

На правах рукописи

Андреев Роман Николаевич



**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОПРОФИЛЬНЫХ
ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ УВЧ-
ДИАПАЗОНА И АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК НА ИХ
ОСНОВЕ**

Специальности: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения»;
05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства
и их технология»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2006

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем
Воронежского института МВД Российской Федерации

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Нечаев Юрий Борисович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пастернак Юрий Геннадьевич
кандидат физико-математических наук, доцент
Дудкин Валерий Петрович

Ведущая организация: ОАО Воронежский научно-исследовательский
институт «Вега»

Защита состоится «18» июля 2006 года в 13 часов на заседании
диссертационного совета К 203.004.01 при Воронежском институте МВД России
по адресу: 394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, ауд. 329.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского
института МВД России.

Автореферат разослан «16» июня 2006 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Шерстюков С.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Необходимость в оперативном обмене информацией привела к быстрому развитию систем радиосвязи с подвижными объектами как специального, так и общего назначения. В настоящее время имеются совершенные с точки зрения характеристик информационного обмена комплексы и системы цифровой радиосвязи. Однако в качестве антенн радиостанций подвижных объектов, как правило, используются конструктивные разновидности несимметричного вибратора. Одиночный несимметричный вибратор ограничивает возможность эффективного решения проблем радиосвязи с подвижными объектами, которые обусловлены особенностями распространения радиоволн.

Совершенствование антенных систем происходит по двум направлениям: улучшаются параметры собственно антенн и применяются методы обработки сигналов. Ряд отмеченных проблем удастся решить с использованием для подвижного объекта антенной решетки с системой обработки сигналов от ее элементов, позволяющей адаптироваться к постоянно изменяющейся радиообстановке по критериям качества принимаемого сигнала.

Актуальной задачей для мобильных систем связи является разработка малогабаритных излучателей и конформных антенных решеток на их основе, обладающих повышенной помехозащищенностью, тактико-технической надежностью, управляемой диаграммой направленности с возможностью пространственно-поляризационной селекции полезных сигналов на фоне помех.

Проблема разработки адаптивных антенных решеток для подвижных систем связана с рядом теоретических и практических задач, требующих решения.

В качестве первой задачи можно выделить разработку методов и математических моделей для электродинамического описания малогабаритных излучающих структур, в частности, полосковых, микрополосковых, щелевых и резонаторных. Одна из первых монографий, посвященных микрополосковым антеннам, в отечественной литературе - работа Панченко Б.А. и Нефедова Е.И. «Микрополосковые антенны». Большой вклад в развитие теории и техники антенн и антенных решеток, в частности, полосковых, внесли чл.-корр. РАН Бахрах Л.Д., проф. Чаплин А.Ф., проф. Сазонов Д.М., проф. Панченко Б.А., проф. Нефедов Е.И. и др. В настоящее время область применения полосковых излучающих структур заметно расширилась, вместе с тем используется все больше разновидностей практических конструкций малогабаритных антенн. Использование многоэлементных излучателей и более совершенные способы их возбуждения частично сняли ограничение на узкополосность этого класса антенн. Применение многослойных подложек, способов пространственно-временной обработки на основе устройств на объемных интегральных схемах и современных диэлектрических материалов повышает эффективность использования в антенных системах полосковых структур. Серьезная проблема при анализе микрополосковых структур - учет конечных размеров подложки.

Второй задачей является повышение эффективности радиоканала для систем подвижной связи за счет разработок антенных решеток (АР), фазированных антенных решеток (ФАР) и адаптивных ФАР, размещаемых на

подвижных объектах. Это накладывает жесткие ограничения на массогабаритные характеристики отдельных излучающих структур и антенные решетки в целом. Условие скрытности антенно-фидерной системы еще более осложняет задачу ее построения.

Требования, предъявляемые к радиoliniям систем корпоративной, ведомственной и сотовой связи, в первую очередь, относятся к повышению энергетики каналов связи. При этом повышение мощности передающих устройств малопримлемо по энергетическим соображениям и требованиям электромагнитной совместимости. Второй путь повышения энергетики каналов связи – повышение коэффициента направленного действия антенных устройств путем формирования требуемой диаграммы направленности (ДН). Для этого необходимо формировать узкую (20° и менее) ДН в вертикальной плоскости, т.е. применять фазированные антенные решетки и на базовых станциях.

Разработка ФАР, а тем более АФАР, чрезвычайно сложная технически задача, требующая создания кроме высокоэффективных малогабаритных антенных систем, ряда сложных радиотехнических устройств, в частности, блока обработки сигналов и оценки направления прихода сигнала с максимальным отношением сигнал/шум, блока управления системы фазирования, диаграммообразующей схемы, многоканального приемника и т.д. Самостоятельной задачей здесь является разработка алгоритма управления адаптивной антенной решеткой в условиях многолучевого распространения радиоволн. В зависимости от технических требований к АФАР возможны варианты фазирования сигналов на промежуточной или высокой частоте.

Лишь короткий перечень вопросов, возникающих перед разработчиками ФАР и АФАР систем подвижной радиосвязи как для мобильных объектов, так и для базовых станций, позволяет утверждать, что создание высокоэффективных малогабаритных излучающих структур, отдельных радиотехнических устройств и антенных решеток на их основе является сложной научно-технической задачей, решаемой в комплексе.

Цель настоящей работы – разработка и исследование малогабаритных излучающих радиотехнических устройств УВЧ-диапазона и адаптивных антенных решеток на их основе для мобильных объектов и базовых станций систем подвижной радиосвязи.

Исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, предусматривают решение следующих задач:

1. Разработка малогабаритных излучающих структур, предусматривающая обоснованный выбор схемно-конструктивных решений на современной элементной базе; расчет конструктивных параметров с использованием математических моделей и алгоритмов численного расчета электродинамических характеристик излучения; отработка требуемых характеристик на изготовленных макетах.

2. Исследование характеристик АР с учетом взаимного влияния излучателей.

3. Разработка рекомендаций по размещению ААР на мобильном объекте и выбору ее геометрической формы, а также методики инженерного расчета основных параметров.

4. Создание методики инженерного расчета приемной АР для мобильного объекта с фазированием на промежуточной частоте.

5. Разработка требований к алгоритму выбора и управления адаптивной АР, структурных схем решетки и блока управления системой фазирования.

6. Техническая реализация ААР мобильного объекта и ее экспериментальное исследование.

7. Разработка инженерной методики построения антенного устройства для базовых станций систем мобильной радиосвязи с высоким коэффициентом направленного действия, обеспечивающего формирование нескольких направленных излучения в азимутальной плоскости.

8. Обоснованный выбор, расчет и практическая реализация конструкции многолучевой АР, работающей в четырех частотных диапазонах, предназначенной для размещения на ограниченной апертуре.

9. Экспериментальные исследования одночастотных, многочастотных мелогобаритных излучающих структур, позволяющих обеспечить достаточно высокую эффективность при минимально допустимой высоте; их взаимного влияния.

10. Разработка и исследование составных частей ААР; системы фазирования на промежуточной частоте; приемной и передающей АР; блока управления и алгоритма его работы.

Методы проведения исследований. Проведенные теоретические исследования базируются на численно-аналитических методах прикладной электродинамики, сочетании электродинамического подхода и методов теории цепей, приближении заданного распределения поверхностного тока, аппаратуре рядов Фурье и функций Бесселя от мнимого аргумента. Имитационное моделирование проводилось на основе специализированных пакетов программ HP HFSS и MWO, экспериментальные исследования – на основе радиофизических методов измерений.

Научная новизна. При выполнении диссертационной работы получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Исследованы три базовые разновидности низкопрофильных излучающих структур в виде дисковой МПА, прямоугольной МПА, шелевой лабиринтной структуры. Математические модели и разработанные алгоритмы позволяют в полном объеме исследовать характеристики излучения, а также входное сопротивление, КПД, коэффициент усиления.

2. Исследованы характеристики малоэлементной АР с учетом взаимного влияния излучателей, получены выражения для расчета входного сопротивления произвольной излучающей структуры, проведен расчет потерь энергии за счет рассогласования излучателей с линией питания и возбуждения поверхностных волн, а также оценка изменения АФР тока на излучателе.

3. Создана инженерная методика расчета приемной антенной решеткой с фазированием на промежуточной частоте. При этом для мобильного объекта предложено использовать четырехэлементную кольцевую АР на низкопрофильных излучателях, позволяющую получить КНД до 10 дБ.

4. Разработан алгоритм выбора и управления ААР, позволяющий повысить соотношение сигнал-шум в случаях, когда из-за интерференции сигналов один

или несколько антенных элементов решетки находятся в минимуме интерференционного поля.

5. Предложена и реализована структурная схема блока управления системы фазирования и управления АР, которая позволяет обеспечить более устойчивую дуплексную связь при движении мобильного объекта в городе, пригороде и пересеченной местности.

6. Разработан алгоритм выбора «главного» направления на корреспондента, обеспечивающий направление излучения при работе системы на передачу.

Достоверность результатов работы. Достоверность результатов работы подтверждается соответствием теоретических и экспериментальных характеристик исследуемых устройств, а также их соответствием известным аналогам. При проведении исследований использованы известные и проверенные методы – математические и радиофизические измерений.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке инженерных методик, необходимых для проектирования малогабаритных низкопрофильных излучающих структур;
- в предложенных и практически реализованных схемно-конструктивных решениях для радиотехнических устройств антенных систем объектов мобильной связи и базовых станций;
- в полученных расчетных и экспериментальных результатах для разработанных устройств, нашедших применение в НИОКР.

Реализация результатов. Полученные теоретические и экспериментальные результаты использованы в научно-исследовательских работах ОАО «Концерн «Созвездие» при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по темам «Босфор», «Пирамида», «Созвездие-М», «Диоптрия», «Акведук», в ОАО Воронежский НИИ «Вега» при выполнении опытно-конструкторских работ «Кавказ-7М10», «Кавказ-9», в НВП «Протек» при выполнении опытно-конструкторских работ «Диабазол», «Житель». Кроме того, результаты работы внедрены в учебный процесс в Воронежском государственном университете и Воронежском институте МВД России.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Нижний Новгород, 2005 г.), VI Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии» (Воронеж, 2006 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы борьбы с преступностью» (радиотехнические науки) (Воронеж, Воронежский институт МВД России, 2005 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Охрана, безопасность и связь» (Воронеж, Воронежский институт МВД России, 2005 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем» (Воронеж, Воронежский институт МВД России, 2005 г.), ежегодных научных конференциях Воронежского государственного университета и Воронежского института МВД (2004, 2005 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 12 статей, из них 8 - в ведущих изданиях, входящих в перечень

рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, 2 доклада на международных конференциях, 3 тезиса докладов на всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы и 5 приложений, содержащих акты внедрения. Работа изложена на 199 страницах, содержит 78 рисунков и 13 таблиц. Список литературы включает 113 наименований использованных источников.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая ценность результатов работы, и ее реализация. Представлены основные сведения об опубликовании основных научных результатов. Приведено краткое содержание глав диссертации.

В первой главе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой математических моделей и алгоритмов численного расчета электродинамических характеристик излучения малогабаритных антенн. В качестве конструктивных разновидностей малогабаритных антенн для рассмотрения выбраны три базовых элемента: дисковая микрополосковая антенна (МПА), прямоугольная МПА и шелевая лабиринтная структура.

Для ряда радиотехнических систем, в частности, систем радиосвязи с мобильными объектами, необходимы излучающие элементы с осесимметричной ДН с максимумом излучения, близким к плоскости излучателя, которую может формировать дисковая МПА при осесимметричном распределении тока на излучающем элементе.

В качестве модели такой антенны рассматривается бесконечно тонкий круглый диск радиусом a , лежащий на бесконечной диэлектрической подложке толщиной h , расположенный на идеально проводящем экране. Структура возбуждается элементарным диполем, расположенным на оси диска и ориентированным параллельно ей. Ввиду осевой симметрии конструкции создаваемое электромагнитное поле не зависит от азимутального угла и описывается одной компонентой вектора Герца: $\vec{P} = \vec{z}P$. Поле в пространстве – суперпозиция поля диполя в отсутствие диска и рассеянного поля. Соответственно z -компоненты вектора Герца представляется суммой $P = P_0 + P_s$.

Рассеянное поле удовлетворяет однородному уравнению Гельмгольца в свободном пространстве и в подложке, а также условию излучения и условию на ребре, а полное поле – граничным условиям в плоскостях $Z=0$, $Z=h$.

Рассмотрение спектральных амплитуд вектора Герца \vec{P}_i для каждой из рассмотренных областей приводит к интегральным уравнениям относительно функции

$$\alpha(\zeta) = i \frac{2\zeta}{\gamma_1} (\gamma_2 - i\zeta\gamma_1 \operatorname{ctg} \kappa\gamma_2) \sin \kappa\gamma_2 \cdot e^{-i\eta} \vec{P}_i^+$$

которая с точностью до постоянного коэффициента представляет собой спектральную амплитуду тока на диске при следующих принятых обозначениях $\kappa = h/a$, $\gamma_1(\zeta) = (k^2 - \zeta^2)^{1/2}$, $\gamma_2(\zeta) = (k^2 \varepsilon - \zeta^2)^{1/2}$, $k = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$, $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$, $\zeta = Z/a$.

Разложение функции $\alpha(\zeta)$ в ряд по полной системе функций, являющихся собственными функциями оператора рассеяния, приводит к бесконечной СЛАУ второго рода относительно неизвестных коэффициентов S_n разложение в ряд функции $\alpha(\zeta)$. СЛАУ решается с заданной точностью с использованием метода редукции. Характеристики электромагнитного поля в волновой зоне находятся при использовании метода стационарной фазы для асимптотического вычисления интегралов в представлении вектора Герца с учетом требований, налагаемых условием излучения.

Для описания прямоугольной МПА используется представление поля излучения через плотность поверхностного тока на антенне. Излучатели МПА расположены в плоскости $Z=h$ и представляют собой идеально проводящие бесконечно тонкие участки на поверхности магнитодиэлектрика. В каждой из выделенных областей пространства с постоянными значениями ε , μ поле электромагнитной волны можно представить в виде суперпозиции ТЕ- и ТМ-волн.

Из уравнений Максвелла, используя ряд преобразований, можно определить спектральные амплитуды поперечных относительно оси OZ составляющих электрического поля и спектральные амплитуды поля излучения. В рамках приближения заданного распределения плотности поверхностного тока определяются ДН, КНД, мощность излучения в поверхностные волны подложки, КПД, коэффициент усиления, комплексное входное сопротивление прямоугольной МПА, работающий как на основной – первой, так и на второй моде тока излучателя.

Щелевая лабиринтная структура возбуждается объемными резонаторами. Наибольшее распространение получили дисковые двумерные структуры с цилиндрическим резонатором. При нулевой вариации тока на диске ДН дисковой излучающей структуры аналогична по форме ДН несимметричного вибратора. За счет использования лабиринтной структуры резонатора достигается значительное уменьшение геометрических размеров. При этом коэффициент усиления излучающей структуры составляет ≈ 5 дБ по отношению к четвертьволновому несимметричному вибратору.

Поле излучения рассматриваемой структуры складывается непосредственно из излучения резонатора с магнитной стенкой и излучения поверхностного электрического тока, наведенного на бесконечном экране. В рамках резонаторного метода эквивалентный магнитный ток на открытой части резонатора задается в виде n -й азимутальной гармоники

$$\vec{J}^n(\varphi) = \frac{1}{h} \cos(n\varphi) \delta(\rho - a) \vec{a}_\varphi,$$

где a – радиус диска. Наведенный поверхностный электрический ток на экране определяется векторным произведением $\vec{J}_s = \vec{a}_z \times \vec{H}$. В работе приведены выражения для расчета ДН и проводимости излучения.

Рассмотренные модели малогабаритных антенн использовались при разработке практических конструкций дисковых МПА и щелевых лабиринтных излучающих структур для мобильных и базовых станций систем подвижной радиосвязи. На их основе численными методами проведен анализ электродинамических характеристик выбранных конструктивных решений, он позволил значительно сократить традиционный этап макетирования и отработки конструктивных параметров.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию ААР подвижных объектов. Проведен обоснованный выбор конструкции построения ААР и обоснование возможности его технической реализации. АР устанавливается над противовесом с высокой проводимостью на расстоянии не менее четверти длины волны от его края, а излучатели — либо по диагонали квадратной площадки, либо по окружности, диаметр которой не превышает диагонали квадрата.

Для линейной АР с заданной апертурой L определено оптимальное число антенных элементов, обеспечивающих при равноамплитудной их запитке максимальную направленность. Показано, что при диаметре кольцевой решетки, равном половине длины волны, целесообразно использовать две пары антенных элементов, а при диаметре в одну длину волны — четыре пары антенных элементов.

Разработана методика инженерного расчета основных параметров ААР, позволяющая рассчитать ДН АР, КНД в направлении максимума главного лепестка ДН, КПД решетки и ее добротность. По исходным данным (апертура, число антенных элементов, рабочая длина волны, направление максимума главного лепестка ДН, отношение сопротивления потерь к сопротивлению излучения элемента, его ДН, максимальный КПД) вычисляются: амплитудно-фазовые распределения токов возбуждения для заданного направления максимума ДН, нормированные величины активных взаимных сопротивлений излучения элементов решетки, ДН, КНД, КПД и коэффициент реактивности. Путем решения СЛАУ находится АФР токов возбуждения АР, обеспечивающее максимальное значение КНД, затем вычисляются основные параметры АР.

На основе анализа результатов математического моделирования линейных и кольцевых АР показано, что наиболее эффективной при одинаковых числе элементов и апертуре является кольцевая АР.

Показано, что для АР, работающей в полосе частот 300-500 МГц без изменения места установки антенных элементов, оптимальное число элементов равно четырем, при этом АР имеет четыре равноценных направления фазирования вдоль диагоналей квадрата, при которых КНД достигает максимального значения. С изменением диаметра кольцевой АР от 0,45 до 0,7 длины волны, величина КНД изменяется незначительно. При большем увеличении диаметра АР появляются дифракционные лепестки и снижается КНД.

Для фазирования элементов АР диаметра $\lambda/2$ выбрана фазовая матрица. Она формирует четыре ДН, максимумы которых имеют нулевые углы места, а азимуты соседних максимумов отличаются на 90° .

Разработана методика инженерного расчета приемной АР для мобильного объекта с фазированием на промежуточной частоте. Используется кольцевая антенная система из четырех излучателей, диаметр решетки равен $\lambda/2$, КНД по

отношению к одиночному полуволновому вибратору составляет 6дБ. Использование в антенной системе низкопрофильных излучателей с КНД, равным 4,8дБ, позволяет получить АР с КНД 10,8дБ.

На рис.1 и 2 приведены конфигурация и ДН приемопередающей АР (штриховая линия – для идеального фазового рельефа, сплошные – для реализуемого фазового рельефа).

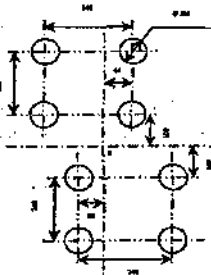


Рис. 1. Конфигурация приемной и передающей решеток

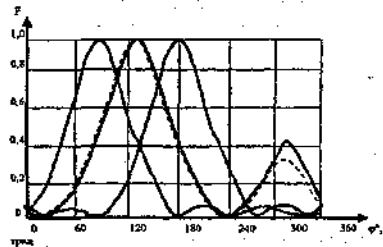


Рис. 2. ДН передающей АР на частоте 428 МГц для трех направлений фазирования: третьего, четвертого и пятого

Разработаны требования к алгоритму выбора и управления ААР. Когда в формировании луча используются все четыре антенных элемента, коэффициент эффективности АР максимален и равен 4, а уровень боковых лепестков незначителен. Рассмотрены случаи, когда из-за интерференции принимаемых сигналов один или несколько антенных элементов решетки попадают в минимум интерференционного поля и вносят дополнительный шум в суммарный сигнал. Показано, что такие элементы решетки целесообразно исключить. В самом неблагоприятном случае, когда в формировании выходного сигнала используется только один элемент и коэффициент эффективности АР на прием равен 1, решетка обеспечивает указание «главного» направления излучения при работе на передачу, что, в конечном счете, повышает устойчивость связи.

Предложена структурная схема блока системы фазирования и управления АР, которая обеспечивает более устойчивую duplexную связь при движении мобильного объекта в городе, пригороде и пересеченной местности.

Разработан алгоритм управления приемной АР, позволяющий адаптивно настраиваться на сигнал корреспондента по максимуму напряженности поля у АР, а также алгоритм выбора «главного» направления на корреспондента, определяющий направление излучения при работе системы на передачу.

Третья глава посвящена разработке и исследованию многолучевых антенных решеток (МАР) базовых станций систем мобильной связи на основе низкопрофильных объемных излучающих структур.

Одним из способов повышения энергетического потенциала систем связи является увеличение коэффициента направленного действия антенных устройств путем формирования узкой (20° и менее) диаграммы направленности в

вертикальной плоскости. Применение многолучевых АР позволяет решить несколько принципиально важных задач: повысить КНД АР, причем в качестве антенных элементов применять низкопрофильные малогабаритные излучатели; располагать антенные решетки на опорных башнях, зданиях, сооружениях, не создавая новых дорогостоящих и трудоемких антенно-мачтовых устройств; используя малые массогабаритные характеристики и оптимальную компоновку, размещать антенные системы, работающие в различных частотных диапазонах с высоким коэффициентом усиления (более 20 дБ), на ограниченной апертуре.

Разработанный математический аппарат и проведенное математическое моделирование позволили создать инженерную методику построения антенных систем с КНД ≥ 22 дБ, обеспечивающих формирование 16-ти направлений излучения в азимутальной плоскости с шириной луча $22^\circ \pm 4^\circ$ в различных диапазонах частот для мобильных систем связи, в частности, в диапазоне 1,5-2 ГГц. Исследования показали, что высокий уровень заднего и боковых лепестков ДН АР не позволяет использовать электрический вибратор малого размера (диполь Герца) в качестве элемента цилиндрической ФАР. Использование вибраторов с рефлекторами также не дает положительного эффекта.

В результате численного анализа и оптимизации амплитудного распределения в цилиндрической ФАР удалось уменьшить уровень боковых лепестков до -17,9 дБ + -20,4 дБ при сканировании в азимутальной плоскости. В работе приведены полученные оптимальные амплитудно-фазовые распределения для каждого из 16-ти направлений излучения в азимутальной плоскости. Показано, что для формирования одного из 16-ти направлений в азимутальной плоскости необходимо иметь три набора амплитудно-фазового распределения. Первый векторный набор тока необходим, когда направление максимума излучения совпадает с серединой дуги, образованной излучателями. Второй и третий – когда максимум излучения отклоняется от середины дуги на $4,5^\circ$ и 9° соответственно.

Предложенная ДОС состоит из 4-х коммутаторов и 3-х распределителей мощности сигнала. Суммарные потери в ДОС не превышают -0,7 дБ, а КСВ по входам и выходам - 1,2. Проведено математическое моделирование малогабаритных АР базовых станций на основе низкопрофильных излучателей. В результате:

а) выбрана и обоснована схема построения МАР, позволяющей на кольцевой цилиндрической основе радиусом 4 м и высотой кольца 1 м расположить многолучевую АР с числом лучей $6 \leq N \leq 24$, коэффициентом направленного действия ≥ 20 и обеспечить круговой обзор пространства с максимумом ДН в азимутальной плоскости;

б) предложена конструкция АР, работающей в 4-х частотных диапазонах. Она состоит из 3-х шестизлементных решеток, выполненных на базе четвертьволновых лабиринтных излучателей и шестизлементной АР на основе полуволнового излучателя с одной излучающей щелью;

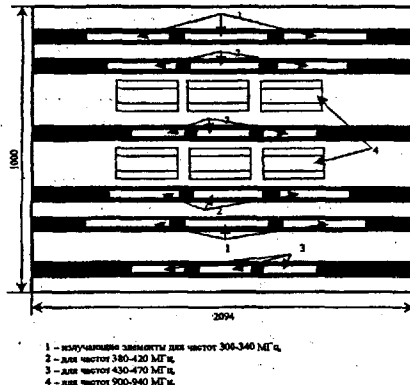


Рис. 3. Конструкция многолучевой антенной решетки из 12 подрешеток

в) разработана практическая конструкция АР (рис.3), особенностью которой является плотная компоновка всех излучателей, позволяющая разместить на заданной апертуре (диаметр 8 м, ширина 1 м) 12 подрешеток.

Разработан вариант многолучевой АР с возможностью сканирования лучом.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям различных типов излучающих структур, антенных решеток на их основе и блоков фазирования и управления антенными решетками.

Разработаны и исследованы макеты одночастотных и двухчастотных микрополосковых излучателей различной геометрии. Изложена инженерная методика проектирования многочастотного вибраторного излучателя. Вибраторы сложной формы, состоящие из нескольких, соединенных определенным образом излучающих элементов, имеющих сильную электромагнитную связь, образуют систему связанных колебательных контуров. Такие системы позволяют повысить КПД излучающих элементов. В работе исследован несимметричный многочастотный излучатель сложной формы, состоящий из последовательно соединенных коротких вибраторов и трубы. Такой излучатель при оптимальной электромагнитной связи обладает сравнительно высоким входным сопротивлением и КНД.

Разработаны конструкции трех - и четырехчастотных вертикальных вибраторов из элементов с сильной электромагнитной связью. Высота вибраторов имеют не более 0,05 максимальной длины волны, а максимальный диаметр диска 200 мм. ДН вибраторов обеих конструкций, установленных на противовесе размером 1 м×1 м, в пределах ошибки измерений совпадают с угломестной ДН вертикального несимметричного вибратора. Характерной особенностью ДН вертикального вибратора и излучателей, установленных на противовесе ограниченных размеров, является зависимость формы ДН от частоты. При этом наиболее узкая рабочая полоса частот (0,7%) соответствует

резонансной частоте 301 МГц, на частоте 428 МГц она составляет 10-15% для первого и второго излучателей.

Разработаны три вида низкопрофильных вибраторов (одночастотных) с емкостной нагрузкой и высотой 35 мм, а также вибраторы высотой 65 мм, эффективно работающие в диапазоне 300-400 МГц. Проведенные испытания изготовленных макетов излучателей показали, что при высоте, не превышающей 0,05 максимальной длины волны, они имеют достаточно высокую эффективность (~80% эффективности четвертьволнового штыря), а ДН соответствует ДН четвертьволнового вибратора, установленного на таком же противовесе. Ширина ДН в угломерной плоскости не превышает 60° , ширина рабочей полосы частот по уровню половинной мощности не менее 10 МГц, а подавление сигнала вне полосы рабочих частот – более 10 дБ.

Экспериментально исследовано взаимное влияние антенных элементов, работающих в передающем и приемном режимах соответственно. При расстояниях между центрами вибраторов больше 0,21 м развязка превышает 10 дБ и достигает 18 дБ при расстояниях 0,33 м. Взаимное влияние вибраторов сказывается на входном импедансе, что приводит к ухудшению согласования вибратора с питающим фидером. В работе показано, что влияние низкопрофильных вибраторов друг на друга подобно взаимодействию обычных антенных вибраторов. Чтобы избежать затенений передающей и приемной решеток, необходимо выбирать разнос между ними больше 230 мм для диапазона от 300 до 500 МГц.

Разработан и экспериментально исследован макет системы фазирования по промежуточной частоте (СФПЧ). Измеренные значения коэффициентов передачи СФПЧ в режимах пропускания, компенсации и непропускания сигналов полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к системам фазирования. Кроме того, в результате проведения испытаний определен диапазон амплитуд входных напряжений, установлены границы устойчивой работы СФПЧ по обеспечению заданных коэффициентов передачи сигналов при подаче на вход калибровочных уровней напряжения. Установлен также диапазон напряжений на управляющих входах СФПЧ, обеспечивающий ее нормальное функционирование: уровень логического нуля $0 \pm 0,8$ В, уровень логической единицы $+4 \pm 5$ В. Эти характеристики могут быть использованы при уточнении требований по согласованию каскадов между СФПЧ, радиоприемным устройством и устройством выбора и управления.

Разработан макет адаптивной антенной системы, включающий две четырехэлементные антенные решетки: передающую (рабочие частоты 300 МГц и 430 МГц) и приемную на четыре рабочие частоты (340, 380, 470 и 485 МГц). Конфигурация антенных решеток выбрана таким образом, что антенные элементы не затеняют друг друга. При этом реализуются следующие параметры: развязка между передающей и приемной решетками не менее 12 дБ; КНД обеих решеток не менее 9,5 дБ, а на частотах выше 340 МГц – больше 10 дБ; развязка между вибраторами не менее 8 дБ; КСВ передающей решетки на рабочих частотах менее 1,3, приемной – 1,5; система фазирования передающей решетки обеспечивает формирование 8 направлений ДН с пересечением соседних ДН на уровне не ниже -0,9 дБ.

Показано, что рассмотренная ААР позволяет увеличить дальность действия системы связи в 1,6+2,0 раза по сравнению с системой связи, использующей одиночную шттыревую антенну.

В заключении подведены итоги проделанной работы и сформулированы основные результаты, которые сводятся к следующему:

1. Для трех конструктивных разновидностей малогабаритных антенн рассмотрены методы построения их математических моделей. Результаты практической реализации и исследования характеристик малогабаритных антенн на основе рассмотренных моделей позволяют отметить их адекватность реальным устройствам, а также возможность и необходимость их использования при расчетах конструктивных параметров.

2. В соответствии с заданными требованиями проведен выбор конструкции ААР для мобильных объектов и обоснование возможности ее технической реализации. Разработана методика инженерного расчета приемной антенной решетки с фазированием на промежуточной частоте. При этом для мобильного объекта исследована кольцевая АР из 4-х излучателей, диаметр решетки равен $\lambda/2$, КНД по отношению к одиночному полуволновому вибратору составляет 6дБ.

3. Предложена структурная схема блока системы фазирования и управления АР, которая, как показано в работе, позволяет обеспечить более устойчивую дуплексную связь при движении мобильного объекта в городе, пригороде и пересеченной местности.

Разработан алгоритм управления приемной АР, позволяющий адаптивно настраиваться на сигнал корреспондента по максимуму напряженности поля у АР, а также алгоритм выбора «главного» направления на корреспондента, определяющий направление излучения при работе системы на передачу.

4. Предложена инженерная методика построения антенных систем с КНД ≥ 22 дБ, обеспечивающих формирование 16-ти направлений излучения в азимутальной плоскости с шириной луча $22^\circ \pm 4^\circ$ в различных диапазонах частот для подвижных систем связи.

5. Разработаны конструкции многочастотных вертикальных вибраторов сложной формы, состоящих из нескольких соединенных определенным образом излучающих элементов, имеющих сильную электромагнитную связь. Такие составные вибраторы отличаются более высоким КПД. Проведенные исследования показали, что при оптимальной электромагнитной связи многочастотные излучатели обладают сравнительно высоким входным сопротивлением и КНД.

6. Экспериментально исследовано взаимное влияние антенных элементов, работающих в передающем и приемном режимах соответственно. Показано, что влияние малогабаритных антенных элементов друг на друга подобно взаимному влиянию вибраторных антенн.

7. Проведено экспериментальное исследование (на макете) системы фазирования на промежуточной частоте (СФПЧ). В результате определен диапазон амплитуд входных напряжений, установлены параметры устойчивой работы СФПЧ по обеспечению заданных коэффициентов передачи сигналов при подаче на вход калибровочных уровней напряжения, а также диапазон

напряжений на управляющих входах СФПЧ, обеспечивающий ее нормальное функционирование.

8. Разработан макет адаптивной антенной системы, включающий две четырехэлементные АР: приемную и передающую. Исследования показали, что адаптивная антенная решетка позволяет увеличить дальность действия системы связи в 1,6÷2,0 раза по сравнению с системой связи, использующей одиночную штыревую антенну.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Андреев Р.Н. Алгоритм выбора и управления адаптивной антенной решеткой // Р.Н.Андреев, Ю.Б.Нечаев// Вестник ВИ МВД РФ.- 2005. - №5(24).- С. 24-29.

2. Николаев В.И. Экспериментальные исследования характеристик излучающих элементов адаптивной антенной решетки / В.И.Николаев, Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев // Теория и техника специальной радиосвязи: науч.-техн. сб. ВНИИС, 2005.- вып.2.- С.107-114.

3. Андреев Р.Н. Методика инженерного расчета приемной антенной решетки с фазированием на промежуточной частоте / Р.Н.Андреев, Ю.Б.Нечаев// Вестник ВИ МВД РФ.- 2005. - №5(24).- С.29-33.

4. Нечаев Ю.Б. Малогабаритные антенны для мобильных систем связи / Ю.Б.Нечаев, Н.Н.Винокурова, Р.Н.Андреев // Наука – производству.- 2005.- №6(86).- С.63-67.

5. Нечаев Ю.Б. Характеристики прямоугольных микрополосковых антенн в приближении заданного распределения поверхностного тока / Ю.Б.Нечаев, Н.Н.Винокурова, Р.Н.Андреев // Вестник ВИ МВД РФ.- 2005.- №2(21).- С.111-115.

6. Николаев В.И. Повышение информационной устойчивости телекоммуникационных систем методом пространственно-ориентированного излучения на основе адаптивной антенной решетки / В.И.Николаев, Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев // Теория и техника специальной радиосвязи: науч.-техн. сб. ВНИИС. – Воронеж: Изд-во Воронеж. НИИ связи, 2005.- вып.2.- С.115-123.

7. Нечаев Ю.Б. Антенные решетки мобильных узлов связи: проблемы и пути их решения / Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев // Охрана, безопасность и связь: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф, Воронеж, 2005 г. – Воронеж, 2005.- Ч.1.- С.5-7.

8. Нечаев Ю.Б. Многолучевая антенная решетка с возможностью сканирования лучом / Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. IV МНТК, Нижний Новгород, 2005 г. – Нижний Новгород, 2005.- С.201-202.

9. Нечаев Ю.Б. Приближение заданного распределения поверхностного тока как эффективный метод анализа микрополосковых излучающих структур / Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев // Современные проблемы борьбы с преступностью. Радиотехнические науки: тез. докл. науч.-практ. конф, Воронеж, 2005 г. – Воронеж, 2005.- С.76-79.

10. Андреев Р.Н. Использование малозаметных микрополосковых антенн для средств подвижной радиосвязи органов внутренних дел / Р.Н.Андреев, М.А.Ежов // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных

телекоммуникационных систем: материалы Всерос. конф, Воронеж, ВИ МВД РФ, 2005 г. – Воронеж, 2005.- С.27-28.

11. Нечаев Ю.Б. Использование специализированных программ для моделирования адаптивных антенных решеток / Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев, А.А.Пашкова // Информатика: проблемы, методология, технологии: сб. материалов науч.-методич. конф., Воронеж, ВГУ, 2006 г. – Воронеж, 2006.- С.295-298.

12. Нечаев Ю.Б. Повышение эффективности приема сигналов системами мобильной связи на основе адаптивных антенных решеток при использовании коммутации ветвей разнесения / Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев // Информационные процессы и технологии в обществе и экономике.- 2006.- №2.- С.24-39.

13. Николаев В.И. Многолучевые антенные решетки базовых станций систем подвижной связи на основе низкопрофильных излучающих структур. Часть 4. Выбор излучающего элемента решетки / В.И.Николаев, Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев // Теория и техника специальной радиосвязи: науч.-техн. сб. ВНИИС. – Воронеж: Изд-во Воронеж. НИИ связи, 2006.- вып. 3.- С. 82-91.

14. Николаев В.И. Многолучевые антенные решетки базовых станций систем подвижной связи на основе низкопрофильных излучающих структур. Часть 1. Электродинамическое описание и особенности проектирования цилиндрических ФАР / В.И.Николаев, Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев // Теория и техника специальной радиосвязи: науч.-техн. сб. ВНИИС. – Воронеж: Изд-во Воронеж. НИИ связи, 2006. – вып. 3. С. 49-57.

15. Николаев В.И. Многолучевые антенные решетки базовых станций систем подвижной связи на основе низкопрофильных излучающих структур. Часть 2. Оптимизация амплитудно-фазового распределения в дуговой решетке и его возможная реализация / В.И.Николаев, Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев // Теория и техника специальной радиосвязи: науч.-техн. сб. ВНИИС. – Воронеж: Изд-во Воронеж. НИИ связи, 2006.- вып. 3. С. 58-67.

16. Николаев В.И. Многолучевые антенные решетки базовых станций систем подвижной связи на основе низкопрофильных излучающих структур. Часть 3. Результаты имитационного моделирования малогабаритных антенных решеток на основе низкопрофильных излучателей / В.И.Николаев, Ю.Б.Нечаев, Р.Н.Андреев // Теория и техника специальной радиосвязи: науч.-техн. сб. ВНИИС. – Воронеж: Изд-во Воронеж. НИИ связи, 2006.- вып. 3. С. 68-81.

17. Нечаев Ю.Б. Адаптивная антенная решетка для системы дуплексной мобильной связи. Особенности построения и техническая реализация/ Ю.Б.Нечаев, Н.Н.Винокурова, Р.Н.Андреев // Наука – производству.- 2006.- №3.- С.58-59.

Подписано в печать .Формат 60×84 $\frac{1}{4}$.

Усл. Печ.л. 1.0

Тираж 100 экз. Заказ № 125 .

Типография Воронежского института МВД России
394065 Воронеж, просп. Патриотов, 53

