условием при проектировании столбца АР является обеспечение синфазного возбуждения всех входящих в него элементов с заданным амплитудным распределением для достижения требуемых характеристик ДН антенны в заданной плоскости. На данной основе, во втором разделе рассмотрен процесс проектирования столбца АР миллиметрового диапазона с демонстрацией полученных результатов математического и электродинамического моделирования. Также описан подход проектирования столбца АР, представляющий собой выполнение итерационной процедуры учета потерь в линиях передачи, соединяющих излучатели друг с другом и перенормировку коэффициентов амплитудного распределения. На основе проведенных расчетов и в рамках результатов моделирования в САПР ADS методом моментов и конечных элементов получены аналогичные параметры ДН столбца и характеристики его согласования, что и классическим методом, но при повышении КПД с уровня 50-60% до 80-90%.

Третий раздел посвящен рассмотрению способов построения и разработки АР автомобильного радара. С учетом специфики области применения, к автомобильным радарам предъявляются строгие требования к вероятности обнаружения целей, излучаемой мощности, сектору обзора и к разрешающей способности (дальность, скорость, угловая координата), которые в значительной степени отражаются на архитектуре и структурных элементах используемой антенной системы [8]. В связи с этим, проведено исследование вопроса размещения приемных и передающих элементов АР относительно друг друга, с точки зрения использования как можно меньшего количества микросхем при сохранении заданной апертуры антенны, обеспечивающей однозначное обнаружение целей на заданной дальности и с требуемым уровнем разрешения по угловой координате.

Использование ММО технологии при построении антенной системы в значительной степени обеспечивает решение задачи по достижению высокого разрешения по углу и отсутствию интерференционных максимумов в ДН. Однако, необходимость разделения нескольких сигналов передатчика тем или иным способом ведет к ухудшению энергетических показателей по сравнению с антенной, апертура которой полностью заполнена элементами, расположенными эквидистантно с шагом равным половине длине волны в воздухе, что неизбежно приводит к снижению дальности обнаружения объектов всей РЛС.

Более подходящим с точки зрения сохранения числа элементов в АР и формирования узкого луча результирующей ДН является способ, заключающийся в объединении соседних элементов антенны в, так называемые, подрешетки. В этом случае удается сохранить КУ и разрешающую способность, и в то же время при работе в узком секторе углов в дальней зоне интерференционные максимумы ДН приемника оказываются в зоне боковых лепестков ДН передатчика и подавляются при построении результирующей ДН (Рис. 2).

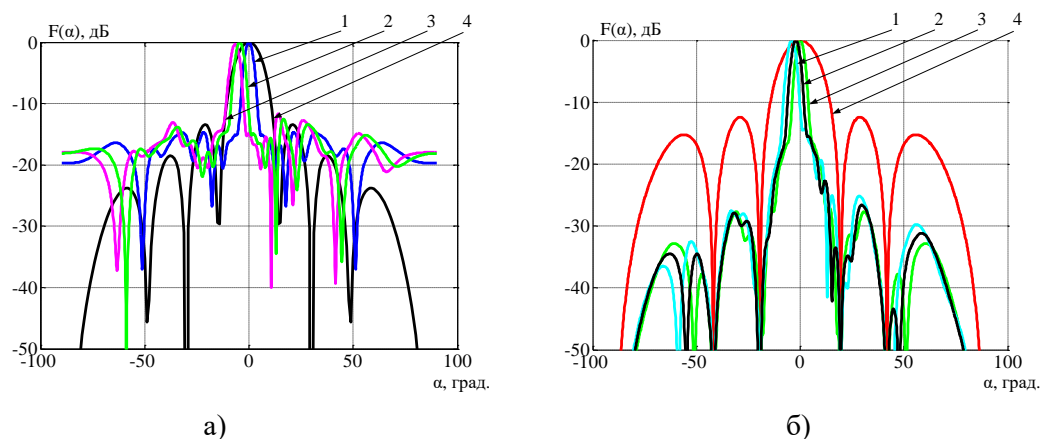


Рис 2. Лучи ДН приемной АР в направлениях: 0° (кривая 1), минус 4° (кривая 2), минус 6° (кривая 3) в режиме работы дальнего действия; 0° (кривая 4) в режиме ближнего действия (а). Лучи результирующей ДН АР (кривые 1,2,3) и ДН передатчика в режиме работы ближнего действия (кривая 4) (б)

В ходе отмеченного исследования получены результаты вычислений зависимостей отношения сигнал-шум на входе приемного устройства от размера его антенны относительно общей апертуры и ширины луча результирующей ДН от соотношения ширины апертуры передатчика и всей апертуры. Согласно произведенным вычислениям, максимальная дальность обнаружения при сохранении общей геометрической площади антенны будет иметь место в том случае, когда общая апертура антенны делится поровну между передающей и приемной антеннами (Рис. 3а). В тоже время наименьшая ширина луча ДН, и как следствие лучший уровень углового разрешения, для той же самой антенны достигается при минимальном отношении апертуры, например, приемной антенны к размеру всей АР (Рис. 3б). Возникающее противоречие возможно разрешить за счет размещения либо передающих или приемных столбцов на краях апертуры антенны при заполнении пространства между ними оставшимися элементами АР.

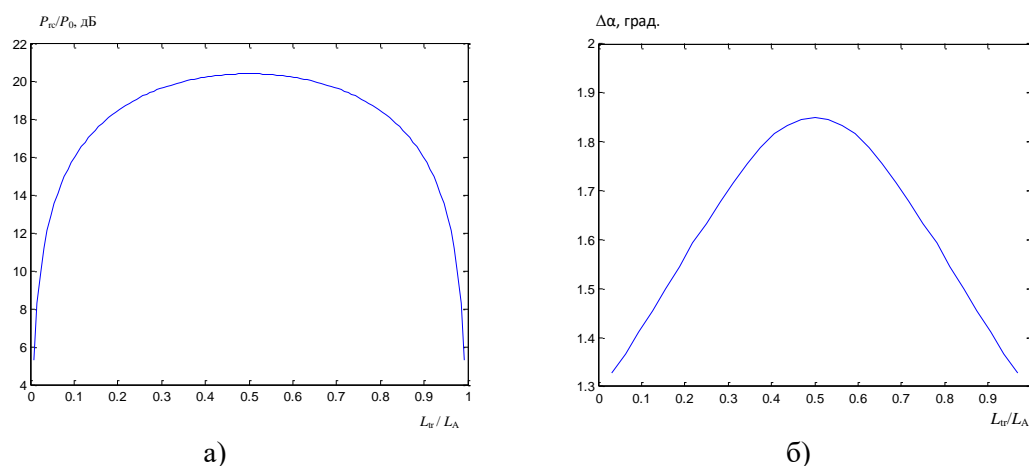


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал-шум на входе приемника от относительного размера передающей антенны (а), Зависимость ширины луча результирующей ДН от соотношения ширины апертуры передатчика и всей апертуры (б)

Произведен расчет и моделирование структурных элементов АР и приведены результаты моделирования разработанных подрешеток. С учетом описанных преимуществ применения подрешеток в структуре антенны модель АР автомобильного радара диапазона 24 ГГц имеет вид, представленный на рис. 4.

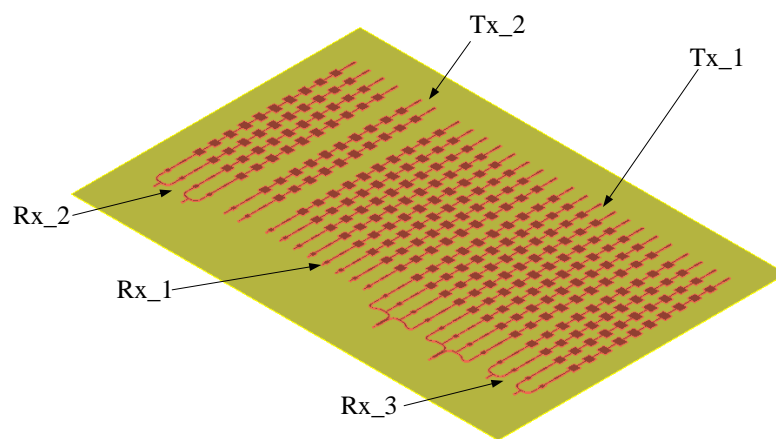


Рис. 4. Топология АР автомобильного радара сантиметрового диапазона

Передающие элементы на краях платы (Rx_2, Rx_3) вместе с центральной частью приемника (Rx_1) позволяют добиться формирования узких лучей в горизонтальной плоскости, определяя ширину результирующей ДН антенны. При переходе в миллиметровый диапазон волн и при учете конструктивных особенностей используемых микросхем появляется возможность размещения приемных и передающих элементов антенны на разных сторонах относительно приемо-передающих модулей. В связи с этим также рассмотрена топология АР автомобильного радара диапазона 76 ГГц -77 ГГц (Рис. 5). Результаты моделирования представленной топологии в САПР ADS методом конечных элементов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Основные параметры АР

Параметр	Значение
Количество излучателей в столбце АР	10 изл.
Количество приемо-передающих модулей	3 шт. (2 Tx, 4 Rx каждый)
Ширина луча результирующей ДН в азимутальной плоскости	6° (режим ближнего действия), 14° (режим дальнего действия)
КУ АР в направлении максимума основного луча	50 дБ
Коэффициент передачи между приемными и передающими каналами	-35 дБ
Диапазон рабочих частот	76 ГГц – 77 ГГц

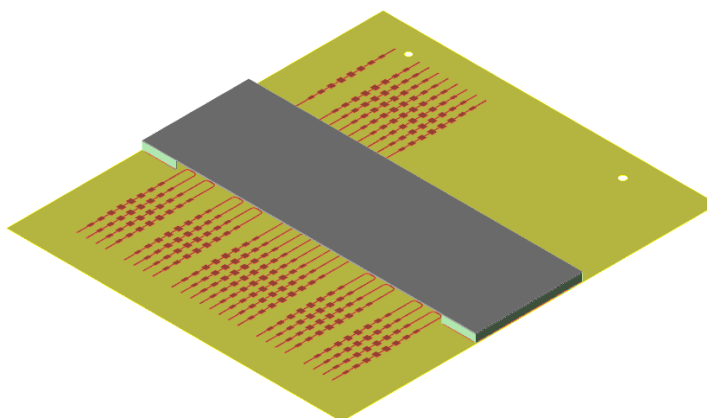


Рис. 5. Топология АР автомобильного радара миллиметрового диапазона

Также представлены результаты экспериментов, проведенных с прототипом автомобильного радара миллиметрового диапазона, построенного в соответствии с рассмотренными особенностями проектирования с соответствующей описанной топологии антенной. Приведены структурные схемы модуля приемо-передающего устройства, схема размещения компонентов на цифровой плате многолучевого радара, а также фото исследуемых устройств.

Приведены результаты, полученные при исследовании максимальной дальности обнаружения разного класса целей радаром, где погрешность не превысила значения 1.5 м. Измерены ДН в режимах дальнего и ближнего действия (Рис. 6), согласно которым отклонение полученных результатов ширины луча ДН и направления максимума ДН от результатов моделирования составляет не более 2° , а УБЛ ДН от результатов моделирования не более 4 дБ.

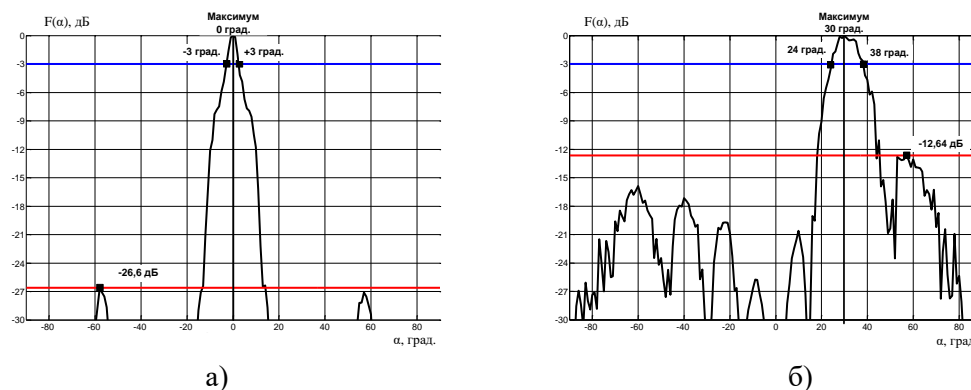


Рис 6. Оценка параметров ДН антенны в горизонтальной плоскости в режиме дальнего (а) и ближнего (б) действия

Продемонстрированы результаты эксперимента по измерению угла обзора по вертикали и горизонтали прототипа многолучевого радара миллиметрового диапазона, АР которого спроектирована в соответствии с описанной топологией, в безэховой камере с использованием аппаратного имитатора целей, согласно которым расхождение полученных значений углов от результатов моделирования составляет порядка 0.6° .

В четвертом разделе в качестве расширения области исследования данной работы рассматриваются особенности построения антенных систем контроля движения на железнодорожном переезде и антенны для радаров малогабаритной авиации. Антенны для отмеченных систем также строятся на базе отрезков микрополосковых линий по последовательной схеме с применением излучателей прямоугольной формы ввиду отмеченных выше преимуществ данного решения.

Высокий уровень разрешающей способности по углу при сохранении однозначности измерения координат целей, определяет основные характеристики систем, осуществляющих контроль на объектах повышенной опасности и на ж/д переездах, в частности. Рассмотрен вопрос выбора частотного диапазона для подобных систем, а также возможные варианты достижения требуемых характеристик обнаружения объектов соответствующей антенной. Как результат, предложена и описана архитектура АР, в которой передающие элементы расположены на максимальном расстоянии друг от друга, а пространство между ними заполнено элементами приемной антенны (Рис. 7). Структурные элементы спроектированы аналогичным образом, что и для АР автомобильного радара с небольшими отличиями, вызванными другим частотным диапазоном и подведением мощности от микросхем, расположенных на обратной стороне платы.

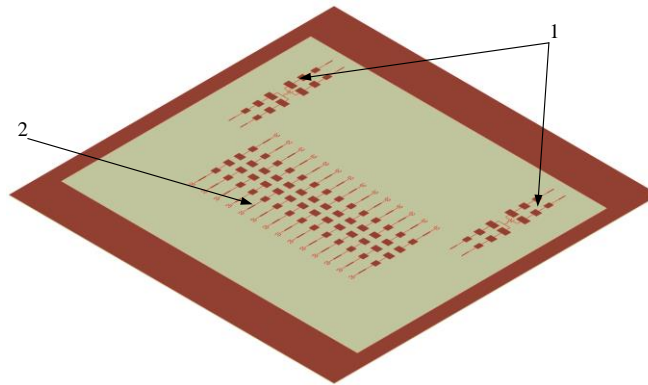


Рис. 7. Топология АР радара контроля ж/д переезда: передающая (1) и приемная антенна (2)

Для максимального перекрытия по направлениям заданного сектора обзора работа передающих элементов в дальней зоне осуществляется в двух режимах: синфазный и противофазный. Ширина нулей и максимумов ДН передатчика, также, как и их количество зависит только от расстояния между передающими элементами активной передающей АР. При этом уровень разрешения по углу определяет именно апертура передающей, сильно разреженной, антенны. Из результатов математического и электродинамического моделирования (Рис. 8) можно сделать вывод об эффективности использования метода разнесенных передатчиков/приемников в ситуациях, когда не предъявляется особых требований по дальности обнаружения объектов. Основные характеристики описанной топологии приведены в таблице 2.

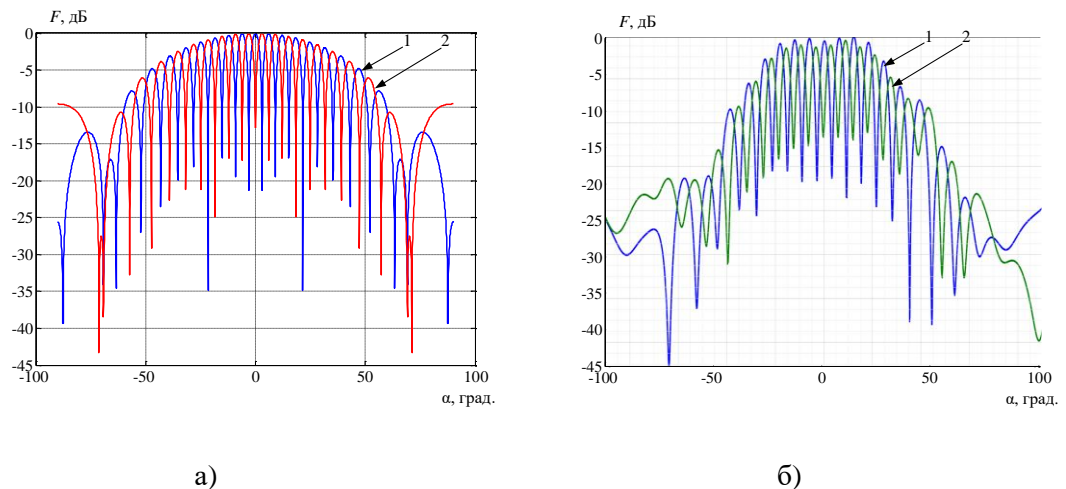


Рис. 8. Результаты расчета двух наборов ортогональных лучей передающей АР при работе в синфазном (1) и противофазном (2) режимах: математический (а), электродинамический (б)

Таблица 2. Основные параметры АР ж/д переезда

Параметр	Значение
Количество элементов в приемной антенне	12 столбцов
Расстояние между фазовыми центрами элементов передающей антенны	9.5λ
Ширина луча результирующей ДН в азимутальной плоскости	4°
КУ АР в направлении максимума основного луча	28 дБ
Коэффициент передачи между приемными и передающими каналами	-40 дБ
Диапазон рабочих частот	24.05 ГГц – 24.25 ГГц

Исследована возможность использования просветного радара совместно с многостатическим на ж/д переезде. С точки зрения определения компромисса между шириной просветной области и величиной ЭПР рассмотрены ситуации с тремя несущими частотами: 915 МГц, 2400 МГц и 5000 МГц. Оценки наложены на схематическое представление пересечения четырёхполосной дороги с двумя путями железной дороги, которая оборудована четырьмя моностатическими радаром 24 ГГц (позиция 1) и двумя просветными (позиция 2 — T_x , позиция 3 — R_c). В каждом из рассмотренных случаев обеспечивается перекрытие всей зоны ответственности (Рис. 9). С учетом двух просветных радаров обеспечивается полное симметричное перекрытие обеих сторон ж/д путей с разницей лишь в ширине просветной зоны. При наличии в системе контроля переезда моностатических радаров выбор сделан в пользу частотных диапазонов 2.4 ГГц и 5 ГГц, в которых выделяются специальные полосы для работы систем ближней радиосвязи. Однако вне зависимости от рабочей частоты сигнал, рассеянный стационарным объектом, практически не может быть обнаружен вблизи линии базы на фоне прямого сигнала.

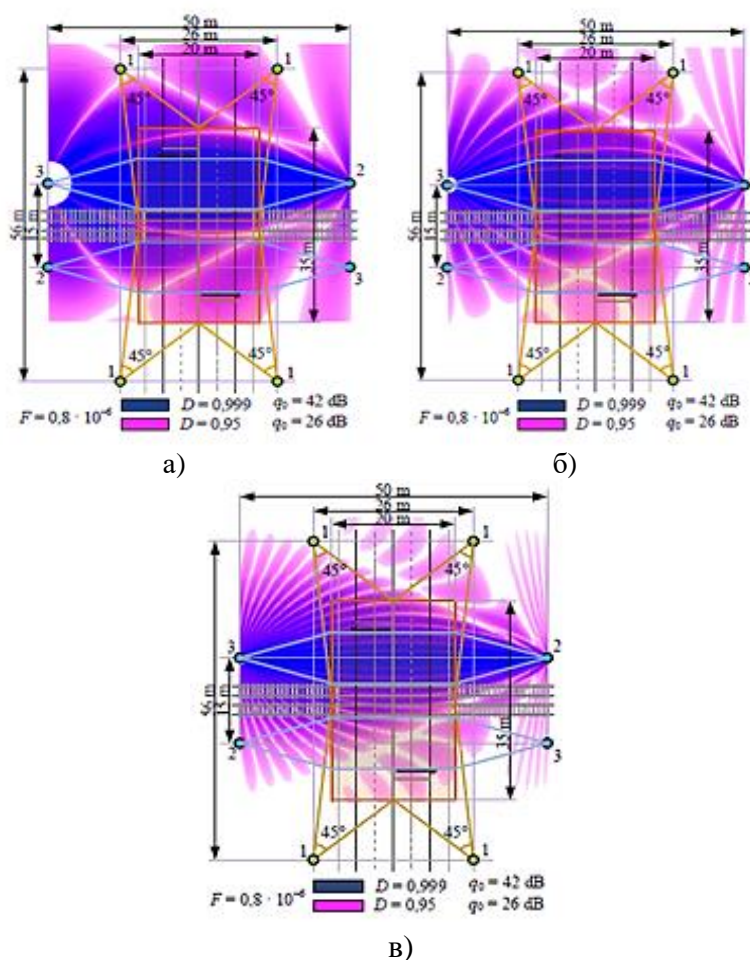


Рис. 9. Зоны обнаружения просветного радара на ж/д переезде: несущая частота 915 МГц (а); несущая частота 2400 МГц (б); несущая частота 5000 МГц (в)

В связи с этим предлагается подход, предусматривающий устранение прямого частотно-модулированного сигнала с передатчика в направлении приемной позиции и передаче его по кабелю. На данной основе спроектирована топология АР просветного радара, позволяющая формировать ноль в направлении линии базы как передающего, так и приемных лучей. Передающий луч и приемные лучи при этом имеют вид, представленный на рис. 10.

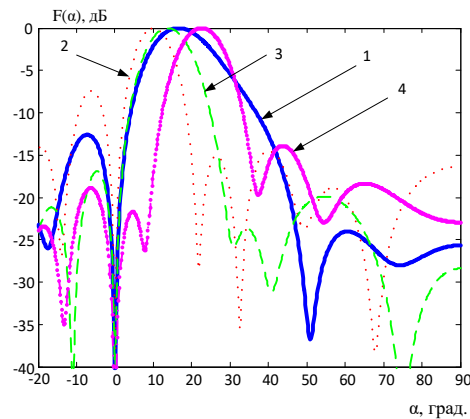


Рис. 10. ДН передающей (кривая 1) и приемной (кривые 2-4) антенн

Далее в данном разделе речь идет о методе реализации антенных систем для радаров малой и беспилотной авиации. Рассматриваются недостатки ранее рассмотренных подходов при построении полетных РЛС, главным образом из-за необходимости обеспечения относительно широкого сектор обзора с высоким угловым разрешением при дальности обнаружения целей порядка 1-2 км. Существующие радары для вертолетной техники не подходят для решения поставленной задачи, поскольку обладают большими масса-габаритными показателями. Достигнуть требуемых характеристик в данном случае возможно за счет разбиения пространства на несколько секторов и поочередного облучения каждого из них. Угловое разрешение может быть обеспечено за счет формирования в заданном секторе набора узких лучей, при этом интерференционные максимумы, возникающие из-за использования подрешеток, как решения задачи по сокращению числа приёмо-передающих каналов, оказываются в области боковых лепестков ДН, облучающей данный сектор в определённый момент времени.

Реализация структуры АР, осуществляющей обнаружение различных объектов при пилотировании дополняется задачей детектирования препятствий под вертолетом при его посадке для предотвращения его возможного повреждения и возникновения угрозы человеку. При этом необходимо обеспечить разрешающую способность в несколько градусов в обеих плоскостях. В связи с изложенными задачами радарная система вертолета строится на базе двух основных модулей: полетного радара и посадочного радара (Рис. 11).

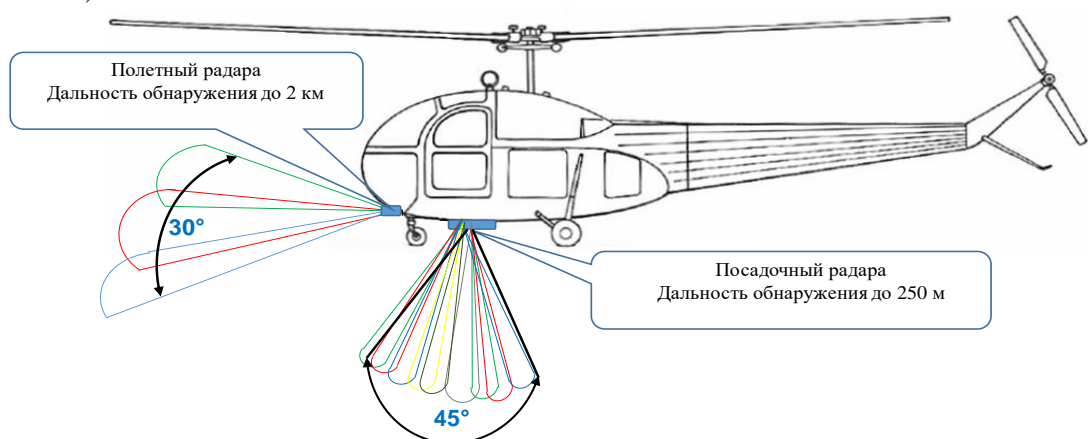


Рис. 11. Общая концепция построения вертолетного радара

Передающая АР полетного радара спроектирована на базе трех подрешеток, максимумы лучей ДН которых имеют направления 0° и $\pm 6^\circ$ и ширину в азимутальной и угломестной плоскостях, определяющих один сектор сканирования за счет архитектуры и топологии микрополосковых линий передачи, соединяющих столбцы внутри подрешетки друг с другом. В приемной антенне, имеющей 16 каналов, подключаемых к подрешеткам, состоящих из 3 излучателей в азимутальной плоскости, с помощью цифрового

диаграммообразования формируется набор узких лучей внутри каждого из отмеченных передающих секторов. Соответствующие параметры антенны полетного радара представлены в таблице 3.

Таблица 3. Основные параметры АР полетного радара

Параметр	Значение
Ширина сектора обзора в азимутальной плоскости	40°
Ширина сектора обзора в угломестной плоскости	20°
Ширина луча результирующей ДН в азимутальной плоскости	2.5°
КУ АР в направлении максимума основного луча	30 дБ
Коэффициент передачи между приемными и передающими каналами	-40 дБ
Диапазон рабочих частот	24.05 ГГц – 24.25 ГГц
Значение излучаемой мощности	10 Вт

Необходимость обнаружения и разрешения целей в обеих плоскостях ведет к построению АР посадочного радара с применением подрешеток и отдельных каналов наравне с азимутальной и в угломестной плоскости. Приемная АР при этом представляет собой структуру, содержащую 8x8 подрешеток аналогичных АР полетного радара, что обеспечивает формирование лучей шириной 2.5 в обеих плоскостях. Передающая антенна проектируется также исходя из условия управления лучом в угломестной плоскости. Параметры АР посадочного радара сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Основные параметры АР посадочного радара

Параметр	Значение
Ширина сектора обзора в обеих ортогональных плоскостях	40°
Ширина луча результирующей ДН в азимутальной плоскости	2.5° - 3°
КУ АР в направлении максимума основного луча	55 дБ
Коэффициент передачи между приемными и передающими каналами	-40 дБ
Диапазон рабочих частот	76 ГГц – 77 ГГц
Значение излучаемой мощности	10 мВт

Пятый раздел посвящен рассмотрению дополнительного способа оценивания характеристик луча ДН АР. Классическая процедура измерения ДН состоит в облучении и перемещении антенны с известными характеристиками излучения вокруг исследуемой антенны в безэховой камере и снятия уровня напряженности электрического поля на приемной стороне в зависимости от направления прихода волны от передатчика [9-11]. Данный процесс в зависимости от требуемой точности измерения ДН может состоять из множества итераций, что ведет к значительным временным затратам. В особенной степени данная проблема актуальна если говорить о серийном производстве радаров. Результаты моделирования и экспериментов показывают, что для оценивания ДН с достаточно высокой для практики точностью достаточно измерить амплитудно-фазовое распределение в каналах приемной решетки для направлений, соответствующих центрам формируемых приемных лучей, а форму ДН определить через вычисление преобразования Фурье от измеренного распределения.

ДН передающей антенны, имеющей плоскую апертуру, на которой формируется АФР электрического (или магнитного) поля, может быть рассчитана как двумерное преобразование Фурье из данного АФР:

$$F(\alpha, \beta) = \iint_A \bar{E}_A(x, y) \exp[j2\pi x \sin(\alpha)/\lambda] \exp[j2\pi y \sin(\beta)/\lambda] dx dy \quad (1)$$

где $\bar{E}_A(x, y)$ - АФР по апертуре антенны в плоскости A , α и β – углы, отложенные относительно нормали к апертуре антенны в двух взаимно ортогональных плоскостях, λ – длина волны.

Если источник сигнала разместить в точке, расположенной под заданным углом к нормали антенной решетки, фазовые сдвиги, возникающие в апертуре приемной антенны, обеспечат формирование наведенной пространственной гармоника. Тогда угловое положение источника сигнала соответствует направлению одного из лучей ДН. При этом дискретные значения этой пространственной гармоника, соответствующие точкам расположения элементов антенны, равны комплексно-сопряженным значениям весовых коэффициентов, используемых для формирования этого луча:

$$\bar{E}(k\Delta x) = \bar{W}_k^{*(i)} \quad (2)$$

Таким образом, получив оценку распределения поля по каналам АР и вычислив преобразование Фурье этой оценки, можно найти оценку луча ДН приемной антенны с точностью до множителя, равного ДН одного элемента:

$$\hat{F}(\alpha, \beta) = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \bar{E}(k\Delta x, l\Delta y) \exp(j2\pi k d_x \sin(\alpha)/\lambda) \exp(j2\pi l d_y \sin(\beta)/\lambda) \quad (3)$$

В ходе экспериментальных исследований АР в диапазоне частот 76-77 ГГц, ДН, полученная предложенным методом, с незначительным расхождением (до 4 дБ в области боковых лепестков) повторяет характеристики и форму ДН, найденной классическим способом (Рис. 12).

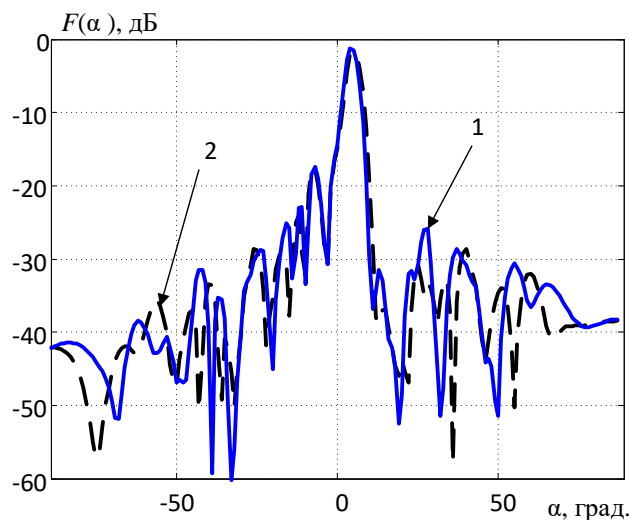


Рис. 12. Результаты экспериментальных измерений АР при получении ДН классическим (1) и согласно предложенной методике (2)

В заключении сформулированы основные результаты представленной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Произведен выбор типа и конструкции антенн для радаров интеллектуальных транспортных средств, контроля движения на ж/д переезде, а также полетного и посадочного радаров малой авиации.
2. Рассмотрен метод расчета структурного элемента АР, позволяющий получить результаты сравнимые с классическим подходом проектирования в части согласования с источником и основных характеристик ДН, но при этом обеспечить

- уровень КПД столбца антенны порядка 80-90% по результатам электродинамического моделирования в САПР.
3. Разработана топология АР на базе отрезков микрополосковой линии передачи для автомобильного радара миллиметрового диапазона, которая позволяет реализовать два режима работы, дальность обнаружения целей класса «автомобиль» до 180 м в секторе $\pm 6^\circ$, и до 70 м в секторе углов $\pm 45^\circ$. Широкий сектор обзора и однозначность определения угловых координат целей в режиме ближнего действия обеспечивается за счет эквидистантной приемной АР, каждый столбец которой соединен со своим каналом микросхемы, и структуры передающей антенны, состоящей из одного столбца. В режиме дальнего действия возникающие в приемной ДН интерференционные максимумы подавляются лучами ДН передающей антенны.
 4. Представлена архитектура АР радара интеллектуальной системы безопасности железнодорожного переезда, обеспечивающая обнаружение объектов в секторе $\pm 45^\circ$ с разрешением по углу порядка 5° за счет размещения передающих антенн на краях СВЧ платы и заполнением пространства между ними элементами приемника. Перекрытие всей зоны обзора осуществляется формированием двух наборов передающих лучей, а достижение однозначного обнаружения обеспечивается лучами приемной антенны.
 5. Рассмотрен подход, позволяющий обеспечить обнаружение движущихся и стационарных объектов вблизи линии базы радаром прямого рассеяния за счет построения соответствующей АР, обеспечивающей формирование нулей ДН в направлении линии базы.
 6. Исследован вариант применения секторного сканирования при проектировании радара для малой авиации и БПЛА. Разбиение на несколько секторов пространства перед и под ЛА позволяет обеспечить область обзора $\pm 20^\circ$ в двух ортогональных плоскостях, а также в значительной степени подавить интерференционные максимумы ДН приемника, узкие лучи которой формируются внутри каждого сектора, определяя уровень углового разрешения порядка 3° в горизонтальной плоскости. На основе проведенных исследований разработаны топологии передающих и приемных АР полетного и посадочного радаров.
 7. Произведен сравнительный анализ параметров луча ДН АР, полученных классическим методом измерения и подходом, базирующимся на нахождении АФР по элементам приемной антенны и вычислении от него преобразования Фурье. Показано, что между основными параметрами луча ДН, полученных классическим методом и предложенным способом, разница составляет порядка 4 дБ в области боковых лепестков.
 8. На основе предложенных решений и рассмотренных методов построения АР изготовлены прототипы многолучевого и однолучевого автомобильных радаров, результаты экспериментальных исследований АР которых показывают незначительные отклонения от данных, полученных при моделировании разработанных топологий антенн в части: угла обзора в обеих плоскостях (около 0.6°), дальности обнаружения целей (не более 0.8 м), ширины и направление максимума луча (около 2°) и уровня боковых лепестков ДН (порядка 2 дБ).

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Мякинков, А.В. Метод пространственно-временного кодирования сигналов в антенной решетке миллиметрового радара / А.В. Мякинков, Р.С. Фадеев, А.А. Кузин, С.Е. Кузнецов, С.А. Шабалин // Антенны. – 2023. - № 2 (282). - С. 22-31.
2. Кузин, А.А. Особенности конструкции антенных решеток автомобильных радаров, построенных на основе передающих и приемных многоэлементных модулей / А.А. Кузин,

- А.В. Мякинков, **С.А. Шабалин** // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2021. Т. 24. - №3. – С. 39-48.
3. Кузин, А.А. Способ пространственной обработки для радара системы контроля железнодорожного переезда / А.А. Кузин, А.В. Мякинков, К.С. Фомина, **С.А. Шабалин** // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2022. Т. 25. - №5. – С. 42-55.
 4. Ryndyk, A.G. Railway safety radar system with use of FSR / A.G. Ryndyk, A.V. Myakinkov, D.M. Balashova, V.N. Burov, **S.A. Shabalin**, A.D. Mikhailov // Proceedings International Radar Symposium. - Berlin, Germany, 2021.
 5. Kuzin, A.A. The Technique of Measurement of the Pattern of Receive Phased Antenna Array for Automotive Radar / A.A. Kuzin, S.E. Kuznetsov, A.V. Myakinkov, R.S. Fadeev, K.S. Fomina, **S.A. Shabalin** // Proceedings International Radar Symposium. - Berlin, Germany, 2021.
 6. Myakinkov, A.V. The distributed radar system for monitoring the surrounding situation for the intelligent vehicle / A.V. Myakinkov, S.B. Sidorov, S.V. Shishanov, **С.А. Шабалин** // Proceedings International Radar Symposium. - Bonn, Germany, 2018. – P. 1-8.
 7. **Shabalin, S.A.** Phased array antenna of millimeter range for automotive radar / S.A. Shabalin, A.V. Myakinkov, A.A. Kuzin // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – Saint-Petersburg: ETU «LETI», 2019 – P. 146-150.
 8. **Shabalin, S.A.** Millimeter-wave phased antenna array for automotive radar / S.A. Shabalin, A.V. Myakinkov, A.A. Kuzin, A.G. Ryndyk // Proceedings International Radar Symposium. – Ulm, Germany, 2019.
 9. Burov, V.N. Development of the Automotive Radar for the Systems of Adaptive Cruise Control and Automatic Emergency Breaking / V.N. Burov, A.A. Kuzin, A.V. Myakinkov, A.D. Pluzhnikov, A.G. Ryndyk, R.S. Fadeev, **S.A. Shabalin**, P.S. Rogov // 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication. - Moscow: Moscow Institute of Physics and Technology, 2019.
 10. **Shabalin, S.A.** Phased Antenna Array of Radar for Small Sized Civil Helicopters / S.A. Shabalin, A.V. Myakinkov, A.A. Kuzin, A.G. Ryndyk, R.S. Fadeev // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering – Saint-Petersburg: ETU «LETI», 2020 – P. 168-172.
 11. Beresnev, P.O. Radar subsystems of autonomous mobile robotic systems for studying tsunami in the coastal zone / P.O. Beresnev, A.A. Kurkin, A.A. Kuzin, A.V. Myakinkov, E.N. Pelinovsky, A.G. Ryndyk, **S.A. Shabalin** // Science of Tsunami Hazards. – 2020. V. 39. - №3. – P. 137-155.
 12. **Шабалин, С.А.** Автомобильный радар на основе фазированной антенной решетки миллиметрового диапазона/ С.А. Шабалин // Сборник трудов науч.-тех. конф. «Информационные системы и технологии» – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. – С. 207-213.
 13. Кузин, А.А. Моделирование и сравнительный анализ методов построения фазированной антенной решетки миллиметрового диапазона для автомобильного радара / А.А. Кузин, А.В. Мякинков, **С.А. Шабалин** // Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет, 2018. - С. 75-83.
 14. **Шабалин, С.А.** Анализ способов запитывания элементов микрополосковых фазированных антенных решеток для автомобильного радара / С.А. Шабалин, А.А. Кузин // Сборник трудов XVI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов-2018». – Миасс, 2018. - С. 76-77.
 15. Мякинков, А.В. Применение просветного радара в системе безопасности железнодорожных переездов / А.В. Мякинков, А.Д. Михайлов, К.С. Фомина, **С.А. Шабалин** // Сборник трудов конференции ИСТ. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 1063-1068.

16. Береснев, П.О. Радарные подсистемы автономных роботехнических комплексов для обследования и регистрации следов цунами / П.О. Береснев, А.А. Кузин, А.А. Куркин, А.В. Мякинков, Е.Н. Пелиновский, А.Г. Рындык, С.А. Шабалин // Экологические системы и приборы. – 2020. - №11. – С. 12-19.
17. Свидетельство 2019665879 Российская федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программный имитатор первичных измерений для автомобильного радара / Балашова Д.М., Буров В.Н., Кузин А.А., Мякинков А.В., Фадеев Р.С., Шабалин С.А.; заявл. 12.11.2019; опубл. 02.12.2019, Реестр программ для ЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marsden, G. Assessment of the Stop and Go function using real driving behaviour / G. Marsden, M. Brackstone, M. McDonald // 2001 ADAS. International Conference on Advanced Driver Assistance Systems. – 2001. - №. 483.
2. Caleefato, C. Advanced drivers assistant systems in automation / C. Caleefato, R. Montanari, F. Tango // Proceedings of the 12th International Conference on Human-Computer Interaction, HCI International. -2007. - P. 768-777.
3. Piao, J. Advanced driver assistance systems from autonomous to cooperative approach / J. Piao, M. McDonald // Transport Reviews. -2008. - V. 28. - № 5. - P. 659-684.
4. Misener, J. Cooperative collision warning: Enabling crash avoidance with wireless technology / J. Misener, R. Sengupta, H. Krishnan // Intelligent Transportation Society of America - 12th World Congress on Intelligent Transport Systems. - 2005. - V. 8. – P. 4874-4884.
5. Ryndyk, A.G. Railway safety radar system with use of FSR / A.G. Ryndyk, A.V. Myakinkov, D.M. Balashova, V.N. Burov, S.A. Shabalin, A.D. Mikhailov // Proceedings International Radar Symposium. – 2021.
6. Документация радара «АР24МАР». [Электронный ресурс] – URL: https://device.milandr.ru/products/ustroystva-dlya-sistem-pomoshchi-voditelyu-adas-bespilotnykh-sistem/radar-ar24-mar/?sphrase_id=257251 (дата обращения 05.02.2022).
7. Гринев, А.Ю. Улучшение поляризационных характеристик микрополосковых фазированных антенных решеток с линейной поляризацией / А.Ю. Гринев, Е.В. Ильин, Д.А. Евсеев // Антенны. - 2017. - №10 (242). - С. 3-10.
8. Синани, А.И. Результаты исследований и разработки излучающих систем антенных решеток / А.И. Синани, А.Ю. Гринев, Г.Ф. Мосейчук, Д.В. Багно, А.Е. Зайкин, Е.В. Ильин // Антенны. – 2021. - № 5 (273). - С. 52-64.
9. Гиголо, А.И. Новый метод калибровки фазированной антенной решетки на основе данных измерений поля в ближней зоне / А.И. Гиголо, Г.Ю. Кузнецов, В.С. Темченко // Антенны. - 2022. - №4 (278). - С. 33-45.
10. Гринев, А.Ю. Теоретическое и экспериментальное исследование двухдиапазонной антенной решетки / А.Ю. Гринев, А.А. Измайлов. Радиотехника и электроника. - 2021. - Т. 66. - №12. - С. 1155-1164.
11. Багно, Д.В. Измерение характеристик сверхширокополосных антенн радара подповерхностного зондирования во временной области / Д.В. Багно, А.Ю. Гринев, В.С. Темченко // Антенны. - 2011. - №3 (166). - С. 06-14.