

РЕМБОВСКИЙ Юрий Анатольевич

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ АППАРАТУРЫ
РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ СТАЦИОНАРНОГО И МОБИЛЬНОГО
БАЗИРОВАНИЯ**

**Специальность: 05.12.07 - Антенны, СВЧ устройства и их
технологии**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2011

Работа выполнена в научно-производственном предприятии
ЗАО «ИРКОС» (г. Москва)

Официальные оппоненты:

Борзов Андрей Борисович, доктор технических наук, профессор
(профессор кафедры СМ-5 МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);

Федотов Александр Юрьевич, доктор технических наук (ФГУП
«Научно-производственное предприятие Всероссийский научно-
исследовательский институт электромеханики», начальник
лаборатории прикладной электродинамики, г. Москва);

Виноградов Александр Дмитриевич, доктор технических наук,
профессор (Военный авиационный инженерный университет МО
РФ, научно-исследовательский испытательный центр
радиоэлектронной борьбы, главный научный сотрудник, г.
Воронеж).

Ведущая организация: ОАО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж).

Защита состоится 16 февраля 2012 г. в 14.30 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.11 при ГОУВПО «Московский
государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»: 105005, Москва,
ул. 2-я Бауманская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Автореферат разослан «11» 11 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Власов И.Б.



2012

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Быстрый прогресс в разработке и производстве средств телекоммуникации и связи обуславливает необходимость постоянного совершенствования аппаратуры и программного обеспечения комплексов радиоконтроля стационарного и мобильного базирования.

Учитывая жесткие требования по ограничению габаритных размеров антенных систем, диктуемые необходимостью повышения живучести комплексов радиоконтроля и обеспечения возможности их размещения вблизи корпуса мобильного или бортового носителя, а также тенденции расширения полосы рабочих частот современной аппаратуры телекоммуникации и связи, роста ее чувствительности, повышения точности пеленгования источников радиоизлучения, использования поляризационного разделения каналов, одним из радикальных путей совершенствования комплексов радиоконтроля является развитие теории и разработка эффективных методов проектирования их антенных систем, а также методов обработки принимаемых ими сигналов, компенсирующих дифракционные искажения измеряемого электромагнитного поля.

Актуальность темы исследования подчеркивается также рядом следующих факторов: априорной неизвестностью вида и параметров поляризации принимаемых волн; изменяемостью, в процессе эксплуатации, геометрии и материальных свойств корпуса носителя антенной системы (состояния дверей и люков; качества контакта отдельных деталей конструкции носителя; свойств подстилающей поверхности); необходимостью устранения (или минимизации) «мертвых» областей углов зоны действия комплекса радиоконтроля.

Исследованием и созданием широкополосных и сверхширокополосных антенн, перспективных для использования в современных комплексах радиоконтроля, занимались Г.В. Анцев, Н.А. Арманд, Л.Ю. Астанин, А.В. Ашихмин, Л.Д. Бахрах, Н.А. Бей, А.М. Бобрешов, А.П. Брызгалов, Д.И. Воскресенский, А.Ю. Гринев, В.И. Гусевский, Г.А. Ерохин, Е.Г. Зелкин, Н.В. Зернов, И.Я. Иммореев, А.Ф. Кардо-Сысосев, В.Я. Кислов, А.А. Костылев, В.Ф. Кравченко, А.П. Курочкин, А.В. Маторин, В.Н. Митрохин, Ю.Б. Нечаев, М.Л. Осипов, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пермяков, Л.И. Пономарев, И.В. Попов, Д.М. Сазонов, В.А. Сарычев, Б.В. Сестрорецкий, В.Г. Соколов, В.Н. Скосырев, А.Д. Французов, А.Ф. Чаплин, В.В. Чапурский, В.А. Черепенин, С.Л. Чернышев, В.С. Черняк, А.Б. Шварцбург, Ю.В. Юханов, J.L. Beafore, J. Bergman, T. Carozzi, E. Durham, J.-P. Guoin, P. Crane, W.G. Guion, M.D. Fanton, A.J.T. Fry, S. Fujisawa, T. Fukagawa, O. Fumio, S.F. Gorman, G.K. Gothard, M. Göttl, A.E. Heatherwick, M. Hoshino, S.W. His., D.M. Janoschka, A.M. Jones, W.J. Kaminsk, R. Karlsson, Y. Kenichiro, D.D. King, T. Kishigami, G. Lackmeyer, J. Longyear, F.J. Malek, W.J. Mamak, M.I. Marks, A. Melconian, W. Mummert, S. Ortiz, E.L. Ostertag, T.K. Overton, N.D. Paul, A.W. Peavy, N.E. Saucier, S.P. Saulnier, H.G. Schantz, E.D. Sharp, K.D. Scharp, T. Shirosaka, C.N. Smith, R.F. Solberg, W. Staniszewski, J.H. Steinkamp, R. Steven, D. Steward, K.A. Struckman, R.J. Timothy, T. Yoshikatu, Y. Yuda, J.H. Zablotney и др.

Значительный вклад в разработку и исследование алгоритмов обработки сигналов, принимаемых антенными решетками, внесли Ю.И. Абрамович, О.Е. Антонов, О.В. Белавин, В.И. Белов, Б.Ф. Бондаренко, В.А. Вентцель, А.Д. Виноградов, А.Б. Гершман, В.И. Глазьев, Л.С. Гуткин, В.П. Демин, В.П. Денисов, Р.А. Зацерковский, Ю.В. Ильченко, В.В. Караваев, Л.И. Коновалов, А.С. Коновальчик, И.С. Кукес, Д.И. Леховицкий, Е.С. Макаров, В.Н. Манжос, В.К. Мезин, И.Д. Меркуленко, Ю.Б. Нечаев, А.А. Поваляев, В.Ф. Писаренко, С.Ю. Платонов, В.В. Сазонов, И.Н. Сашук, О.В. Смидович, В.С. Ульянов, С.Е. Фалькович, Ю.А. Федоркин, В.Р. Хачатуров, О.П. Черемисин, В.Н. Шевченко, В.В. Ширков, Я.Д. Ширман, A. Barabell, F. Belloni, J. Bohme, K.M. Buchley, M. Buhren, J.P. Burg, J. Capon, S. Chandran, C.D. Crews, B. Friedlander, P.J.D. Gething, A.B. Gershman, M. Haard, K.V.S. Hari, Y.F. Huans, P. Hyberg, D.H. Johnson, T. Kailath, M. Kavech, R.L. Kellogg, V. Koivunen, R. Kumaresan, Zhi-Quan Luo, E.E. Mack, X. Mestre, M.P. Moudi, A. Nehorai, B. Ottersten, M. Pesavento, U. Pillai, R. Poisel, B.D. Rao, D.P. Reilly, A. Richter, D.R. Rods, P. van Rooyen, P. Roux, R. Roy, T. Sarkar, R.O. Schmidt, V.C. Soon, P. Stoica, L. Swindlehurst, H.L. Van Trees, D.W. Tufts, E. Tuncer, M. Viberg, M. Wax, A. Weiss, G. Xu, I. Ziskind, M. Zolotowski и др.

Мировыми лидерами (как по качественному, так и по количественному критериям) в области разработки и производства аппаратно-программных комплексов радиоконтроля являются фирмы Rohde&Schwarz (Германия) и TCI (США). Их каталоги включают в себя обширный ассортимент, как полностью укомплектованных комплексов радиоконтроля (стационарных, мобильных, бортовых, портативных), так и отдельных устройств и систем приема и обработки радиосигналов, антенных устройств и систем для различных диапазонов, а также специального математического и программного обеспечения аппаратуры радиомониторинга и радиопеленгации.

Вместе с тем, в теории и технике приемных антенных систем, и в области разработки методов обработки принимаемых ими сигналов остается нерешенным ряд важных задач, связанных с: - разработкой методов проектирования сверхширокополосных антенн, на габаритные размеры которых накладываются жесткие ограничения, обладающих максимально возможной действующей длиной как в полосе их удовлетворительного согласования с фидерной линией, так и за нижней ее границей; - разработкой методов проектирования малогабаритных радиопеленгаторных антенных систем, функционирующих в КВ, УКВ, СВЧ и КВЧ диапазонах волн, характеризующихся отсутствием «мертвой» зоной в зенитной области, позволяющих оценивать угловые координаты источников радиоизлучения с произвольной поляризацией; - разработкой методов проектирования «вложенных» друг в друга подрешеток, функционирующих в различных диапазонах волн; - разработкой методов и моделей аппроксимации поля вблизи антенных систем без использования какой-либо информации о геометрии и материальных свойствах корпуса их носителя (или опорной мачты), а также – свойств подстилающей поверхности; - разработкой методов проектирования сверхширокополосных антенн, в минимальной степени искажающих сверхширокополосные сигналы (в частности – сверхкороткие видеопульсы);

- совершенствованием методов и алгоритмов сверхразрешения источников радиоизлучения в пространственно-угловой области с точки зрения учета искажений структуры поля, вносимой антенной системой и ее носителем.

Обозначенные выше обстоятельства обуславливают актуальность темы настоящего исследования, выполненного в ходе ряда НИР и ОКР, проводимых в НПП ЗАО «ИРКОС» (г. Москва), выполняемых в интересах государственных структур, обеспечивающих обороноспособность и безопасность страны.

Объектом исследования являются сверхширокополосные антенные системы для аппаратуры радиопеленгации стационарного и мобильного базирования.

Предметом исследования является подходы и методы создания сверхширокополосных антенных систем для аппаратуры радиопеленгации стационарного и мобильного базирования, учитывающие дифракционные искажения структуры измеряемого электромагнитного поля антенной решеткой и ее носителем (опорной мачтой, корпусом автомобиля и т.д.), использующие или не использующие априорную информацию о геометрии и материальных свойствах рассеивателей.

Целью диссертационной работы является разработка теории и методов проектирования сверхширокополосных антенных систем аппаратуры радиопеленгации стационарного и мобильного базирования, основанных на учете дифракционных искажений измеряемого электромагнитного поля и использовании ряда подходов, позволяющих существенно уменьшить их габаритные размеры, расширить угловой сектор их функционирования, обеспечить возможность эффективного приема и оценки параметров радиоволн с произвольной поляризацией, а также – существенно повысить чувствительность приемных антенных систем и точность оценки угловых координат источников радиоизлучения.

Достижение поставленной цели потребовало **решения следующих задач**:

- проведения анализа перспективных направлений развития теории и техники антенн, пригодных для использования в комплексах радиоконтроля стационарного и мобильного базирования, а также методов обработки принимаемых ими сигналов, позволяющих повысить разрешающую способность и точность пеленгования источников радиоизлучения;
- разработки и исследования методов и моделей аппроксимации пространственного распределения поля вблизи корпуса носителя антенной решетки, не требующих априорного использования информации о геометрии и материальных свойствах рассеивателей;
- исследования перспективных направлений улучшения технических характеристик мобильных и стационарных радиопеленгаторов, основанных на совершенствовании характеристик используемых антенных решеток;
- разработки и исследования радиопеленгаторных антенных решеток СВЧ диапазона волн, состоящих из сверхширокополосных направленных элементов, характеризующихся отсутствием фазового центра;
- разработки и исследования малогабаритных многодиапазонных антенных элементов, функционирующих в нескольких перекрывающихся или не перекрывающихся между собой сверхширокополосных диапазонах частот;

- разработки и исследования функционирования антенн комплексов радиоконтроля в режиме разрешения нескольких некоррелированных и коррелированных источников;

- экспериментального исследования разработанных антенн и формулирования требований к параметрам приемной антенной системы радиопеленгаторного комплекса.

Методы исследования. При проведении исследований использовались классические методы анализа и синтеза антенн, вычислительные методы технической электродинамики, методы математического моделирования, стандартные методы экспериментальных измерений характеристик антенн.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработаны и исследованы методы и модели аппроксимации пространственного распределения электромагнитного поля внутри и вне контура, на котором лежат элементы радиопеленгаторной антенной решетки полноазимутального обзора пространства, применение которых не требует использования информации о геометрии и материальных свойствах корпуса носителя, опорной мачты и других близлежащих рассеивателей, в основе которых лежит использование теории аналитических функций комплексного переменного (интегралы Коши, ряды Лорана), метода вспомогательных источников поля, метода интеграла Кирхгофа, совокупность которых, наряду с обобщением результатов, полученных с помощью численного анализа и натурного эксперимента, составляет разработанную теорию «виртуальных» антенных решеток, использование которой позволяет существенно уменьшить влияние дифракционных искажений измеряемого поля на точность и разрешающую способность пеленгования;

- исследованы подходы и разработаны методы проектирования радиопеленгаторных антенных систем мобильного базирования, отличающиеся возможностью эффективного использования корпуса носителя для существенного повышения чувствительности радиопеленгаторных комплексов в КВ и УКВ диапазонах для волн с произвольным видом поляризации; разработан метод обработки принимаемых сигналов, отличающийся использованием опорных сигналов с выходов элементов антенной решетки, являющихся откликами на падающие волны с вертикальной и горизонтальной поляризацией, позволяющий оценивать угловые координаты источника радиоизлучения и вид поляризации волн;

- разработан метод проектирования сверхширокополосной радиопеленгаторной кольцевой антенной решетки, отличающийся используемым способом запитки плоских электрических вибраторов с помощью расширяющейся щелевой структуры, параметры которой выбираются таким образом, чтобы в полосе частот функционирования вибратора потери на излучение в щелевой фидерной линии были незначительными, существенно увеличиваясь с ростом частоты и формируя игольчатую диаграмму направленности элемента в составе решетки с коэффициентом усиления более 10 дБ, что позволяет реализовать значения коэффициента частотного перекрытия, превышающие 100 при однозначном измерении пеленга источника радиоизлучения;

- разработаны методы проектирования радиопеленгаторных антенных решеток УКВ и СВЧ диапазонов волн, состоящих из сверхширокополосных направленных элементов, характеризующихся отсутствием фазового центра (ТЕМ- рупоры и антенны Вивальди), отличающиеся возможностью оптимизации характеристик симметричных и несимметричных элементов со стандартными номиналами входных сопротивлений 100 Ом и 50 Ом, соответственно, с помощью генетического алгоритма, и позволяющие создавать сверхширокополосные радиопеленгаторные антенные системы с горизонтальной, вертикальной, а также – с двумя ортогональными линейными поляризациями;

- исследован и апробирован подход к созданию сверхширокополосных антенных структур на основе вложенных друг в друга несимметричных ТЕМ- рупоров, характеризующихся возможностью функционирования в нескольких частотных диапазонах с коэффициентом перекрытия 3 и более каждый; при этом наличие внутри внешнего антенного устройства даже 4 антенных решеток практически не ухудшает его входные и направленные характеристики, в частности, коэффициент усиления внешнего ТЕМ- рупора уменьшается не более, чем на 1 дБ, а внешние антенные элементы практически не влияют на соответствующие характеристики внутренних элементов;

- разработана методика модификации алгоритмов сверхразрешения некоррелированных и коррелированных источников радиоизлучения, дающая возможность существенного повышения разрешающей способности и точности пеленгования комплексов радиоконтроля, и отличающаяся учетом взаимодействия элементов антенной решетки и других близлежащих рассеивателей, проводимым на основе использования опорного сигнала, сформированного с учетом строгой электродинамической модели антенной решетки, или формирования автокорреляционной матрицы принимаемых сигналов с учетом фазовых диаграмм направленности соответствующих элементов антенной решетки;

- разработан метод синтеза согласующего полоскового трансформатора для сверхширокополосной антенны, основанный на использовании эволюционирующего критерия, при котором порядок нормы усреднения, при вычислении значений целевой функции, увеличивался в ходе нахождения значений компонент вектора варьируемых параметров – значений ширины полосков, с целью перехода от выполнения критерия минимума среднеквадратического значения модуля коэффициента отражения к минимаксному критерию, использование которого, наряду с генетическим алгоритмом оптимизации и простой моделью стыка полосков разной ширины, позволяет гарантировать технологическую реализуемость устройства и существенно улучшить качество согласования комплексной нагрузки в сверхширокой полосе частот.

Практическая ценность работы заключается в повышении чувствительности, точности пеленгования и разрешающей способности по угловым координатам мобильных и стационарных комплексов радиоконтроля, выпускаемых НПП ЗАО «ИРКОС» (г. Москва), а также – в уменьшении числа литер и габаритных размеров их антенных систем.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы использованы в: НПП ЗАО «ИРКОС» (г. Москва), ФГУП «НКТБ «Феррит» (г. Воронеж), ГНИИИ проблем технической защиты информации ФСТЭК РФ (г. Воронеж), филиале ФГУП «Радиочастотный центр Центрального федерального округа» в Воронежской области. Ряд результатов внедрен в учебный процесс Воронежского института государственной связи (филиал) академии ФСО РФ (г. Воронеж), а также - Воронежского института МВД РФ (г. Воронеж).

Основные положения, выносимые на защиту:

- теория «виртуальных» антенных решеток, представляющая собой совокупность предложенных методов и моделей аппроксимации поля вблизи рассеивателей с неизвестной формой и материальными свойствами (корпус мобильного или бортового носителя, опорная мачта) и результатов их исследования, применение которой позволяет, на основе вычисления значений поля в множестве точек, лежащих внутри и вне контура радиопеленгаторной антенной системы (иными словами - формирования «виртуальной» антенной решетки), существенно (до 2-4 раз) повысить точность пеленгования и разрешающую способность радиопеленгаторных комплексов;

- методы проектирования радиопеленгаторных антенных решеток мобильного базирования и метод обработки принимаемых сигналов, основанные на использовании несимметричных электрических вибраторов, представляющих собой вертикальные цилиндры, нагруженные на горизонтально-ориентированные пластины (имеющие форму круга или «флажков»), и формировании базы данных частотно-угловых зависимостей амплитуд и фаз опорных колебаний, наводимых волнами с ортогональными поляризациями, позволяющие, благодаря рациональному использованию токов, протекающих по корпусу носителя, существенно (на 5÷10 дБ) повысить чувствительность радиопеленгаторного комплекса мобильного базирования, и дающие возможность оценки угловых координат источника радиоизлучения с точностью $(1\pm 2)^\circ$, а также - вида поляризации принимаемых радиоволн;

- метод проектирования кольцевой радиопеленгаторной антенной решетки, основанный на построении ее элементов в виде плоских сверхширокополосных электрических вибраторов, запитываемых неоднородными щелевыми линиями с потерями на излучение, использование которого позволило разработать антенную решетку, функционирующую в полосе частот от 25 до 3000 МГц, соответствующую полосе функционирования двух-трех, расположенных друг над другом, антенных подрешеток с вибраторными элементами, позволяющий повысить чувствительность приемной антенной системы на значения, достигающие 10 дБ;

- методы проектирования кольцевых радиопеленгаторных антенных решеток, состоящих из: несимметричных ТЕМ-рупоров, характеристики которых оптимизируются с помощью процедуры, построенной на использовании генетического алгоритма и модели антенного устройства, основанной на подходах к анализу многокаскадного соединения четырехполюсников; полосковых антенных элементов в печатном исполнении, соседние пары которых функционируют как антенны Вивальди, а

противоположные – как симметричные электрические вибраторы; комбинации вертикальных симметричных ТЕМ- рупоров и полосковой многолепестковой структуры, расположенной внутри рупорных элементов, несущественно искажающих направленные свойства и входные характеристики друг друга; применение которых дает возможность реализовать значения коэффициента усиления элемента в составе решетки от 4 до 16 дБ в полосе частот от 1.5 до 8.5 ГГц;

- подход к проектированию многодиапазонных радиопеленгаторных антенных структур, образованных вложенными друг в друга несимметричными ТЕМ- рупорами, основанный на незначительном возмущении структуры электромагнитного поля внутри внешнего антенного элемента помещенными внутрь его подобными ему излучателями меньшего размера, полосы которых ориентированы ортогонально силовым линиям электрической компоненты поля, позволяющий разрабатывать антенные системы полноазимутального обзора, функционирующие в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн, и реализовать значения коэффициента подобия вложенных элементов вплоть до 0.5 при изменении коэффициента усиления внешнего элемента, относительно уединенного аналога, не более 0.5 дБ в полосе частот с более, чем пятикратным перекрытием;

- методика повышения разрешающей способности и точности оценки угловых координат нескольких некоррелированных или коррелированных источников радиоизлучения в аппаратно-программных комплексах радиоконтроля, в которых реализованы методы пространственно-углового сверхразрешения, основанная на учете искажений структуры наблюдаемого поля антенной системой и ее носителем, путем формирования базы данных эталонных сигналов на выходах элементов антенной решетки, либо на основе использования модифицированной функциональной матрицы, элементы которой образованы на основе автокорреляционной матрицы принимаемых сигналов и комплексных диаграмм направленности вибраторов в составе решетки;

- метод синтеза полоскового трансформатора для согласования комплексной нагрузки в сверхширокой полосе частот, построенный на основе использования генетического алгоритма, модели скачка ширины полосковой линии и возрастающей, от первоначального значения 2, нормы усреднения значений модуля коэффициента отражения на его входе, позволяющий обеспечить существенно лучшее качество согласования ТЕМ- рупора с линзой в полосе частот от 1 до 18 ГГц, чем при использовании экспоненциального полоскового трансформатора.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на V Всероссийской НТК «Радиооптические технологии в приборостроении» (г. Сочи), 2007 г.; International joint conference on e-business and telecommunications (ICETE), (Barcelona), 2007 г.; 8 и 9 международной НТК «Кибернетика и высокие технологии XXI века» (г. Воронеж), 2007-2008 гг.; 13-17 международной НТК «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж), 2007-2011 гг.; III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (г. Москва), 2009 г.; VI международном семинаре

«Физико-математическое моделирование систем» (г. Воронеж), 2009г.; семинаре по прикладным проблемам электродинамики Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва), 2009 г., а также на ежегодно проводимых научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, студентов и аспирантов ГОУВПО «ВГТУ» (г. Воронеж), 2005-2011 гг., ГОУВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана» (г. Москва), 2011 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы и содержатся в 77 печатных работах, в том числе: 56 статьях - в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов докторских диссертаций, 20 докладах на научно-технических конференциях и семинарах, а также - в 1 патенте РФ.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежит: постановка решаемых задач; разработка и исследование методов и моделей аппроксимации поля внутри и вне контура расположения элементов антенной решетки, не требующих использования информации о геометрии и материальных свойствах корпуса ее носителя; разработка методов проектирования радиопеленгаторных антенных систем стационарного и мобильного базирования и перспективных сверхширокополосных антенных элементов с существенно улучшенными характеристиками; разработка методов реально-временной обработки сигналов, принимаемых радиопеленгаторными антенными системами стационарного и мобильного базирования, позволяющих существенно повысить точность пеленгования и разрешающую способность аппаратно-программных комплексов радиоконтроля, а также – получать оценку параметров, характеризующих вид поляризации принимаемых электромагнитных волн; участие в обсуждении полученных результатов; получение базы данных опорных сигналов с помощью численного моделирования разработанных антенных систем, проводимого в пространственно-временной области; участие в натурных исследованиях разработанных радиопеленгаторных антенных систем.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Работа содержит 425 страниц основного машинописного текста, 155 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 348 наименований использованных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен анализ перспективных направлений развития теории и техники антенн аппаратуры радиоконтроля стационарного и мобильного базирования. В его рамках выполнен аналитический обзор классических и новейших методов оценки угловых параметров источников радиоизлучения, проведен сравнительный анализ алгоритмов сверхразрешения источников радиоизлучения в пространственной области, а также проведен анализ современного состояния и перспектив развития теории и техники антенн, используемых в комплексах радиомониторинга и радиопеленгации.

Во второй главе разработаны и исследованы методы описания пространственного распределения поля вблизи корпуса носителя антенной решетки (АР), не требующие использования информации о его геометрии и материальных свойствах, и позволяющие, за счет использования пространственных отсчетов аппроксимированного поля, образующих «виртуальную» антенную решетку (ВАР), существенно повысить точность и разрешающую способность радиопеленгаторов мобильного (или бортового) базирования. Актуальность исследований обусловлена сложностью и высокой стоимостью процедуры калибровки приемной антенной системы, направленной на компенсацию дифракционных искажений измеряемого поля, вносимых корпусом носителя. Кроме того, в процессе эксплуатации аппаратуры, калибровка весьма быстро сбивается, вследствие вибрации, механических повреждений корпуса носителя, окисления соединений его составных частей; отметим также возможность неконтролируемого изменения геометрии рассеивателя из-за открытия дверей, люков и т.д.

Было выяснено, что эффективным способом формирования «виртуальной» антенной решетки является аналитическое продолжение поля, измеренного антенной системой, с помощью методов теории аналитических функций комплексного переменного $z = x + iy$, в частности – интеграла Коши или ряда Лорана. Данный подход применим лишь в случае достаточно малых электрических размеров области, в которой формируется «виртуальная» решетка.

На контуре эквидистантной кольцевой антенной решетки с радиусом R , E_z - составляющая поля может быть описана, на основании измеренных значений поля $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$, с использованием следующего полинома:

$$U_{AP}(z = R \cdot \exp[i\varphi]) = \sum_{n=1}^{N+1} B_{n-1} \cdot \exp[i(n-1)\varphi / (N+1)], \quad (1)$$

коэффициенты которого находятся с помощью метода наименьших квадратов.

Используя интеграл Пуассона (частный случай интеграла Коши для контура в виде окружности), можно записать интегральное уравнение 1-го рода, связывающее поля на контурах «реальной» и «виртуальной» решеток:

$$\begin{aligned} U_{AP}(z = R \cdot \exp[i\varphi]) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{BAP}(r \cdot \exp[i\psi]) \frac{r^2 - R^2}{r^2 - 2rR \cdot \cos(\psi - \varphi) + R^2} d\psi = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \sum_{k=1}^{K+1} X_{k-1} \cdot \exp[i(k-1) \cdot \psi / (K+1)] \right\} \frac{r^2 - R^2}{r^2 - 2rR \cdot \cos(\psi - \varphi) + R^2} d\psi, \end{aligned} \quad (2)$$

решаемое с помощью метода коллокаций, после проведения процедуры регуляризации по Тихонову (или – использования метода ограниченной порчи).

Другой способ аппроксимации поля основан на разложении функции $U_{AP}(z)$ в кольце $R - \delta \leq r \leq R + \delta$ (где $\delta \ll R$) в ряд Лорана:

$$U_{AP}(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k z^k, \quad \text{где } c_k = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{U(\zeta) d\zeta}{\zeta^{k+1}}. \quad (3)$$

Далее, с помощью (3), находятся производные функции $U_{AP}(z)$ в радиальных направлениях $\partial U(\varphi, r)/\partial r$, $\partial^2 U(\varphi, r)/\partial r^2$, и т.д., и оцениваются значения функции $U_{BAP}(\varphi, R+L)$ с помощью отрезка ряда Тейлора:

$$U(\varphi, R+L) \approx U(\varphi, R) + L \cdot \partial U(\varphi, r)/\partial r + 0.5L^2 \cdot \partial^2 U(\varphi, r)/\partial r^2 + \dots \quad (4)$$

Возможность формирования «виртуальных» решеток следует из леммы Лоренца, позволяющей, по известным касательным компонентам поля на замкнутой поверхности S , вычислить все составляющие поля в ограниченном ею объеме V ; при выводе леммы Лоренца не используются какие-либо данные о свойствах среды. Скалярным аналогом леммы Лоренца является выражение для интеграла Кирхгофа (3-я интегральная формула Грина), позволяющее вычислить поле в любой точке объема V , ограниченного замкнутой поверхностью S , на которой известны значения поля и его нормальной производной. В работе показано, что можно перейти от исходной трехмерной задачи к эквивалентной двумерной задаче – задаче оценки значений поля на контуре ξ по известным его значениям $u(P_n)$ в нескольких точках N контура L , рис. 1.

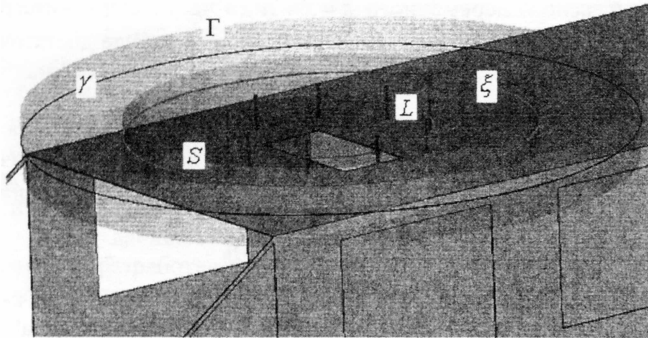


Рис. 1. Антенная решетка на крыше автомобиля; поверхности и контуры

На внешнем контуре γ располагаются вспомогательные источники поля $\varphi_m(Q_i, q_m) = -(\pi \cdot i/2) \cdot H_0^1(k_0 r_{Q_i, q_m})$, линейная комбинация которых (с неизвестными комплексными амплитудами U_{q_m}) моделирует поле внутри контура γ .

Задача формирования «виртуальной» антенной решетки сводится к решению следующей СЛАУ относительно величин U_{q_m} :

$$\sum_{m=1}^N U_{q_m} \cdot \sum_{i=1}^I \left\{ G(P_n, Q_i) \cdot \frac{\partial \varphi_m(Q_i, q_m)}{\partial n} - \varphi_m(Q_i, q_m) \cdot \frac{\partial G(P_n, Q_i)}{\partial n} \right\} \Delta \xi_i = u(P_n), \quad n=1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

где: $G(P_n, Q_i) = -(\pi \cdot i/2) \cdot H_0^1(k_0 r_{P_n, Q_i})$; $Q_i \in \xi$; $P_n \in L$; $q_m \in \gamma$; I – число разбиений контура ξ ; $\Delta \xi_i$ – длина элемента окружности ξ .

Так как функции φ_m являются решениями уравнения Гельмгольца, уравнение (5) эквивалентно следующей СЛАУ:

$$|A| \cdot \vec{u}_q = \vec{u}_p; (|A|)_{n,m} = H_0^1(k_0 r_{p,q,m}); (\vec{u}_q)_m = U_{q,m}; (\vec{u}_p)_n = U_{p,n}; m, n \in 1, \dots, N. \quad (6)$$

Поля на плоских контурах L , ξ и γ ($u(P)$, $U_Q(Q)$ и $U_q(q)$), соответственно, определяемые рядами Фурье с коэффициентами a_n , b_n и c_n) связаны между собой также следующими соотношениями:

$$u(P) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \exp(in\varphi_L) = \oint_{\gamma} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp(in\varphi_\gamma) H_0^1(k_0 r_{p,q}) d\gamma_q = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \oint_{\gamma} \exp(in\varphi_\gamma) H_0^1(k_0 r_{p,q}) d\gamma_q,$$

$$U_Q(Q) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n \exp(in\varphi_\xi) = \oint_{\gamma} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp(in\varphi_\gamma) H_0^1(k_0 r_{Q,q}) d\gamma_q = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \oint_{\gamma} \exp(in\varphi_\gamma) H_0^1(k_0 r_{Q,q}) d\gamma_q.$$

Коэффициенты a_n , b_n и c_n описывают функции, удовлетворяющие уравнению Гельмгольца, т.е., как минимум, дважды непрерывно дифференцируемые. С учетом теоремы Римана-Лебега, справедливы соотношения:

$$|a_n| < C_1/n^2, \quad |b_n| < C_2/n^2, \quad |c_n| < C_3/n^2, \quad (7)$$

где C_1 , C_2 и C_3 - некоторые постоянные величины.

Показано, что, при приближении полей на контурах L , ξ и γ с помощью конечного числа гармоник Фурье, справедливы следующие ограничения:

$$a_n \exp(in\varphi_L) < C_1/n^2, \quad b_n \exp(in\varphi_\xi) < C_2/n^2, \quad c_n < C_3/n^2, \quad (8)$$

$$\oint_{\gamma} \exp(in\varphi_\gamma) H_0^1(k_0 r_{p,q}) d\gamma_q < \alpha_1 \exp(-\beta_1 n), \quad \oint_{\gamma} \exp(in\varphi_\gamma) H_0^1(k_0 r_{Q,q}) d\gamma_q < \alpha_2 \exp(-\beta_2 n).$$

Получены выражения для погрешностей описания поля на контурах L , ξ и γ :

$$\delta u_a < 2C_1 \left\{ \frac{\pi^2}{6} - \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{n^2} \right] \right\}, \quad \delta U_c < 2C_3 \alpha_2 \{ Li_2(\exp(-\beta_2)) - \sum_{n=1}^N \left[\frac{\exp(-\beta_2 n)}{n^2} \right] \},$$

$$\delta u_c < 2C_3 \alpha_1 \{ Li_2(\exp(-\beta_1)) - \sum_{n=1}^N \left[\frac{\exp(-\beta_1 n)}{n^2} \right] \}. \quad (9)$$

Зависимости погрешностей описания поля на контурах «реальной» антенной решетки $|\delta u_c/C_3|$ (сплошные линии) и «виртуальной» решетки $|\delta U_c/C_3|$ (пунктирные линии) от числа учитываемых гармоник Фурье N приведены на рис. 2: а) - $f = 25$ МГц; б) - $f = 100$ МГц.

При $r_\xi/r_L = 3$ ($r_L = 0.5$ м; $r_\xi = 1.5$ м) и $r_\gamma/r_L = 10$ ($r_\gamma = 5$ м) для уменьшения погрешности экстраполяции поля на контуре «виртуальной» решетки до уровня погрешности описания поля на контуре АР, необходимо увеличить число используемых вспомогательных источников в 1.8 раза, см. рис. 2.

Рис. 3 дает представление о выигрыше в точности пеленгования, получаемым с использованием разработанного метода «виртуальных» решеток.

Также разработаны и исследованы методы синтеза «реальной» и «виртуальной» решеток, основанные на аппроксимации поля вблизи корпуса

носителя. Путем численного моделирования показана высокая степень инвариантности метода «виртуальной» антенной решетки к априорному знанию особенностей геометрии корпуса носителя аппаратуры радиопеленгования.

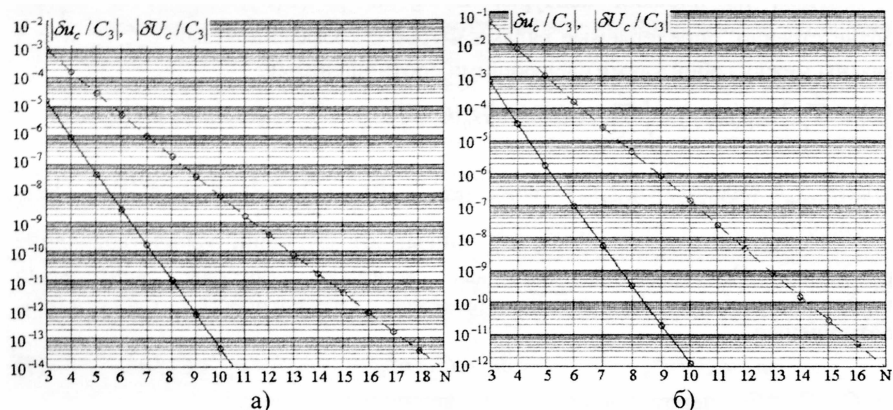


Рис. 2. Погрешности описания поля на контурах L и ξ

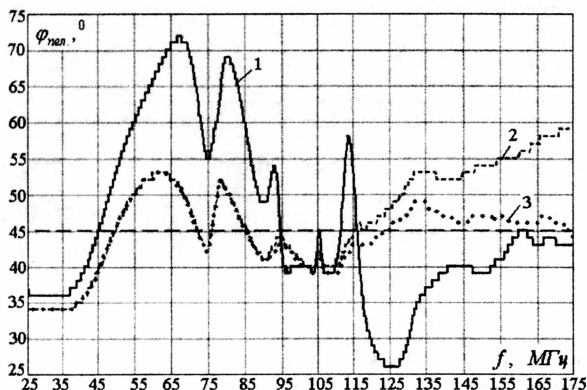


Рис. 3. Частотные зависимости пеленгов при $\varphi_{ИРИ} = 45^\circ$: 1) – АР, $N=18$, $r_L=0.5$ м; 2) – ВАР, $N=36$, $r_\xi=1.5$ м, сформирована из 9 отсчетов поля, измеренных АР (1, 3, ..., 17 элементы); 3) – ВАР, $N=36$, $r_\xi=1.5$ м, сформирована из 18 отсчетов поля, измеренных АР

Приведены результаты, свидетельствующие о повышении точности пеленгования источников радиоизлучения в сверхширокой полосе частот, до 2+4 раз, полученные с использованием натуральных измерений сигналов в полевых условиях с помощью радиопеленгатора, базирующегося на шасси микроавтобуса, разработанного и серийно выпускаемого НПП ЗАО «ИРКОС» (г. Москва).

В третьей главе проводилось исследование перспективных направлений совершенствования мобильных и стационарных радиопеленгаторов, основанных на совершенствовании характеристик используемых антенных решеток.

Сформулированы критерии структурного синтеза антенной системы: минимизация взаимного влияния $|s_{1,2}^{e,e}| = |s_{2,1}^{e,e}| \rightarrow \min$ элементов 1 и 2, функционирующих в режиме приема волн с вертикальной и горизонтальной поляризациями; минимизация суммарной длины фидерных линий $\sum_k L_k \rightarrow \min$; равенство длин фидерных линий $L_i = L_j$; $i, j = 1, \dots, N$; максимизация отношения эффективного объема V_n^3 каждого элемента к геометрическому объему V_{AP}^2 решетки: $V_n^3 / V_{AP}^2 \rightarrow \max$; минимизация угла, в котором максимальный коэффициент усиления $\max(G_k)$ меньше заданного уровня G_0 : $\sum \Omega_i |_{\max(G_k) < G_0} \rightarrow \min$; обеспечение перекрытия диаграмм направленности элементов по уровню коэффициента усиления, не ниже минимально заданного $G_n(\pi/N) \geq G_{\min}^0$.

Предложены следующие критерии параметрического синтеза АР: минимизация отклонения главного лепестка ДН ее элементов: $|\theta_{\max} - \pi/2| \rightarrow \min$; минимизация уровня боковых и задних лепестков ДН: $G_{\max}^{\text{бок., зад.}} / G_{\max}^{\text{главн.}} \rightarrow \min$; минимизация разницы коэффициентов усиления элементов, принимающих волны ортогональных поляризаций: $|G_{\max}^{\text{верт.}} - G_{\max}^{\text{гор.}}| \rightarrow \min$; улучшение качества согласования СВЧ элементов: $KCBN_k \rightarrow \min$.

Разработана антенная система мобильного радиопеленгатора с повышенным энергетическим потенциалом, обеспечиваемым, в низкочастотной области, благодаря эффективному использованию токов корпуса носителя (емкостной связи между гибридным элементом АР «несимметричный вибратор - кольцо» и боковыми стенками корпуса носителя), а в УКВ и СВЧ диапазонах волн – использованию направленных элементов; а также – обладающая возможностью приема волн с произвольной поляризацией, рис. 4.

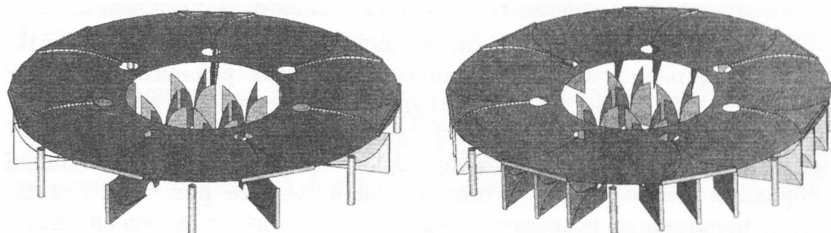


Рис. 4. Варианты конструкции высокопотенциальной многодиапазонной мобильной радиопеленгаторной антенной системы

На рис. 5 отображены амплитуды напряжений, наведенных на сопротивления нагрузки $R_n = 1000 \text{ Ом}$ модифицированных элементов АР (падает вертикально-поляризованная волна: $\varphi_{\text{ИРП}} = 45^\circ$; $\theta_{\text{ИРП}} = 90^\circ$; корпус носителя (микроавтобус) характеризуется габаритными размерами $5 \times 2 \times 2 \text{ м}^3$).

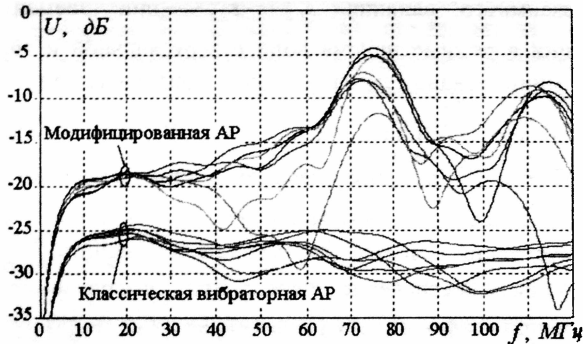


Рис. 5. Повышение действующей высоты модифицированных элементов антенной решетки с диаметром 1 м и высотой 0.15 м благодаря наличию диска

Учитывая различия в распределении токов по диску (рис. 6), оптимальным методом пеленгования волн с априорно неизвестной поляризацией является вычисление коэффициента взаимной корреляции между измеренным $U_n^{\text{изм.}}$ и опорным $U_n^{\text{опорн.}\Sigma}(\varphi, \theta, \beta)$ распределениями амплитуд:

$$k_r(\varphi, \theta, \beta) = \frac{\left| \sum_{n=1}^N U_n^{\text{изм.}} \cdot \overline{U_n^{\text{опорн.}\Sigma}(\varphi, \theta, \beta)} \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |U_n^{\text{изм.}}|^2 \cdot \sum_{n=1}^N |U_n^{\text{опорн.}\Sigma}(\varphi, \theta, \beta)|^2}} \rightarrow \max(\text{var}: \varphi, \theta, \beta), \quad (10)$$

где: N - число элементов антенной решетки; $\varphi \in [0; 2\pi]$, $\theta \in [0; \pi]$, $\beta \in [0; \pi]$; $U_n^{\text{опорн.}\Sigma}(\varphi, \theta, \beta) = \sin(\beta) \cdot U_n^{\text{опорн.верт.}}(\varphi, \theta) + \cos(\beta) \cdot U_n^{\text{опорн.гор.}}(\varphi, \theta)$; $U_n^{\text{опорн.верт.}}(\varphi, \theta)$ и $U_n^{\text{опорн.гор.}}(\varphi, \theta)$ - компоненты векторов опорных сигналов, соответствующих случаям вертикальной и горизонтальной поляризации падающей волны.

Предложенный метод пеленгования позволяет не только оценить, с высокой точностью, угловые координаты источников радиоизлучения, но и оценить параметры, характеризующие вид поляризации принимаемых волн.

Разработаны и исследованы антенные решетки, состоящие из симметричных электрических вибраторов, возбуждаемых с помощью неоднородных шелевых линий с потерями на излучение, рис. 7, а). Показано, что их использование позволяет сократить число литер антенной системы комплексов радиопеленгации, существенно уменьшить габаритные размеры антенной системы и повысить чувствительность аппаратуры в высокочастотной области, рис. 7, б).

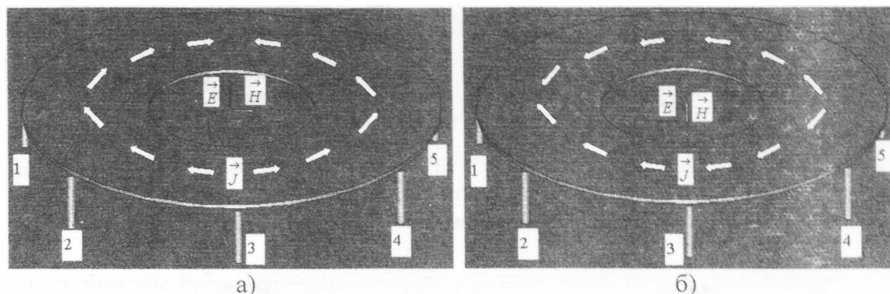


Рис. 6. Распределения токов по диску: а) – при падении вертикально-поляризованной волны; б) – горизонтальная поляризация падающей волны

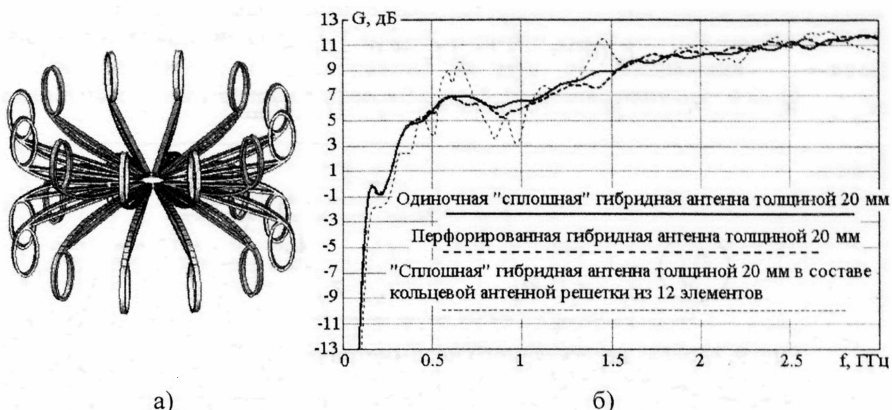


Рис. 7. АР из 12 гибридных элементов (а); коэффициент усиления одиночных элементов (длина – 465 мм; полный размах плеч – 640 мм; максимальная ширина щели – 250 мм) и элемента в составе решетки (б)

В четвертой главе проведены разработка и исследование радиопеленгаторных антенных решеток УКВ и СВЧ диапазонов волн, состоящих из направленных элементов. Разработана методика синтеза и анализа кольцевых радиопеленгаторных АР, состоящих из несимметричных ТЕМ- рупоров со средним входным сопротивлением 100 Ом, рис. 8, а) и 50 Ом, рис. 8, б).

Для упрощения параметрического синтеза уединенного ТЕМ- рупора со средним входным сопротивлением 50 Ом, была использована модель (рис. 9), основанная на учете лишь основной, ТЕМ- моды, существующей в ступенчатой несимметричной полосковой линии с RC – нагрузкой на ее конце, рис. 10-12.

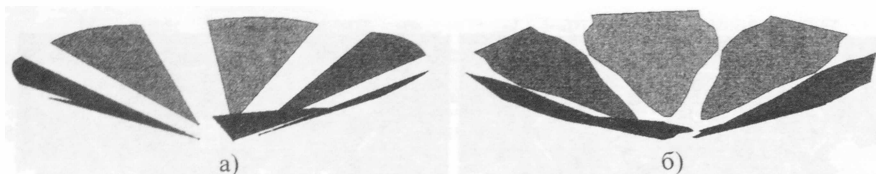


Рис. 8. Кольцевые АР из несимметричных ТЕМ- рупоров: а) – секторные элементы; б) – элементы, синтезированные с помощью генетического алгоритма

Использовалась целевая функция, реализующая критерий минимизации среднеквадратического значения модуля коэффициента отражения на входе антенны (параметрами вариации являлись значения ширины рупора $W_1, W_2, \dots, W_M$ (см. рис. 12) на расстояниях $z_1, \dots, z_M$ от точек его запитки):

$$F_{\text{ц}}(\vec{W}) = \sum_{m=1}^M |s_{11}(f_m, \vec{W})|^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где f_m - значения частот рабочего диапазона $\Delta f = [f_{\min}; f_{\max}]$.

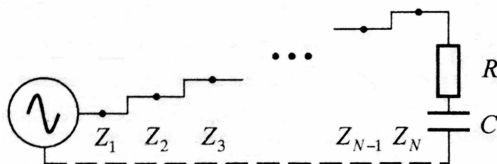


Рис. 9. Модель нерегулярного несимметричного ТЕМ- рупора

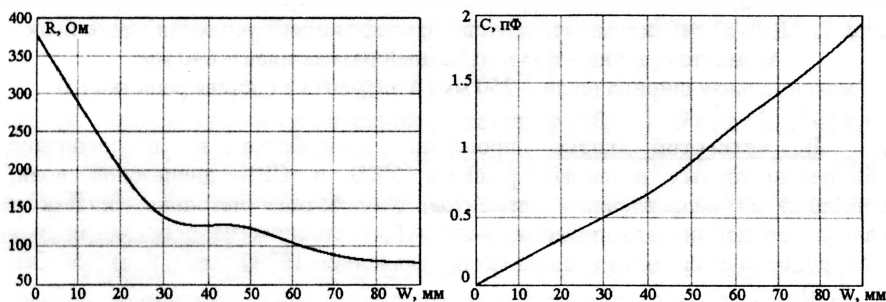


Рис. 10. Оптимальные значения параметров R и C для $\Delta f = [1; 8]$ ГГц

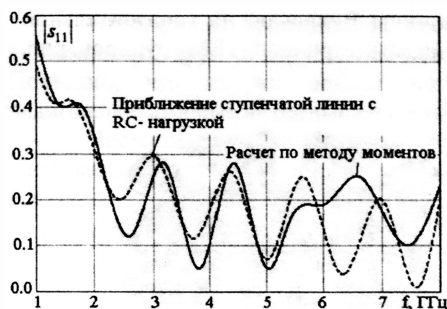


Рис. 11. Оценка адекватности и области применимости модели

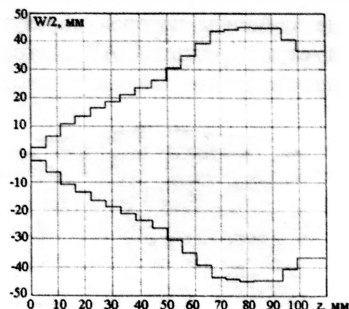


Рис. 12. Синтезированная форма лестника TEM-рупора с высотой $H=45$ мм

Частотные зависимости КСВН секторного и синтезированного TEM-рупоров показаны на рис. 13. Степень взаимной связи синтезированных TEM-рупоров в составе АР отображена на рис. 14. Направленные свойства одиночных элементов и в составе АР (рис. 8, б) иллюстрируются рис. 15.

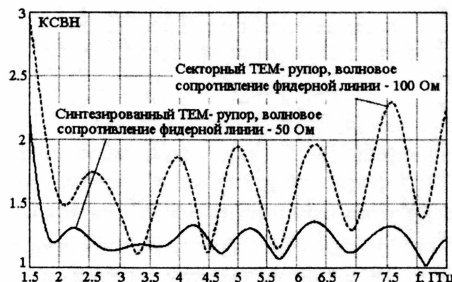


Рис. 13. КСВН секторного и синтезированного TEM-рупоров

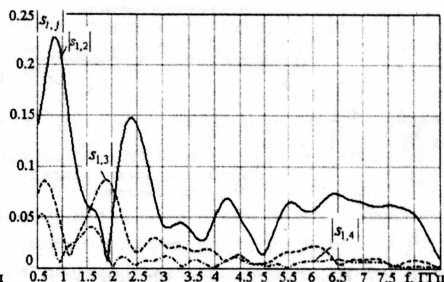


Рис. 14. Коэффициенты взаимной связи синтезированных TEM-рупоров в АР

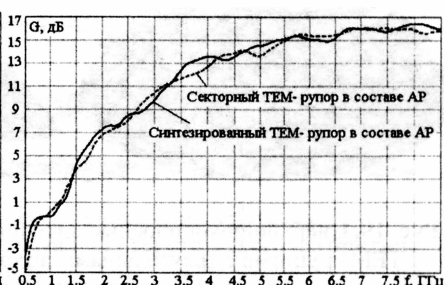
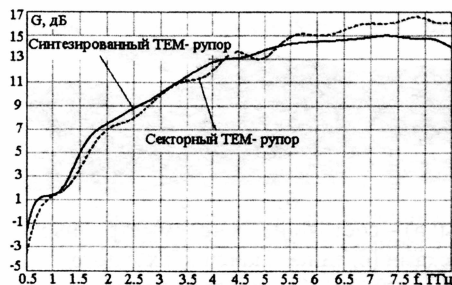


Рис. 15. Зависимости коэффициентов усиления TEM-рупоров от частоты

Предложены варианты построения антенной системы для полноазимутального пеленгования источников радиоизлучения с произвольной поляризацией, основанные на размещении печатной антенной решетки,

соседние элементы которой образуют антенны Вивальди, на горизонтальной оси симметрии кольцевой АР, состоящей из симметричных ТЕМ- рупоров, рис. 16-18.

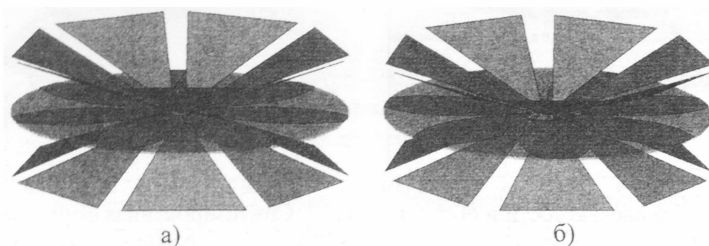


Рис. 16. Антенные решетки для приема волн вертикальной и горизонтальной поляризации: а) – с совмещенными осями симметрии элементов ортогональной поляризации; б) – с разнесенными осями симметрии

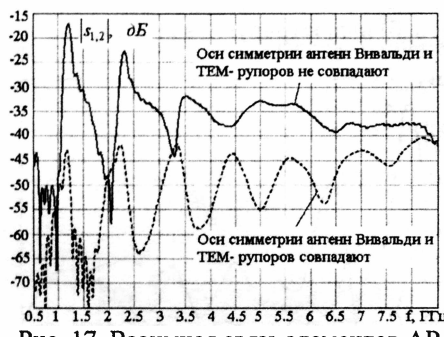


Рис. 17. Взаимная связь элементов АР

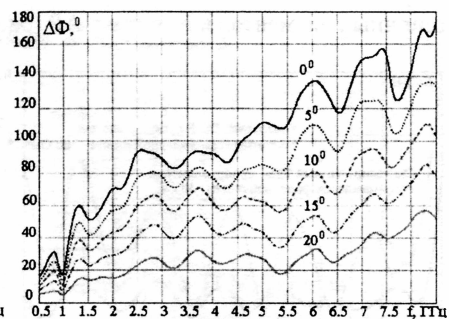


Рис. 18. Сдвиг фаз между соседними рупорами для различных азимутов ИРИ

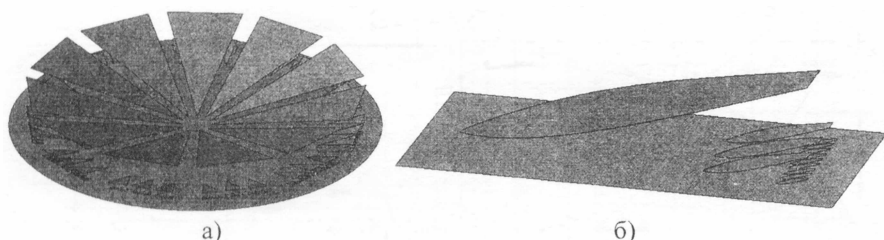


Рис. 19. Сверхширокополосные антенны: а) – состоящие из несимметричных ТЕМ- рупоров с треугольными полосками (среднее значение входного сопротивления каждого элемента – 100 Ом); б) – состоящие из несимметричных ТЕМ- рупоров с экспоненциальной продольной зависимостью волнового сопротивления и средним входным сопротивлением 50 Ом

Предложены принципы построения антенных структур, образованных вложенными друг в друга несимметричными ТЕМ- рупорами, рис. 19. Показано, что на их основе могут быть созданы многодиапазонные радиопеленгаторные антенные системы, рис. 19, а).

Частотные зависимости КСВН и коэффициента усиления несимметричного рупора с длиной 200 мм, высотой 50.5 мм и шириной раскрыва 100 мм, а также его аналога, внутри которого расположены 12 подобных элементов, показаны на рис. 20.

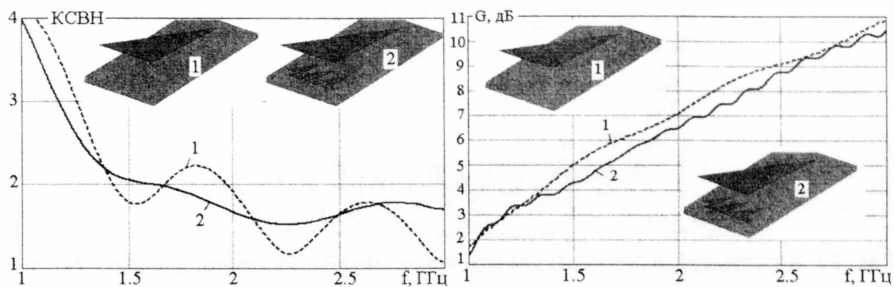


Рис. 20. КСВН и коэффициенты усиления одиночного несимметричного ТЕМ- рупора (1) и его многодиапазонного аналога (2)

Также создан и исследован метод синтеза согласующего полоскового трансформатора для сверхширокополосной антенны СВЧ диапазона (рассмотрен пример конического ТЕМ- рупора с длиной 133 мм и диаметром раскрыва 120 мм, внутри которого помещена линза из фторопласта глубиной 64 мм, предназначенного для функционирования в полосе частот от 1 до 18 ГГц). Ее отличием является непосредственный выбор геометрических параметров ступенчатой полосковой линии с помощью генетического алгоритма (рис. 21) и отсутствие необходимости синтеза эквивалентной неоднородной линии передачи с волновым сопротивлением $z_e(l, \omega)$ и коэффициентом фазы $\beta(l, \omega)$, что гарантирует ее реализуемость и повторяемость характеристик.

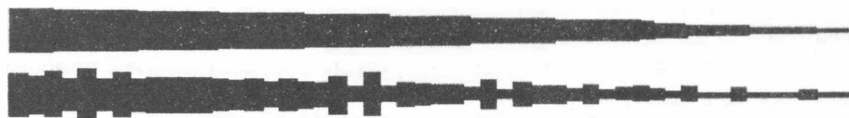


Рис. 21. Топология экспоненциального трансформатора (вверху) и трансформатора, синтезированного с помощью генетического алгоритма (внизу)

На рис. 22 показаны частотные зависимости КСВН исследуемой антенны с экспоненциальным полосковым трансформатором длиной 150 мм, выполненным на подложке с $\epsilon_r = 2.5$; антенны трансформатором,

синтезированным с помощью разработанной методики, и экспоненциального трансформатора, нагруженного на сопротивление 150 Ом (среднее входное сопротивление антенны).



Рис. 22. Анализ эффективности синтезированного полоскового трансформатора

В пятой главе исследовано функционирование антенн аппаратуры радиоконтроля в многосигнальном режиме. Показана возможность совершенствования алгоритмов сверхразрешения некоррелированных источников радиоизлучения путем учета искажений структуры измеряемого поля радиопеленгаторной антенной системой.

В разработанной модификации алгоритма MUSIC предложено использовать вместо автокорреляционной матрицы сигналов X_m , принимаемых антенной решеткой, функциональную матрицу, элементы которой зависят от фазовых характеристик направленности вибраторов $\Phi_m(\varphi) = \exp[i \cdot \arg(D_m(\varphi))]$:

$$A_{m,k}(\varphi) = M \{ X_m \cdot X_k^* \} \cdot \Phi_m^*(\varphi) \cdot \Phi_k(\varphi). \quad (12)$$

Рис. 23 иллюстрирует сохранение высокой разрешающей способности пеленгования, при использовании модифицированного алгоритма MUSIC, даже на частотах собственных резонансов антенной системы (число элементов – 9; диаметр решетки – 300 мм; полная длина вибратора – 150 мм; диаметр вибратора – 15 мм; зазор между точками запитки вибратора – 15 мм).

Частотные зависимости вычисленных пеленгов, полученные с помощью классического и модифицированного методов MUSIC, свидетельствуют о том, что последний позволяет снизить их СКО (σ) более, чем в 2 раза, рис. 24.

Также исследован модифицированный алгоритм сверхразрешения коррелированных источников радиоизлучения с компенсацией погрешностей измерения параметров входных сигналов, вызванных дифракционными явлениями. Его отличием является использование опорных сигналов, сформированных с учетом дифракционных искажений наблюдаемой картины поля.



Рис. 23. Сохранение высокой разрешающей способности на резонансной частоте

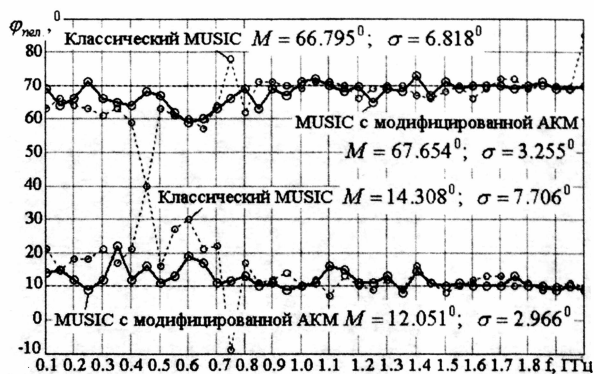


Рис. 24. Сравнение точности пеленгования базового и предлагаемого методов

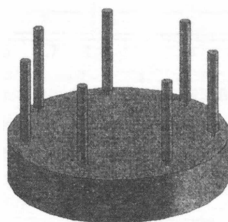


Рис. 25. Моделируемая антенная решетка

Результаты исследований базового и модифицированного алгоритмов показали, что последний позволяет разрешать источники вне зависимости от сдвига фаз между ними, в условиях сильных искажений наблюдаемого поля антенной системой, рис. 25 (число несимметричных вибраторов – 7; диаметр антенной решетки – 300 мм; длина плеч вибраторов – 150 мм). Снижение среднеквадратической ошибки пеленгования в полосе частот от 0.5 до 2 ГГц иллюстрирует нижеприведенная таблица.

Метод	$\sigma 1, ^\circ$	$\sigma 2, ^\circ$	Сдвиг фаз, $^\circ$
Базовый	2.9	5.37	0
Модифицированный	2	1.22	0
Базовый	3.83	2.34	45
Модифицированный	2.04	2.21	45
Базовый	3.67	2.81	90
Модифицированный	1.19	1.33	90

В шестой главе изложены результаты экспериментальных исследований разработанных антенн и сформулированы требования к параметрам приемной антенной системы радиопеленгаторного комплекса.

Исследованы характеристики модифицированной антенны Вивальди (рис. 26, а; рис. 27, а) и гибридного антенного элемента (рис. 26, б; рис. 27, б; рис. 28), представляющего собой сверхширокополосный симметричный электрический вибратор, запитываемый расширяющейся щелевой линией.

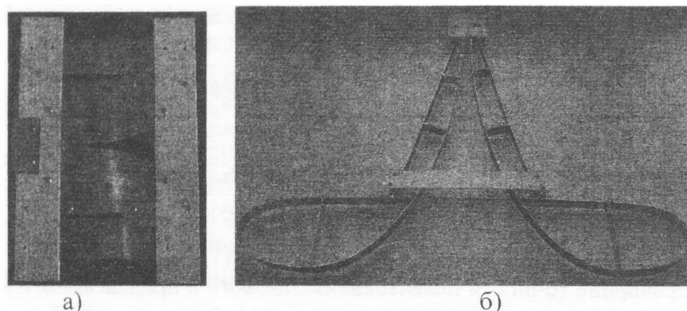


Рис. 26. Макеты сверхширокополосных направленных антенных элементов

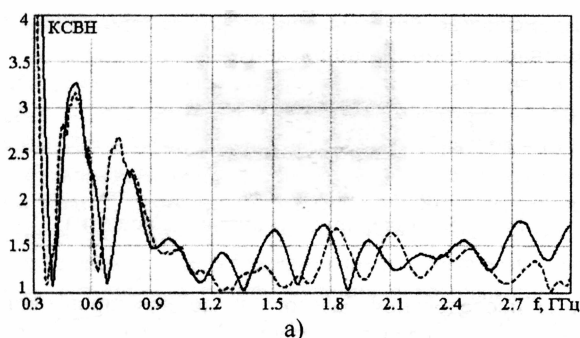


Рис. 27. Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (пунктирные) частотные зависимости КСВН сверхширокополосных направленных элементов

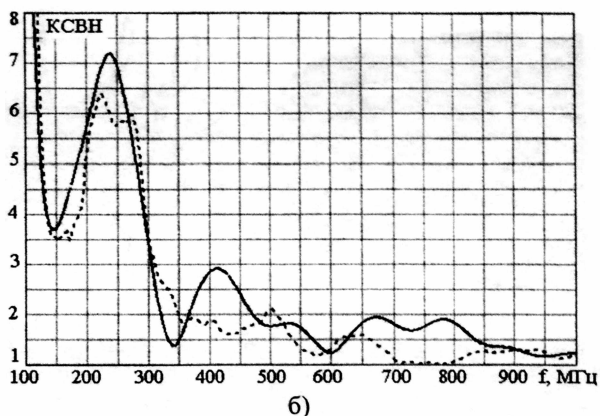


Рис. 27. – продолжение

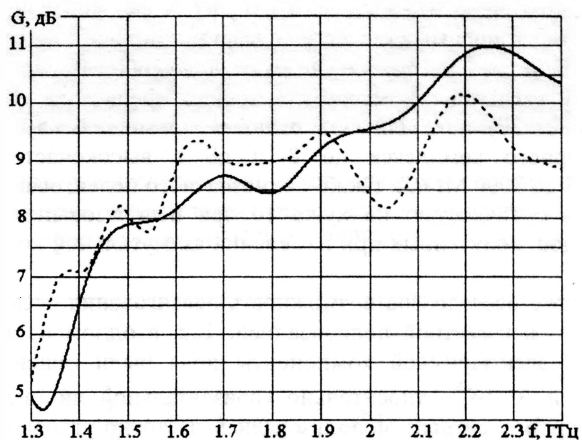


Рис. 28. Расчетная (антенна расположена в свободном пространстве) и экспериментальная (измерения проводились в условиях лаборатории, не являющейся безэховой камерой) зависимости коэффициента усиления гибридного элемента

На их основе созданы мобильная (рис. 29, а) и стационарная (рис. 29, б) радиопеленгаторные антенные решетки, позволяющие повысить чувствительность комплексов радиоконтроля на до $3\div 10$ дБ на частотах выше 300 МГц.

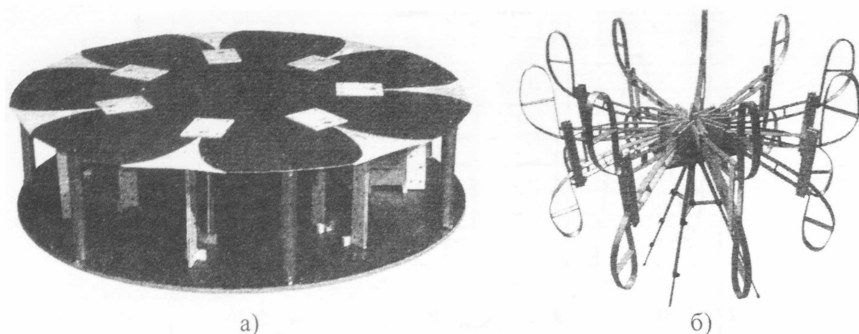


Рис. 29. Макеты радиопеленгаторных АР с направленными элементами

Путем статистического моделирования показано, что при среднеквадратическом отклонении измерений амплитуд колебаний, равном 1 дБ и среднеквадратическом отклонении измерения фаз колебаний, равном 3^0 , максимальные погрешности измерения пеленга в полосе частот от 25 до 90 МГц не превышают $3 \div 5^0$, а в полосе частот от 90 до 3000 МГц – $1 \div 2^0$.

Полевые испытания макета антенной решетки с гибридными элементами (рис. 30) показали возможность повышения чувствительности радиопеленгаторного комплекса до 8-10 дБ в высокочастотной области диапазона от 25 до 3000 МГц, а также - однозначного пеленгования источников радиоизлучения с точностью не хуже 10 при использовании базы данных опорных сигналов, полученных при изменении азимутальной координаты ИРИ с шагом 10.

Была также исследована возможность пеленгования электромагнитных волн с априорно неизвестной поляризацией. Так, в одном из экспериментов силовые линии электрической компоненты поля были ориентированы под углами $\alpha = 45^0$ и $\alpha = 135^0$ относительно горизонтальной линии, а в качестве векторного опорного сигнала использовались частотно-угловые зависимости амплитуд и фаз напряжений на выходах элементов антенной системы, измеренные при вертикальной поляризации падающей волны ($\alpha = 90^0$). Было установлено, что в полосе частот от 0.2 до 3 ГГц типовое значение среднеквадратической ошибки измерения пеленгов не превышало 10, а максимальное значение СКО было равным 2.10, рис. 31.

Объяснением возможности пеленгования волн с произвольной поляризацией является достаточно низкий уровень интенсивности приема кросс-поляризованных волн (с горизонтальной поляризацией): типичное значение уровня кросс-поляризации составляет -20 дБ; максимальное не превышает -15 дБ в полосе частот от 25 до 3000 МГц.

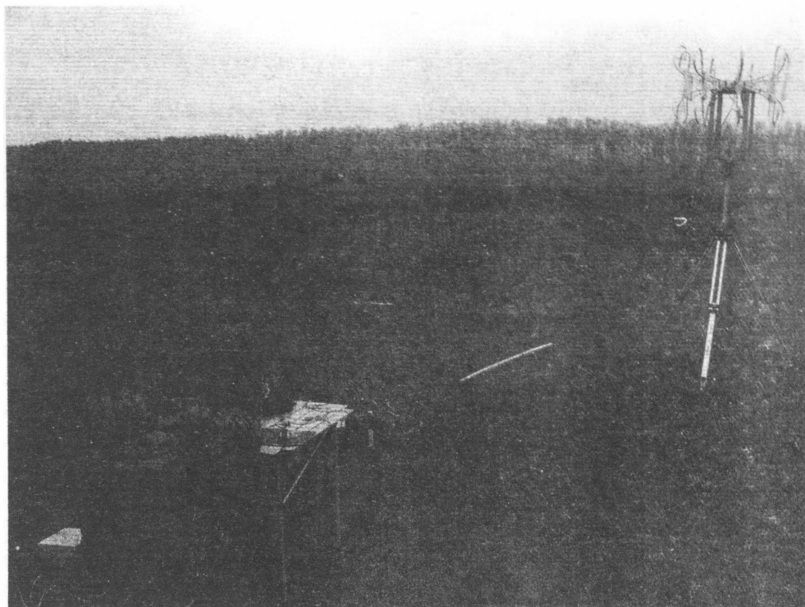


Рис. 30. Проведение исследований макета антенной системы с гибридными элементами в составе радиопеленгаторного аппаратно-программного комплекса производства НПП ЗАО «ИРКОС» (г. Москва)

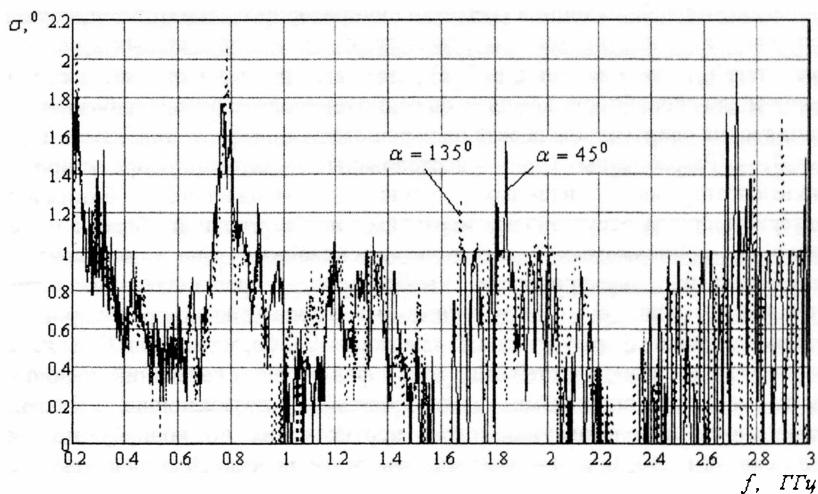


Рис. 31. Частотные зависимости СКО измеренных пеленгов: падающие ЭМВ со смешанной поляризацией ($\alpha = 45^\circ$ и $\alpha = 135^\circ$); опорные колебания измерены при вертикальной поляризации ($\alpha = 90^\circ$)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации разработаны теория и методы проектирования сверхширокополосных радиопеленгаторных антенных систем, базирующиеся на учете дифракционных искажений измеряемого электромагнитного поля, в явной форме - путем калибровки, или в неявной форме – с помощью формирования «виртуальных» антенных решеток, а также – на использовании ряда подходов, позволяющих существенно уменьшить их габаритные размеры, расширить угловой сектор их функционирования, обеспечить возможность эффективного приема и оценки параметров радиоволн с произвольной поляризацией, и существенно повысить чувствительность приемных антенных систем и точность оценки угловых координат источников радиоизлучения. Результаты исследований использованы при разработке аппаратуры радиоконтроля стационарного и мобильного базирования, выпускаемой НПП ЗАО «ИРКОС» (г. Москва).

В диссертации получены следующие основные результаты.

1. На основе проведенного анализа достижений в области создания радиопеленгаторных антенных систем и устройств, а также – методов и алгоритмов реально-временной обработки принимаемых ими сигналов, выявлены наиболее значимые имеющиеся проблемы, поставлены основные задачи исследований и намечены перспективные пути их решения.

2. С использованием методов теории функций комплексного переменного и электродинамики, путем систематизации методов и моделей аппроксимации пространственного распределения поля вблизи корпуса носителя радиопеленгаторной антенной решетки вибраторного типа, не требующих использования информации о геометрии и материальных свойствах рассеивателей, и позволяющих, в $(2\div 4)$ раза, повысить точность пеленгования и разрешающую способность комплексов радиоконтроля мобильного базирования, создана теория «виртуальных» антенных решеток.

3. Разработаны и исследованы методы проектирования радиопеленгаторных антенных решеток мобильного базирования, характеризующихся отсутствием «мертвой» зоны в зенитной области и метод обработки принимаемых сигналов, основанные на использовании несимметричных электрических вибраторов, представляющих собой вертикальные цилиндры, нагруженные на горизонтально-ориентированные пластины (имеющие форму круга или «флажков»), и формировании базы данных частотно-угловых зависимостей амплитуд и фаз опорных колебаний, наводимых волнами с ортогональными поляризациями, позволяющие, благодаря рациональному использованию токов, протекающих по корпусу носителя, существенно (на $5\div 10$ дБ) повысить чувствительность радиопеленгаторного комплекса мобильного базирования, и дающие возможность оценки угловых координат источника радиоизлучения с точностью $(1\div 2)^\circ$, а также - вида поляризации принимаемых радиоволн.

4. Разработан и исследован метод проектирования кольцевой радиопеленгаторной антенной решетки, основанный на построении ее элементов в виде плоских сверхширокополосных электрических вибраторов, запитываемых неоднородными шелевыми линиями с потерями на излучение, использование которого позволило разработать антенную решетку, функционирующую в полосе частот с коэффициентом перекрытия более 100, позволяющий повысить чувствительность приемной антенной системы на значения, достигающие 10 дБ.

5. Разработаны и исследованы методы проектирования кольцевых радиопеленгаторных антенных решеток, состоящих из: несимметричных ТЕМ-рупоров с входным сопротивлением 50 Ом, характеристики которых оптимизируются с генетического алгоритма; полосковых антенных элементов в печатном исполнении, соседние пары которых функционируют как антенны Вивальди, а противоположные – как симметричные электрические вибраторы; комбинации вертикальных симметричных ТЕМ-рупоров и полосковой многолепестковой структуры, расположенной внутри рупорных элементов, несущественно искажающих направленные свойства и входные характеристики друг друга; применение которых дает возможность реализовать значения коэффициента усиления элемента в составе решетки от 4 до 16 дБ в полосе частот от 1.5 до 8.5 ГГц.

6. Разработан и апробирован подход к проектированию многодиапазонных радиопеленгаторных антенных структур, образованных вложенными друг в друга несимметричными ТЕМ-рупорами, основанный на незначительном возмущении структуры электромагнитного поля внутри внешнего антенного элемента помещенными внутрь его подобными ему излучателями, а также - подрешетками меньшего размера, полосы элементов которых ориентированы ортогонально силовым линиям электрического поля, позволяющий разрабатывать антенные системы полноазимутального обзора, функционирующие в нескольких сверхширокополосных диапазонах волн, и реализовать значения коэффициента подобия вложенных элементов вплоть до 0.5 при изменении коэффициента усиления внешнего элемента, относительно уединенного аналога, не более 0.5 дБ в полосе частот с более, чем пятикратным перекрытием.

7. Предложена и апробирована методика существенного (более, чем в 2 раза) повышения разрешающей способности и точности оценки угловых координат нескольких некоррелированных или коррелированных источников радиоизлучения в аппаратно-программных комплексах радиоконтроля, в которых реализованы методы пространственно-углового сверхразрешения, основанная на учете искажений структуры наблюдаемого поля антенной системой и ее носителем, путем формирования базы данных эталонных сигналов на выходах элементов антенной решетки, либо на основе использования модифицированной функциональной матрицы, элементы которой образованы на основе автокорреляционной матрицы принимаемых сигналов и комплексных диаграмм направленности вибраторов в составе решетки.

8. Разработан и исследован метод синтеза полоскового трансформатора для согласования комплексной нагрузки в сверхширокой полосе частот,

реализованный на основе использования генетического алгоритма, упрощенной модели соединения отрезков полосковой линии различной ширины и увеличивающейся, от этапа к этапу оптимизации, нормы усреднения значений модуля коэффициента отражения на его входе, позволяющий существенно уменьшить максимальный и средний уровень коэффициента стоячей волны на входе конического ТЕМ- рупора с линзой, запитанного с помощью разработанного согласующего устройства, в полосе частот от 1 до 18 ГГц, относительно случая использования экспоненциального полоскового трансформатора.

9. Проведены экспериментальные исследования комплексов радиоконтроля, оснащенных разработанными антенными системами и специальным программным обеспечением, в котором реализованы методы и модели реально-временной обработки принимаемых сигналов, учитывающие дифракционные искажения измеряемого электромагнитного поля. Показано, что их использование позволяет: уменьшить число литер антенной системы; существенно повысить чувствительность комплексов в СВЧ диапазоне волн (до 3+10 дБ); существенно увеличить точность пеленгования (до 2÷4 раз).

Результаты работы изложены в 76 публикациях, из них по перечню ВАК РФ для публикации результатов докторских диссертаций – 56.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Использование интеграла Кирхгофа для формирования «виртуальной» антенной решетки вблизи произвольного рассеивателя // Антенны. 2009. № 8. С. 40-46.

2. Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Аппроксимация компонент поля и тока внутри плоского замкнутого контура по их известным значениям на контуре с помощью интеграла Коши // Антенны. 2009. № 10. С. 5-10.

3. Исследование эффективности метода «виртуальной» антенной решетки при изменении геометрии корпуса носителя мобильного радиопеленгатора / А.В. Ашихмин [и др.] // Антенны. 2010. № 1(152). С. 49-54.

4. Исследование физико-математической модели, описывающей «виртуальную» антенную решетку, сформированную вблизи трехмерного рассеивателя / А.В. Ашихмин [и др.] // Антенны. 2010. № 6 (157). С. 43-59.

5. Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Метод восстановления электромагнитного поля на плоскости вблизи трехмерного рассеивателя // Антенны. 2007. № 7(122). С. 43-48.

6. Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Метод синтеза «виртуальной» антенной решетки и исследование возможности ее использования для совершенствования характеристик мобильных и стационарных радиопеленгаторов // Антенны. 2008. № 10(137). С. 34-46.

7. Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Методика повышения инструментальной точности мобильных радиопеленгаторов, основанная на оптимальном выборе координат элементов «виртуальной» антенной решетки // Антенны. 2009. № 9. С. 44-51.

8. Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Структура поля в области расположения кольцевой антенной решетки мобильного базирования // Антенны. 2007. № 1(116). С. 30-34.
9. Исследование возможности использования принципа фрактальности для построения многодиапазонных сверхширокополосных антенных структур на основе ТЕМ- рупоров, размещенных внутри друг друга / А.В. Ашихмин [и др.] // Антенны. 2008. № 2(129). С. 32-38.
10. Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Амплитудно-фазовое пеленгование источников СВЧ- радиоизлучения с произвольной поляризацией с помощью кольцевой антенной решетки из ТЕМ- рупоров и антенн Вивальди // Антенны. 2008. № 3(130). С. 44-49.
11. Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Рембовский Ю.А. Проектирование антенных систем мобильных комплексов радиопеленгации // Антенны. 2008. № 3(130). С. 50-59.
12. Рембовский Ю.А. Разработка и исследование антенной системы мобильного радиопеленгатора с повышенной чувствительностью и возможностью приема волн с произвольной поляризацией // Антенны. 2008. № 7-8(134-135). С. 16-27.
13. Использование электрических вибраторов, запитываемых щелевыми линиями, для повышения чувствительности и снижения числа литер приемной антенной системы / А.В. Ашихмин [и др.] // Антенны. 2008. № 7-8(134-135). С. 36-43.
14. Планарная антенная система для полноазимутального пеленгатора волн с горизонтальной поляризацией с возможностью формирования квазигольчатых и квазиторoidalных парциальных диаграмм направленности / А.В. Ашихмин [и др.] // Антенны. 2008. № 10(137). С. 47-51.
15. Рембовский Ю.А. Методика снижения систематической погрешности алгоритма сверхразрешения MUSIC на основе учета направленных свойств элементов антенной решетки // Антенны. 2008. № 7-8(134-135). С. 95-100.
16. Синтез полоскового согласующего трансформатора для сверхширокополосной СВЧ- антенны с помощью генетического алгоритма / А.В. Ашихмин [и др.] // Антенны. 2009. № 2. С. 41-46.
17. Использование регулярных и нерегулярных несимметричных ТЕМ- рупоров для построения радиопеленгаторных антенных решеток кругового обзора / А.В. Ашихмин [и др.] // Антенны. 2009. № 6. С. 48-54.
18. О возможности построения многодиапазонных антенных решеток, образованных вложенными несимметричными ТЕМ- рупорами / А.В. Ашихмин [и др.] // Антенны. 2009. № 11. С. 24-29.
19. Исследование кольцевой радиопеленгаторной антенной решетки, состоящей из экспоненциально расширяющихся щелевых элементов, нагруженных широкополосными электрическими вибраторами. / А.В. Ашихмин [и др.] // Антенны. 2010. № 6 (157). С. 60-66.

Подписано к печати 14.11.11. Заказ № 780
Объем 2,0 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5
(499) 263-62-01

ДЛЯ ЗАМЕТОК