

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, доцента РАЗИНЬКОВА Сергея Николаевича на диссертацию САФОНОВА Фёдора Сергеевича «Многолучевые антенные решетки с диаграммообразующей схемой на основе линзы Ротмана для систем радиопеленгации и связи», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена необходимостью создания методики проектирования многолучевых антенных решеток для систем радиопеленгации и связи, функционирующих в режиме многоканального приема и обработки сигналов.

Использование многолучевых антенных решеток с диаграммообразующими схемами (ДОС) на основе линзы Ротмана в настоящее время является перспективным в силу ряда причин, основными из которых являются следующие:

- малая техническая сложность конструкции ДОС, реализуемой с использованием технологии производства печатных плат, и возможности существенного уменьшения ее массогабаритных характеристик при использовании свернутой линзы Ротмана;

- высокие показатели пространственно-частотной избирательности приема сигналов, достижимые за счет реализации принципов квазиоптического формирования диаграмм направленности (ДН), а также чувствительности аппаратуры радиопеленгации и связи и разрешающей способности по угловым координатам источников радиоизлучения, обусловленные использованием направленных антенных систем;

- возможности реализации режима ММО – Multiple input – multiple output при приеме сигналов вследствие малых значений коэффициентов пространственной корреляции ДН многолучевой антенной системы.

Методические основы построения многолучевых антенных решеток, заложенные в трудах докторов технических наук Бахраха Л.Д., Воскресенского Д.И., Сазонова Д.М., применительно к системам радиопеленгации и связи получили развитие в работах докторов технических наук Башлы П.Н., Мануилова Б.Д.

Модели и методики исследования и определения параметров конструкций ДОС линзового типа представлены в публикациях докторов технических наук Авдеева В.Б., Михайлова Г.Д., Пастернака Ю.Г.

Базовые технологии построения многолучевых линзовых антенных систем и способы их миниатюризации за счет рационального выбора профиля и электрофизических параметров композитных материалов для изготовления линз обоснованы в трудах докторов технических наук Бузова А.Л., Минкина М.А., докторов физико-математических наук Ключева Д.С., Нещерета И.М.

Вместе с тем, ввиду постоянного ужесточения тактико-технических требований по устойчивости и надежности функционирования систем радиопеленгации и связи сохраняется практическая важность решения ключевых вопросов, связанных с совершенствованием проектирования антенных систем:

- повышение точности пеленгования источников радиоизлучений и разрешающей способности по угловым координатам за счет использования направленных элементов антенной системы;

- улучшение чувствительности и пространственно-частотной избирательности приемной аппаратуры в полосе частот, включающей в себя несколько частотных диапазонов, за счет достижения высоких коэффициентов направленного действия (КНД) антенных систем при формировании многолепестковых ДН для обзора пространства в широком секторе углов.

Таким образом, тема диссертации Сафонова Ф.С. «Многолучевые антенные решетки с ДОС на основе линзы Ротмана для систем радиопеленгации и связи», посвященной развитию методик проектирования антенных систем, является актуальной.

Степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. В диссертации на основании выполненных автором исследования решена научная задача разработки методик проектирования многолучевых антенных решеток с ДОС на основе линзы Ротмана для систем радиопеленгации и связи.

Содержание работы, раскрывающее суть представленных в ней научных результатов, сформулированных на их основе выводов и рекомендаций, изложено в четырех главах.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния и передовых тенденций развития теории, техники и технологии производства антенных систем с электронным сканированием, перспективных для использования в аппаратуре радиопеленгации и связи; сформулированы основные требования к характеристикам многолучевых антенных систем. Обоснованы направления совершенствования фазированных антенных решеток в соответствии с опытом передовых разработчиков и прогнозом совершенствования элементной базы. Определены перспективные методы обработки сигналов в многоканальной приемной аппаратуре, включая методы синтеза виртуальных антенных решеток – совокупности дополнительных пространственных отсчетов принимаемых электромагнитных волн, формируемых при обработке массивов комплексных амплитуд сигналов, поступающих на элементы реальной антенной решетки. Выполнены формализованные постановки задач, решение которых необходимо для достижения цели диссертационного исследования.

Во второй главе диссертации проведен сравнительный анализ ДОС многолучевых антенных систем с одно- и двухкоординатным диаграммообразованием. Разработана методика и представлены результаты проектирования ДОС на основе печатной линзы Ротмана, реализованной по технологии симметричной и несимметричной полосковой линии. Разработана модель разворота на 180° тела линзы Ротмана, основанная на использовании метода частичных областей и метода редуцирования парных бесконечных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с учетом условия Мейкснера на острых ребрах. Показано, что наличие разворота у тела линзы Ротмана не приводит к существенному ухудшению качества согласования ее входов, а также к появлению значимых фазовых искажений сигналов на антенных входах линзы.

Третья глава диссертации посвящена исследованию перспективных путей построения фазированных антенных решеток с ДОС на основе печатной линзы

Ротмана. Исследованы конструкции печатных Е-плоскостных линейных антенных решеток, интегрированных с линзой Ротмана, состоящих из антенн Вивальди и логопериодических антенн с вибраторными элементами, возбуждаемыми симметричными полосковыми линиями. Проведен анализ варианты построения диапазонных антенных решеток с однокоординатным управлением ДН с ДОС на основе печатной линзы Ротмана. Выполнен параметрический синтез многолучевой антенной системы с сектором диаграммообразования шириной 90° с излучателем в виде ТЕМ-рупора, имеющим форму тела вращения, возбуждаемого с помощью плоской линзы Люнеберга с оболочкой, выполненной по технологии высверливания отверстий в печатной плате, возбуждаемой с помощью экспоненциальных полосковых трансформаторов

Четвертая глава диссертации посвящена разработке и исследованию многолучевых линейных антенных решеток с диаграммообразованием в Е- и Н-плоскостях, состоящих из сверхширокополосных электрических вибраторов и щелевых элементов с директорами. Разработана методика проектирования антенных решеток с учетом конструктивных особенностей их построения и питания от линзы Ротмана, тело которой сложено пополам для уменьшения габаритных размеров устройства. Показано, что для уменьшения уровня боковых лепестков приемной антенной системы, состоящей из физических и виртуальных антенных элементов, эффективным средством является формирование интерполяционной и экстраполяционной антенных решеток. Экстраполяционная антенная решетка может формироваться с целью повышения КНД антенной системы и разрешения источников радиоизлучения, не разрешимых реальной антенной решеткой.

Тематика диссертации Сафонова Ф.С. соответствует направлениям исследований, определенным паспортом специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии:

- по пункту 1 (в части решения внешних и внутренних дифракционных задач электродинамики для анализа и синтеза высокоэффективных антенн, определения их предельно-достижимых характеристик, возможных путей построения);
- по пункту 2 (в части исследования характеристик антенн для их оптимизации и модернизации, что позволяет создавать высокоэффективную технологию);
- по пункту 3 (в части исследования и разработки новых антенных систем с существенно улучшенными параметрами);
- по пункту 8 (в части исследования и разработки больших антенн с высоким усилением и антенн с уникальными характеристиками);
- по пункту 10 (в части исследований распространения радиоволн на различных трассах в природных и искусственных средах и влияние условий распространения и вида подстилающей поверхности на характеристики антенн).

К числу основных научных результатов, полученных автором на основании выполненных исследований, относятся:

- методика проектирования печатной линзы Ротмана дециметрового диапазона длин волн, тело которой сложено по прямой линии, разделяющей области линзы, подключенные через полосковые трансформаторы к антенным эле-

ментам и высокочастотному коммутатору, с целью уменьшения размеров ДОС многолучевой антенной решетки;

- математическая модель разворота на 180° в Е-плоскости печатной линзы Ротмана, основанная на использовании метода частичных областей и редуцирования бесконечной парной СЛАУ с учетом условия Мейкснера, предназначенная для расчета S-параметров СВЧ устройства;

- методика проектирования многолучевых антенных решеток дециметрового диапазона длин волн, состоящих из широкополосных плоских вибраторов с экраном и директорами и щелевых элементов с директорами, для запитки которых используется ДОС на основе печатной линзы Ротмана. Методика основана на совместном использовании методов декомпозиции, рекомпозиции и конечного интегрирования Вейланда, реализованного в пространственно-временной области;

- методика формирования интерполяционной и экстраполяционных виртуальных антенных решеток, основанная на использовании кубических сплайнов и метода линейного прогноза Бурга, позволяющая уменьшить уровень боковых лепестков ДН и повысить разрешающую способность по угловым координатам приемной антенной системы;

Высокая степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных автором, определяется тем, что они получены с использованием современных методов теории волновых процессов, антенн, электродинамики и вычислительных методов (в частности, метода конечного интегрирования Вейланда), а также статистической обработки радиоизмерений.

Достоверность и новизна научных результатов, выводов и рекомендаций. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается:

- применением теоретически обоснованных и прошедших апробацию методов исследования; использованием сертифицированных средств для проведения вычислительных и натурных экспериментов;

- корректным выбором ограничений, допущений и исходных данных из практики разработки многолучевых антенных решеток для систем радиопеленгации и связи.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается ясной физической трактовкой выявленных эффектов, их соответствием общим физическим закономерностям, совпадением результатов теоретических исследований с данными, полученными в ходе экспериментов и натурных испытаний макетов антенн. Частные результаты исследования, использованные для выполнения контрольных расчетов по разработанным методам, согласуются с результатами, содержащимися в работах других авторов.

Теоретическое обоснование полученных результатов проводилось на основе фундаментальных положений электродинамики (в частности, принципа Гюйгенса-Кирхгофа) и теории антенн. Экспериментальные данные получены с использованием стандартных методик измерения характеристик и параметров антенных решеток для систем радиопеленгации и связи, сертифицированных измерительных устройств и программных средств обработки измерительной информации.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методик анализа и синтеза многолучевых антенных решеток с ДОС на основе линзы Ротмана, а также формирования виртуальных антенных элементов – дополнительных каналов приема сигналов, на основе использования процедур интерполяции и экстраполяции пространственного распределения электромагнитного поля, измеренного с помощью элементов антенной решетки.

Ценность работы для практики определяется обоснованными техническими решениями по существенному уменьшению размеров ДОС многолучевых антенных решеток за счет реализации сложенного варианта конструкции печатной линзы Ротмана. Предложения по построению ДОС с миниатюризацией габаритов позволяют:

а) интегрировать антенные системы в архитектуру стационарных и мобильных комплексов радиопеленгации и связи;

б) существенно повысить устойчивость и надежность приемной аппаратуры за счет сокращения объема демаскирующих признаков, выявляемых средствами мониторинга, вследствие увеличения КНД и снижения уровня боковых лепестков ДН антенной решетки, повышения ее разрешающей способности по угловым координатам при формировании экстраполяционной виртуальной приемной структуры.

Предложенные автором решения строго аргументированы и критически оценены по сравнению с известными результатами в области проектирования приземных и подземных антенн.

Основные результаты диссертации прошли широкую апробацию на международных и всероссийских научных форумах по тематике исследования и в полной мере опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией.

Представленные в диссертации методики проектирования многолучевых антенных решеток для систем радиопеленгации и связи обеспечивают высокую точность определения показателей эффективности передачи-приема сигналов, что, в свою очередь, позволяет снизить ресурсные и временные затраты на изготовление опытных образцов, экспериментальные исследования, доводку и настройку антенно-фидерных устройств.

Практическая значимость результатов, полученных автором, подтверждается их реализацией (внедрением):

а) в высших учебных заведениях при организации и осуществлении учебного процесса в интересах подготовки по разработке и эксплуатации антенных систем и СВЧ-устройств (Тамбовский государственный технический университет), также проведении фундаментальных и поисковых исследований в области теории антенн (Воронежский государственный технический университет);

б) в организации оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации (акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж)) при выполнении опытно-конструкторских работ по созданию перспективных образцов радиоэлектронных комплексов.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. В нем в лаконичной форме ясно изложены основные идеи и выводы по работе, показаны определяющий вклад соискателя в проведенные исследования, степень новизны и практическая значимость результатов.

Замечания и недостатки диссертационной работы. К числу основных замечаний и недостатков работы, на наш взгляд, относятся следующие.

1. Для оценки точности решения электродинамических задач целесообразно привести значения остаточной невязки граничных условий. Для доказательства достоверности численных значений характеристик антенных систем требуется исследовать сходимость полученных решений при различных параметрах дискретизации области их поиска.

2. Большая часть электродинамических вычислений при анализе характеристик антенных решеток для систем радиопеленгации и связи выполнена в пространственно-временной области. Для анализа систематической погрешности пеленгования, вызванной рассеянием волн на антенной системе и ДОС на основе линзы Ротмана, целесообразно использовать решение электродинамических задач в пространственно-частотной области.

3. При исследовании многолучевых антенных систем желательно исследовать показатели точности многосигнального пеленгования источников радиоизлучений. В интересах корректного определения точности оценки угловых координат объектов необходимо установить количественные зависимости ее показателей от характеристик погрешностей измерений амплитуд и фаз сигналов.

4. Достижения автора могли бы быть представлены более наглядно при размещении в автореферате таблиц, позволяющих проводить сравнение параметров конструкций разработанных антенных решеток и их аналогов, используемых в системах радиопеленгации и связи,

Вместе с тем, отмеченные недостатки, непосредственно не охватывающие основные научные результаты и положения, выдвигаемые для защиты, не снижают общего позитивного впечатления от работы и не ставят под сомнение ее положительную оценку.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней. На основе анализа диссертации Сафонова Ф.С. «Многолучевые антенные решетки с ДОС на основе линзы Ротмана для систем радиопеленгации и связи» сделаны следующие выводы.

1. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная задача, связанная с развитием методических основ проектирования и совершенствованием технологий построения приемных структур. Тема исследования соответствует направлениям, определенным пунктами 1, 2, 3, 8 и 10 паспорта специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

2. Диссертация является завершенной научной работой, обладающей внутренним единством, содержит новые научные результаты, свидетельствующие о личном вкладе автора в науку. Предложенные соискателем решения строго аргументированы.

3. Работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Сафонов Ф.С., достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Согласен с включением моих персональных данных в аттестационное дело соискателя Сафонова Ф.С. и их дальнейшей обработкой.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,

профессор кафедры электрооборудования

(и оптико-электронных систем)

факультета авиационного оборудования

Военного учебно-научного центра

Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия

имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Разиньков Сергей Николаевич

«29» августа 2023 года

Подпись Разинькова С.Н. заверяю

Помо

Военн

«Воен

Н.Е. Ж

«29»

роевого отдела

центра Военно-воздушных сил

ия имени профессора

Гарина» (г. Воронеж)

А.Саввин

ния об оппоненте:

Разиньков Сергей Николаевич, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика, 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, доцент, профессор кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем) федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации.

Адрес: 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а

Телефон: 8-(473)-244-78-29

E-mail: razinkovsergey@rambler.ru