

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, доцента РАЗИНЬКОВА Сергея Николаевича на диссертацию ПЕНДЮРИНА Владимира Андреевича на тему «Защищенные приземные и подземные антенны УКВ диапазона», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Актуальность темы диссертационных исследований. Совершенствование технологий построения информационно-телекоммуникационных сетей с высокими показателями устойчивости и надежности функционирования, защищенности от деструктивных воздействий и электромагнитной совместимости аппаратуры включает в себя поиск конструктивных решений по созданию антенных систем, обладающих стабильными эксплуатационными характеристиками.

Сохранение стабильности характеристик приземных и подземных антенн УКВ диапазона затруднено ввиду их значительных габаритов, обуславливающих существенные механические нагрузки на приемоизлучающие структуры при навале почвы и неравномерность внешних условий (температуры, влажности окружающей среды, диэлектрической проницаемости подложек на различных участках).

В этой связи важное практическое значение приобретают вопросы уменьшения размеров антенн при сохранении требуемых для передачи-приема сигналов коэффициентов полезного действия и диапазонов рабочих частот. Решение данной задачи сопряжено с развитием технологий создания диапазонных импедансно-согласующих структур и киральных сред (композитных метаматериалов), обладающих свойствами деполяризации облучающих электромагнитных волн вследствие одновременно отрицательных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Методические основы анализа приземных и подземных антенн УКВ диапазона с применением методов электродинамического моделирования приемоизлучающих структур в слоистых средах с различными электрофизическими параметрами заложены в работах докторов технических наук Бузова А.Л., Букашкина С.А., Казанского Л.С., Муравьева Ю.К., Николаева В.И., Юдина В.В.

В трудах докторов физико-математических наук Неганова В.А., Табакова Д.П. при сингулярном интегральном представлении электромагнитного поля в строгой постановке краевых задач разработаны методики анализа антенн в материальных средах. Получены модифицированные уравнения Поклингтона и Халлена с непрерывностью тангенциальных составляющих электрического поля, по результатам решения которых обеспечиваются возможности исследования характеристик приемоизлучающих конструкций в дальней и ближней зонах.

Технологии миниатюризации приземных и подземных антенн, способствующие нахождению рациональных вариантов их компоновки в составе объектов, с применением искусственных композитных метаматериалов с киральными свойствами представлены в работах доктора технических наук Минкина М.А., докторов физико-математических наук Ключева Д.С., Шороховой Е.А.

Вместе с тем, ввиду постоянного ужесточения тактико-технических требований по устойчивости и надежности функционирования информационно-телекоммуникационных сетей в настоящее время остаются открытыми и требуют дальнейших исследований следующие вопросы:

- разработка методик проектирования малогабаритных приземных антенн УКВ диапазона, надежно функционирующих при мощных механических воздействиях, при изменении проводимости подстилающей поверхности в широких пределах, а также при навале грунта;
- разработка методик проектирования вибраторных приземных антенн УКВ диапазона, механическая прочность и тепловая устойчивость которых существенно выше, чем у монополей, изолированных от подстилающей поверхности;
- разработка методик проектирования приземных многолучевых антенн УКВ диапазона с полноазимутальным обзором пространства, устойчивых к мощным механическим воздействиям импульсного типа;
- разработка методик проектирования малогабаритных подземных антенн УКВ диапазона, характеристики которых сохраняют инвариантность к изменениям проводимости грунта и наличию мощных механических воздействий;
- разработка методик анализа потоков мощности электромагнитного поля в изоляторе подземной антенны с целью выявления областей пространства с повышенной проводимостью, снижающих коэффициенты полезного действия антенных устройств.

Таким образом, тема диссертации Пендюрина В.А. «Защищенные приземные и подземные антенны УКВ диапазона», посвященной развитию методических основ их проектирования в целях обеспечения устойчивости функционирования информационно-телекоммуникационных сетей, 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 приземных и подземных антенн УКВ диапазона, характеристики которых обеспечивают устойчивость информационного обмена по радиоканалам при изменении проводимости подстилающей поверхности и мощных механических воздействиях.

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 перспектив развития теории проектирования и технологий построения приземных и подземных антенн, качество согласования с фидерной линией и направленные свойства которых существенно не изменяются при изменении влажности почвы и мощных механических воздействиях. Проведен анализ перспективных путей построения электрически малых антенн УКВ диапазона с импедансно-согласующими и киральными структурами.

Во второй главе диссертации разработаны методики анализа и проектирования приземных антенн УКВ диапазона с механическими свойствами, обеспечивающими устойчивость выполнения функциональных задач в зонах располо-

жения источников мощных механических воздействий. Представлены варианты конструктивного исполнения электрически малых вибраторных антенн:

- при размещении в композитной капсуле на вершине стальной стойки, закрепленной на железобетонной платформе;
- при непосредственном соединении опоры со стальной плитой, установленной на железобетонной платформе, и использовании схемы шунтового питания.

В соответствии с первым вариантом представлены результаты разработки и экспериментальных исследований характеристик антенн:

- вибратор Пистолькорса, размещенный внутри импедансно-согласованного материала – феррита с близкими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей;
- симметричный электрический вибратор с плечами в виде плоских спиралей Архимеда переменной ширины;
- модифицированный вибратор Пистолькорса с тремя плечами в виде ветвей спирали, навитых на цилиндрическое основание, с концами, замкнутыми на основания цилиндра.

Показаны возможности уменьшения размеров излучателя за счет использования импедансно-согласованной среды более чем в 20 раз при уменьшении коэффициента полезного действия, согласно критерию Чу-Харрингтона, примерно на 6 дБ.

В соответствии со вторым вариантом конструктивного исполнения разработаны методики проектирования следующих разновидностей антенн:

- монополи с механическими опорами, соединенными с металлической подстилающей поверхностью, защищенные от воздействия мощных электромагнитных импульсов с применением схемы короткого замыкания входов по постоянному току;
- многолучевые полноазимутальные антенны на основе осесимметричной линзы в виде усеченного конуса.

Установлены принципиальные возможности достижения коэффициента направленного действия многолучевой антенны свыше 15 дБ в полосе частот с относительной шириной 25,2%.

В третьей главе диссертации разработаны методики проектирования и представлены результаты натурных испытаний макетов подземных антенн резонансно-щелевого типа и патч-антенны с метаматериальной подложкой.

Показано, что в результате подключения питающих коаксиальных кабелей на различном расстоянии от концов щелей реализуются возможности настройки антенны в резонанс при изменении материальных параметров грунта, а также при навале слоя грунта над антенной. В результате обеспечивается существенное снижение потерь в материалах антенны, позволяющее при типовых потерях в грунте и слое гранитного щебня достичь энергетических потенциалов радиоканалов, требуемых для установленной зоны информационного обмена.

В четвертой главе диссертации представлены результаты проектирования подземных антенн на базе двухзаходной спирали Архимеда с шунтовым питанием и запиткой сбоку. Шунтовое питание осуществляется с использованием двух отрезков коаксиального кабеля, образующих шунт, подключаемых к пле-

чам спирали. Запитка сбоку выполняется при регулярных плечах спирали с постоянным периодом и при замене центральной части спирали двумя полукругностями с радиусами, превышающими радиус минимального изгиба коаксиального кабеля.

Выступающая в качестве облучателя двухзаходная спираль Архимеда, расположенная над экраном, позволяет выполнить плечи спирали из отрезков коаксиального кабеля, соответствующего требованиям к механической прочности. При этом подземная антенна будет обладать широкой полосой рабочих частот и высоким качеством согласования с фидерной линией.

На основе принципа эквивалентности полей и токов разработана методика оценки в реальном времени степени неоднородности диэлектрической среды, используемой для изоляции подземной антенны УКВ диапазона. Она базируется на анализе пространственного распределения реальной части вектора Пойнтинга, концентрация линий которого увеличивается в области полуволнового резонанса проводящих неоднородностей и уменьшается в области их волнового резонанса. Для нахождения пространственного распределения вектора Пойнтинга используется процедура пространственной аппроксимации электрического компонента электромагнитного поля при определении вспомогательных источников. Преимущество методики заключается в отсутствии необходимости использования априорной информации о пространственном распределении материальных параметров среды в анализируемой области.

Тематика диссертации Пендюрина В.А. 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:

- технология построения малогабаритных приземных антенн УКВ диапазона при использовании феррита в качестве импедансно-согласованной среды, позволяющая более чем в 20 раз уменьшить размеры излучателя;
- методика проектирования электрически малых антенн УКВ диапазона в виде двухзаходной плоской спирали Архимеда с плечами переменной ширины, а также многозаходных цилиндрических спиралей, принцип построения которых заключается в совмещении пространственной ориентации дипольного

электрического момента и дипольного магнитного момента для уменьшения потерь мощности в конструктивных элементах антенны и грунте;

- методика проектирования монополей, внутренняя или внешняя механическая опора которых соединена с металлической подстилающей поверхностью, защищенных от воздействия мощных электромагнитных импульсов за счет короткого замыкания по постоянному току входа;

- методика проектирования многолучевых полноазимутальных антенн УКВ диапазона на базе осесимметричной линзы в форме усеченного конуса, в качестве материала которой используется мраморный или гранитный щебень;

- методика проектирования подземных УКВ антенн резонаторно-щелевого типа со щелями Г-образной формы, позволяющая реализовать диаграмму направленности квазикардиоидного, тороидального, или игольчатого вида;

- методика проектирования подземных УКВ патч-антенн с подложкой из метаматериала, позволяющая уменьшить размеры антенного устройства более чем в 3 раза;

- предложения по построению двухзаходной спирали Архимеда с экраном с высокопрочным коаксиальным кабелем для достижения высокой устойчивости к механическим воздействиям, стабильности входных характеристик и диаграммы направленности к изменению материальных параметров и возможному навалу слоя грунта;

- методика экспериментальной оценки потока мощности электромагнитного поля в изоляторе подземной антенны с использованием эквивалентных полей и токов, реализованная на основе формирования виртуальной антенной решетки и аппроксимации распределения поля по значениям его параметров, измеряемых с применением электрически малых антенн.

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 приземных и подземных антенн УКВ диапазона.

Она 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 (в частности, критерия Чу-Харрингтона). Экспериментальные данные получены с использованием стандартных методик измерения характеристик и параметров приземных и подземных антенн, сертифицированных измерительных устройств и программных средств обработки измерительной информации.

Новизна научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе, состоит в разработке аппарата для эффективного проектирования приземных и подземных антенн УКВ диапазона с высокими показателями защищенности от деструктивных воздействий, обусловленных механическими нагрузками и неравномерностью условий окружающей среды. Его применение позволяет расширить теоретические знания в области исследования и создания новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов – антенных систем по вопросам, связанным с оценками влияния электрических размеров и конфигурации элементов, формы и электрофизических параметров подложки на характеристики излучения и приема электромагнитных волн.

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

Теоретическая значимость работы определяется тем, что представленные в ней методики расширяют возможности рационального выбора топологии конструкций и позволяют проектировать приземные и подземные антенны УКВ диапазона, сохраняющие свои характеристики при изменении в широких пределах проводимости подстилающей поверхности, навале слоя грунта и мощных механических воздействиях.

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.

Ценность работы для практики заключается в обосновании технических путей построения и технологий достижения высоких тактико-технических характеристик приземных и подземных антенн УКВ диапазона, устойчиво функционирующих при изменении проводимости грунта в широких пределах, при навале слоя грунта толщиной до 1 метра и мощных механических воздействиях.

Представленные в диссертации методики проектирования приземных и подземных антенн УКВ диапазона 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 по их реализацией (внедрением) в организациях оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации при выполнении опытно-конструкторских работ по созданию перспективных образцов радиоэлектронных комплексов.

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

1. Анализ приземных и подземных антенн УКВ диапазона выполнен на основе определения их характеристик в пространственно-временной области. Вместе с тем, при анализе узкополосных электрически малых антенн решение электродинамических задач в пространственно-частотной области позволяет достичь более высокой точности при меньших вычислительных ресурсах.

2. Для оценки точности решения электродинамических задач целесообразно привести значения остаточной невязки граничных условий. Кроме того, требуется исследовать сходимость полученных решений при различных параметрах дискретизации области их поиска.

3. В работе не определены возможности применения методики анализа подземной антенны с неоднородным изолятором для оценки области максимальной концентрации электромагнитного поля, а также нахождению объемного распределения проводимости неоднородной среды.

4. Описание методики анализа потока мощности электромагнитного поля в изоляторе подземной антенны желательно дополнить расчетом характеристик при наличии в среде магнитных потерь.

5. В перечень перспективных вариантов конструкций подземных и приземных антенн следовало бы включить экранированные рамочные антенны, используемые даже для связи с подводными объектами, поскольку в ближней зоне их излучения преобладает энергия реактивного магнитного поля, в то время как в среде преобладают потери мощности электрического характера.

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.

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.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней. На основе анализа диссертации Пендюрина В.А. «Защищенные приземные и подземные антенны УКВ диапазона» сделаны следующие выводы.

1. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная задача, имеющая значение для развития методических основ исследований распространения радиоволн в природных и искусственных средах, а также совершенствования технологий построения и разработки новых антенных систем с существенно улучшенными параметрами. 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, нашедшие практическое использование при разработке, исследовании и создании новых конструк-

ций защищенных приземных и подземных антенн УКВ диапазона и свидетельствующие о личном вкладе автора в науку. Предложенные соискателем решения строго аргументированы и оценены в сравнении с известными аналогами.

3. Работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Пендюрин В.А., 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 Пендюрина В.А. и их дальнейшей обработкой.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизации управления
летательными аппаратами (и вычислительных систем)
Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)



Разиньков Сергей Николаевич

«25» ноября 2022 года

Подпись Разинькова С.Н. заверяю

Помощник начальника строевого отдела
Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

«25» ноября



А.Саввин

Подпись об оппоненте:

Разиньков Сергей Николаевич, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиоп физика, 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, доцент, доцент кафедры автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительных 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