

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Белова Юрия Ивановича на диссертационную работу

Шабалина Семена Андреевича:

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

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Актуальность темы диссертационного исследования

Антенны, как известно, являются важной составной частью многих радиотехнических систем. Выбор их типа определяется, в первую очередь, диапазоном рабочих частот системы, габаритами и местом размещения антенн, а также задачами, которые предназначены решать радиотехническая система (РТС). В диссертации С.А. Шабалина представлены результаты его исследований, ориентированных, прежде всего, на решение следующих актуальных, перспективных и активно исследуемых научно-технических проблем.

- Создание систем интеллектуальной помощи водителю, размещающихся на автомобиле.
- Создание и внедрение радаров в инфраструктуре железнодорожных (ж/д) переездов, которые предупреждают прохождение посторонних объектов через переезд при приближении поезда.
- Решение задач управления и обеспечения безопасности движения, особенно в условиях ограниченной видимости, для малой авиации с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

При этом возможность достижения заданной вероятности обнаружения, рабочей дальности и разрешающей способности по углам систем координат для различного класса объектов вышеупомянутыми РТС во многом зависит от технологии изготовления антенн, входящих в их состав, способов размещения антенн на технологических блоках РТС и типов приемо-передающих модулей РТС.

Из-за предъявления строгих требований к параметрам формируемых диаграмм направленности (ДН) антенн, а также к их массогабаритным показателям, для реализации компактности систем в настоящей работе рассматриваются варианты построения архитектур антенн радаров, создаваемых для отмеченных направлений, в виде антенных решеток (АР), которые работают в диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн.

Анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, 5-и разделов и заключения.

Во введении обсуждается актуальность и решаемые задачи работы, текущее состояние рассматриваемых научных направлений, методы исследования, практическая ценность и научная новизна работы, а также обозначены конкретное внедрение

результатов исследования, апробация работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе рассматриваются основные типы антенн, используемых в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн, и вопросы определения способов построения антенной системы для РЛС интеллектуальных транспортных средств. В разделе подробно описан разработанный в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е.Алексеева (НГТУ) совместно с индустриальным партнером АО «ПКК Миландр» автомобильный радар MAPC – 2A1/10, работающий в сантиметровом диапазоне волн, с оригинальной конструкцией антенны.

Во второй разделе диссертации описывается методика построения структурных элементов АР на базе отрезков микрополосковой линии передачи. Рассматривается процесс проектирования микрополоскового печатного излучателя (патч-антенны), в частности, особенности, связанные с расчетом размеров элемента излучения, способы подведения мощности от приемо-передающего модуля к конкретному излучателю антенны и объединения патчей в единую структуру столбца АР. Рассмотрены подробно два подхода к определению области антенны, к которой может подводиться мощность от микросхем РТС. Для обеспечения синфазного возбуждения всех входящих в столбец АР элементов с заданным амплитудным распределением, для достижения требуемых характеристик ДН антенны в заданной плоскости рассмотрен процесс проектирования с учетом требований к уровню КПД. Излагаются результаты математического и электродинамического моделирования процессов.

Третий раздел посвящен вопросам исследования процедуры разработки АР автомобильного радара. Рассмотрены пути решения проблемы, связанной с минимизацией структуры микросхем, составляющих радар при сохранении размеров его апертуры, обеспечивающих заданную дальность обнаружения целей и их угловое разрешение. Критикуются ММО (Multi Input Multi Output) технологии при построении их антенных систем для автомобильных радаров с позиций появления дополнительных спектральных пиков по размерности частоты Доплера, в случае использования кодов Уолша, или кодов Фурье, а также значительное увеличение уровня боковых лепестков, в той же размерности при использовании псевдослучайных последовательностей.

Показано, что оптимальным 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 коэффициент усиления (КУ) и разрешающую способность антенн 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 получении результирующей ДН.

Представлены результаты вычислений отношения сигнал-шум на входе приемного устройства от размера его антенны относительно общей апертуры радара и ширины луча результирующей ДН радара в зависимости от соотношения ширины апертуры антенны передатчика и общей апертуры. Согласно приведенным в диссертации исследованиям, максимальная дальность радара с такой структуры антенн, при сохранении ее общей геометрической площади, будет иметь место в том случае, когда общая апертура антенны делится поровну между передающей и приемной антеннами. В тоже время наименьшая ширина луча ДН, и как следствие лучшее угловое разрешение радара, достигается при минимальном отношении апертуры, например, приемной антенны к размеру всей АР. Это

противоречие разрешается за счет размещения либо передающих, либо приемных антенн-столбцов на краях апертурного пространства антенны радара при заполнении пространства между оставшимися элементами антенных решеток.

Исследованиями диссертации выявлено, что, когда конструктивными элементами антенны являются одиночные столбцы, использование копланарных линий в топологии линий передачи практически решает проблему потерь, связанных с их паразитным излучением, а следовательно, искажений ДН. Однако, наличие **большого** числа делителей при проектировании копланарной линии передачи значительно усложняет процесс согласования элементов решетки с приемопередающей микросхемой. Кроме того, сами делители мощности, также как и микрополосковые линии, формируют паразитное излучение. В сравнении с ДН одиночного столбца имеет место искажение основного лепестка и значительное увеличение УБЛ, что вызвано паразитным излучением делителей мощности и микрополосковых линий передачи.

В разделе подробно описана конструкция, процесс проектирования и его особенности для однолучевого радара, который рассматривается, главным образом, как радар ближнего действия. К основным его функциям относятся контроль слепых зон, помощь при смене полосы движения, помощь при парковке. В связи с этим, однолучевой радар должен осуществлять обнаружение объектов в широком секторе. Кроме того, важным условием корректной работы радара является обеспечение однозначного обнаружения и измерения координат целей.

На основе предложенных решений и описанных методик, в диссертации представлены результаты экспериментов, проведенных с прототипом автомобильного радара миллиметрового диапазона. Продемонстрированы результаты эксперимента по измерению угла обзора по вертикали и горизонтали многолучевого радара миллиметрового диапазона в безэховой камере с использованием аппаратного имитатора целей. Также приведены результаты, полученные при исследовании максимальной дальности обнаружения разного класса целей радаром и измеренные распределения направленности излучателей в режимах дальнего и ближнего действия.

В четвертом разделе диссертации рассматриваются особенности построения антенных систем контроля движения на железнодорожном (ж/д) переезде и антенны для радаров малогабаритной авиации. Прототипы антенн для них предлагается строить также на базе отрезков микрополосковых линий по последовательной схеме с применением излучателей прямоугольной формы, ввиду отмеченных в предыдущих разделах диссертации, их достоинств. В модели АР ж/д радара передающие элементы расположены на максимальном расстоянии друг от друга, а пространство между ними заполнено элементами приемной антенны. В такой антенной системе формируется набор узких передающих лучей. Эффективность использования метода разнесенных передатчиков/приемников удовлетворительна для ситуаций, когда не предъявляется особых требований по дальности обнаружения объектов.

При построении ДН антенн контроля движения на ж/д переезде суммирование сигналов по каналам приемника предложено производить в цифровом виде в блоке пространственной обработки. Разделение приемной АР на две равных части необходимо для формирования корреляции формы боковых лепестков в основном и компенсационном каналах для компенсации боковых лепестков с использованием разности амплитуд основного и компенсационного луча. Такой подход приводит к расширению основного луча приемной ДН по сравнению с шириной луча для всей апертуры, но вместе с

компенсацией УБЛ происходит сужение основного лепестка приблизительно в два раза. Применение алгоритма компенсации позволяет использовать преимущества вычитания УБЛ при сохранении ширины основного луча приемной ДН.

В четвертом разделе также исследована возможность использования просветного радара **совместно** с отражательным радаром для повышения уровня безопасности движения на ж/д переезде. Как известно, просветный радар реализует обнаружение так называемого теневого поля, которое формируется на приемной стороне радара за счет возмущения падающего электромагнитного поля тенью силуэтом цели и не зависит ни от коэффициента отражения материала, ни от формы облучаемого объекта. Когда на железнодорожном переезде отсутствуют объекты, которые должны быть обнаруживаться РЛС, выполняется процедура калибровки «фоновый» сигнала. Усредненный «фоновый» сигнал затем используется в качестве порогового сигнала при реализации процедуры обнаружения объектов, расположенных в зоне ответственности радара. Совместное использование отражательного и просветного радара в значительной степени улучшает характеристики обнаружения целей на ж/д переезде. Разрешение и определение координат объектов в широком секторе обзора обеспечивается за счет размещения элементов АР на максимальном расстоянии друг от друга и формирования набора узких лучей в ДН.

В четвертом разделе диссертации описывается также метод реализации антенных систем для радаров малой и беспилотной авиации. Рассматриваются недостатки ранее рассмотренных подходов при построении полетных (используемых в процессе полета) РЛС, возникающих, главным образом, из-за необходимости обеспечения относительно широкого сектора обзора с высоким угловым разрешением при дальности обнаружения целей порядка 1-2 км. Достигнуть необходимых характеристик полетных РЛС можно за счет разбиения пространства контроля на несколько секторов и поочередного излучения в каждом из них. Угловое разрешение будет обеспечено за счет формирования в заданном секторе набора узких лучей. При этом интерференционные максимумы, возникающие из-за использования подрешеток, как способа решения задачи по сокращению числа приёмопередающих каналов, оказываются в области боковых лепестков ДН, облучающей данный сектор в определённый момент времени.

В разделе 4 описана общая концепция построения посадочного радара, аналогичная, как и для полетного радара. Основное их отличие связано с использованием двумерного сектора обзора, симметричного относительно поперечной и продольной осей летательного аппарата (например, вертолета). Данное решение обусловлено требованием эффективно разрешать близко стоящие объекты на земле как в азимутальной, так и в угломестной плоскостях. Подход, связанный с достижением высокого уровня углового разрешения при обеспечении однозначности измерения координат целей за счет разбиения пространства на сектора и поочередному их облучению, аналогичен способу, описанному в диссертации для полетного радара.

В пятом разделе описан способ оценки характеристик направленности отдельных лучей антенных решеток радаров интеллектуальных транспортных средств, основанный на вычислении преобразования Фурье от сигналов, регистрируемых в приемном канале избранного элемента АР. Автор ставит задачу получения экспериментальной оценки ДН приемной антенны с точностью до множителя, равного ДН одного элемента. Кроме того при анализе считается, что микрополосковые линии, питающие элементы антенны, согласованы с входным сопротивлением каждого элемента. Таким образом, коэффициенты отражения в тракте АР близки к нулю и ими пренебрегается. Рассеянием

антенных элементов также пренебрегается, хотя прямых указаний на это в тексте диссертации нет.

В заключении диссертации еще раз сформулированы основные результаты, полученные в ходе её выполнения.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации.

Автореферат адекватно и полно отражает содержание диссертации.

Обоснованность и достоверность полученных результатов в диссертации подтверждается:

- результатами математического и электродинамического моделирования в САПР ADS;
- согласованием с данными, приведенными в научной литературе;
- результатами натурных испытаний макетов и опытных образцов радаров миллиметрового диапазона в безэховой камере с помощью метрологически поверенной аппаратуры.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации.

В диссертационной работе С.А. Шабалина получены следующие новые научные результаты.

1. Предложен способ построения антенной решетки, который при ограниченном количестве радарных приемных и передающих каналов обеспечивает заданное сочетание дальности обнаружения объектов и рэлеевского разрешения по угловой координате и, в отличие от известных способов, не ведет к возникновению энергетических потерь, связанных с разреженным характером решетки.
2. Разработана архитектура антенной решетки для радара контроля движения на ж/д переезде, обеспечивающая высокую его функциональную надежность, то есть возможность обзора широкого заданного сектора углов (свыше девяноста градусов) с высокой разрешающей способностью (в несколько градусов), которая, в отличие от известных алгоритмических решений, основана на двухэтапном формировании гребенки интерференционных лучей диаграммы направленности (ДН) передающей антенны с помощью переключения фаз сигналов в передающих каналах и последующей пространственной селекции пространства контроля лучами приемной решетки с цифровым управлением формой ее диаграммы.
3. Показана возможность применения достоинств эффекта просветной радиолокации с целью повышения надежности работы радиолокационных комплексов, разрабатываемых для контроля препятствий на ж/д переездах, и предложен способ обнаружения стационарных целей в окрестности линии базы такой радиолокационной системы, что достигается за счет специально спроектированных антенн, обеспечивающих формирование нулей ДН вдоль линии базы.
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, состоящую из подрешеток, при заданном числе каналов.

5. Предложен способ оценки характеристик направленности отдельных лучей антенных решеток радаров интеллектуальных транспортных средств, основанный на вычислении преобразования Фурье от сигналов, регистрируемых в приемном канале избранного элемента АР и связанных с наведенным амплитудно-фазовым распределением поля в апертуре антенной решетки при приеме сигнала лишь с одного направления.

Диссертация не свободна от недостатков. Главным недостатком, на наш взгляд, является характер изложения материала. Он ближе по стилю к производственным отчетам по выполненным работам автором диссертации и его коллегами по созданию антенн радаров систем интеллектуальной помощи водителю, размещающихся на автомобиле, и других радаров. В частности, когда оцениваются экспериментальные погрешности предложенного автором способа, в диссертации приведен текст: «Результаты испытаний соответствуют предъявляемым к АР радара характеристикам. Представленная ДН имеет ширину луча около 5 град. за счет ДН передающей антенны, и уровень первого бокового лепестка минус 18 дБ при реализации вектора весовых коэффициентов с равномерным распределением амплитуд».

Таких примеров в тексте диссертации предостаточно и приводить их не входит в нашу задачу. Особенно их много в разделе 5 диссертации, в котором излагается проблема решения наиболее трудной задачи измерений характеристик антенных решеток с небольшим количеством элементов. Как ни странно, в списке литературы к диссертации мы не обнаружили «классических» (любимое слово автора) книг на тему измерений, например: «Сканирующие антенные системы СВЧ», 1968 г., Н.Амитей, В. Галиндо, Ч. Ву. «Теория и анализ фазированных антенных решеток», 1974 г., «Методы измерения характеристик антенн СВЧ», 1985 г. В этих монографиях подчеркивается сложность задач, которые стояли перед автором диссертации и, возможно, использование результатов перечисленных авторов способствовало бы более быстрому и оптимальному решению некоторых проблем диссертации. В частности, в книге Н.Амитей, В. Галиндо, Ч. Ву. «Теория и анализ фазированных антенных решеток», 1974 г. рассмотрено влияние диаграммы направленности отдельного элемента решетки, но в приближении бесконечности ее размеров, то есть в пренебрежении краевыми эффектами распределения на апертуре. В работе «Методы измерения характеристик антенн СВЧ», 1985 г. рассмотрены методы определения диаграммы направленности элемента решетки и коэффициента отражения от ее раскрытия. Мы даже не упоминаем современные публикации о влиянии рассеяния антенн на результаты измерения их характеристик. Их достаточно много.

В этом же разделе на с. 168 соседствуют противоречивые утверждения автора. Цитируем.

Первое. «Из последнего рисунка видно, что для соседних каналов АР коэффициент взаимного влияния максимален и составляет порядка 0,4, что соответствует развязке - 8 дБ. Дальние элементы практически не оказывают влияние на рассматриваемый столбец и их воздействием, как правило, пренебрегают».

И далее, там же, второе:

«Из-за возникновения эффекта взаимного влияния ДН отдельных каналов искажаются, что продемонстрировано на рисунке 5.3. Кривая 1 соответствует теоретической ДН одного столбца антенны, кривые 2-5 - ДН разных столбцов той же антенны с учетом взаимного влияния. На рисунке 5.4 показаны аналогичные графики, полученные при электродинамическом моделировании антенны в среде ADS. Видно,

что в данном случае искажения для упрощенной модели и более точной электродинамической имеют **общий** характер. Взаимное влияние элементов при формировании результирующей ДН АР приводит к уменьшению коэффициента усиления в направлении главного лепестка и увеличению относительного УБЛ».

В целом, невзирая на отмеченные недостатки диссертационной работы, она содержит материал большой и очень полезной работы автора в области разработки антенных решеток современных радаров. Отмеченные нами недостатки не снижают хорошее впечатление от диссертации. Она гармонично скомпонована. Вопросы актуальности, обоснованность выводов диссертации освещены должным образом. Научно-техническая новизна представленных на защиту результатов доказательна.

По моему мнению, диссертационная работа Шабалина С.А. удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Шабалин Семен Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Ведущий научный сотрудник научно-исследовательского радиофизического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского),

Кандидат физико-математических наук, с.н.с., Белов Юрий Иванович.

(подпись, дата)

Нижний Новгород, 603950, ул. Большая Печерская 25/12а,

тел.сл. +78314367294, эл. почта: belov@nirfi.unn.ru

Подпись Белова Юрия Ивановича заверяю:



Заведующий секретарь Вирту