

На правах рукописи



Пестовский Игорь Николаевич

РАЗРАБОТКА ПУТЕЙ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ
ДЛЯ ДКМВ РАДИОСВЯЗИ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2016

Работа выполнена на кафедре «Технологии исследований и инноваций специальной связи» ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор Бузов Александр Львович

Официальные оппоненты:

Радионов Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород. Заведующий кафедрой «Общая и ядерная физика».

Седелников Юрий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань. Профессор кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем.

Ведущая организация:

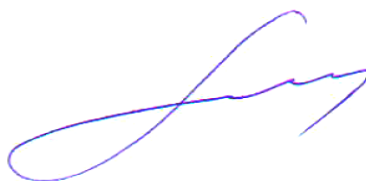
Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «ИНТЕЛТЕХ»), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 29.04.2016 г. в 14-30 часов на заседании диссертационного совета Д 219.003.02 при ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ПГУТИ и на сайте www.psuti.ru/science/diss-ob.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 219.003.02, д.т.н., профессор



А.И. Тяжев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время важная роль радиосвязи диапазона дециметровых волн (ДКМВ) общепризнана и не подвергается сомнению. Состоявшийся в последние годы переход в ДКМВ радиосвязи на передачу информации в дискретной форме в сочетании с использованием помехозащищенных сигнально-кодовых конструкций позволил существенно повысить надежность, устойчивость и качество связи на ДКМВ.

Особое место в составе систем и сетей ДКМВ радиосвязи занимают защищенные объекты (радиостанции, радиоцентры), призванные обеспечить работу в условиях экстремальных природных, техногенных или боевых воздействий, при которых другие виды и средства связи будут выведены из строя. В составе таких объектов, как правило, используются подземные антенны, к которым, как и к объектам в целом, предъявляются требования к параметрам назначения, стойкости и живучести.

Если некоторое время назад основное назначение подобных объектов связывалось исключительно с возможностью глобальных (в том числе ядерных) вооруженных конфликтов, то в последние годы в качестве наиболее реальных угроз инфраструктуре все чаще приходится рассматривать угрозу крупномасштабных террористических актов. В связи с этим возникает необходимость поддержания постоянной готовности существующих защищенных объектов и подземных антенн в их составе, а также создания новых подобных объектов. Следует отметить, что особенности конструкции и размещения подземных антенн приводят к тому, что срок их службы относительно невелик, а возможности ремонта и технического обслуживания крайне ограничены.

В свою очередь, создание новых защищенных объектов и модернизация действующих предполагает периодическое проектирование и строительство новых подземных антенн, причем в условиях постоянно возрастающих требований к параметрам назначения, стойкости и живучести.

Таким образом, в настоящее время существует **актуальная научная проблема** – проблема разработки технических решений и методов проектирования в целях создания подземных антенн высокой эффективности, стойкости и живучести.

Степень разработанности темы исследования

Концептуальные вопросы, связанные с построением, функционированием и подходами к анализу подземных антенн, были рассмотрены достаточно давно в монографиях Г.А. Лаврова, А.С. Князева и Р. Кинга, Г. Смита, успевших стать классическими. В последнее время, несмотря на относительно небольшое количество публикаций, вопросы проектирования и анализа подземных антенн в достаточной степени освещены в трудах А.Л. Бузова, Ю.И. Кольчугина, Р. Хансена, В.П. Чернолеса. Кроме того, выявлено некоторое количество технических решений подземных антенн, защищенных патентами России и США. Однако в целом проведенный обзор показал необходимость разработки новых эффектив-

ных технических решений подземных антенн и целесообразность создания относительно простой инженерной методики электродинамического анализа таких антенн, не требующей применения дорогостоящих универсальных программных комплексов, и обеспечивающей, при небольшой ресурсоемкости, приемлемую точность вычислений.

Цель диссертационной работы состоит в разработке научно обоснованных теоретических положений и технических решений по построению подземных антенных систем для ДКМВ радиосвязи.

Задачи диссертационной работы:

1. Анализ основных требований к подземным антенным системам.
2. Анализ основных характеристик существующих решений и принципов построения подземных антенных систем диапазона ДКМВ.
3. Анализ основных методов и существующих программных средств моделирования и проектирования подземных антенных систем.
4. Разработка методики электродинамического анализа антенн, размещенных в диссипативной среде.
5. Апробация разработанной методики электродинамического анализа антенн по результатам решения тестовых задач.
6. Исследование возможностей управления макроскопическими параметрами локального объема диссипативной среды за счет наложения постоянного электрического поля смещения.
7. Исследование и разработка технических решений базовых излучателей подземных антенных систем.
8. Исследование и разработка технических решений подземных антенных систем.
9. Разработка и реализация методики проектирования базовых излучателей подземных антенных систем.
10. Разработка и реализация методики проектирования подземных антенных систем.
11. Практическая реализация составных частей подземных антенных систем в рамках внедрения результатов диссертационной работы.
12. Экспериментальная проверка влияния электрического поля смещения на макроскопические параметры локального объема диссипативной среды.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе известного метода моментов разработана математическая модель и методика электродинамического анализа антенн, размещенных в диссипативной среде.
2. Получены новые теоретические и экспериментальные результаты исследования возможностей управления макроскопическими параметрами локального объема диссипативной среды за счет наложения постоянного электрического поля смещения.
3. Разработана методика проектирования базовых излучателей подземных антенных систем, включающая анализ тактико-технических требований, выбор

типа излучателя из имеющейся номенклатуры, уточнение требований к среде размещения, расчет электрических параметров излучателя на основе разработанной методики электродинамического анализа, уточнение геометрических параметров излучателя по результатам расчетов и обоснование применения (при необходимости) средств управления макроскопическими параметрами локального объема диссипативной среды в месте размещения излучателя посредством наложения постоянного электрического поля смещения.

4. Разработана методика проектирования подземных антенных систем, включающая анализ тактико-технических требований, выбор типов базовых излучателей, расчет электрических параметров антенной системы на основе разработанной методики электродинамического анализа антенн и уточнение геометрических параметров проектируемой антенной системы по результатам расчетов.

5. Получены новые результаты исследования характеристик базовых излучателей и подземных антенных систем на их основе.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработанные автором математическая модель и методика электродинамического анализа антенн, размещенных в диссипативной среде, расширяет класс задач, решаемых на основе метода моментов. При этом в распоряжении разработчиков антенной техники оказывается доступный и достаточно точный расчетный инструмент, который применительно к упомянутому конкретному классу задач вполне конкурентоспособен по отношению к дорогостоящим универсальным и специализированным программным комплексам.

2. Полученные автором новые теоретические и экспериментальные результаты исследования возможностей управления макроскопическими параметрами локального объема диссипативной среды за счет наложения постоянного электрического поля смещения расширяют знания о физических закономерностях в части управления электрофизическими характеристиками сред и открывают возможности создания подземных антенн с существенно улучшенными параметрами.

3. Разработанные методики проектирования базовых излучателей и подземных антенных систем на их основе, а также полученные автором новые результаты исследования характеристик базовых излучателей и подземных антенных систем на их основе могут быть использованы при решении практических задач создания подземных антенных систем различного назначения, включая антенны систем подземной радиосвязи, а также антенн в диэлектрических укрытиях из различных материалов и метаматериалов.

О практической значимости работы дополнительно свидетельствует наличие разработанных с участием автора новых технических решений подземных антенн, защищенных тремя патентами.

Методология и методы исследования

При выполнении диссертационной работы использовались методы классической электродинамики, теории антенн, теории длинных линий, физического

эксперимента, численные методы. Для проведения расчетов в целях верификации полученных результатов использовался программный комплекс FeKo 7.0.

На защиту выносятся следующие основные положения

1. Математическая модель и методика электродинамического анализа антенн, размещенных в диссипативной среде, на основе метода моментов.

2. Новые теоретические и экспериментальные результаты исследования возможностей управления макроскопическими параметрами локального объема диссипативной среды за счет наложения постоянного электрического поля смещения.

3. Методики проектирования базовых излучателей и подземных антенных систем на их основе.

4. Новые результаты исследования характеристик базовых излучателей и подземных антенных систем на их основе.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечиваются адекватностью использованных методов и построенных на их основе расчетных моделей. Достоверность результатов работы подтверждается результатами сопоставления решений, полученных разными методами, расчетных и экспериментальных данных, а также результатами внедрения разработанных методик и технических решений при создании подземных антенн. Диссертационная работа соответствует п.п. 1, 2 и 3 паспорта специальности 05.12.07.

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования докладывались на:

- XV-й научно-технической конференции ВМИРЭ им. А.С. Попова (СПб., 2004);
- Всеармейских научно-практических конференциях «Инновационная деятельность в ВС РФ» (СПб., 2004, 2005, 2006, 2007, 2009);
- XXIII Российской научно-технической конференции ПГУТИ (Самара, 2016).

По тематике диссертационных исследований автором (лично и в соавторстве) опубликовано 17 печатных трудов. Основные научные и прикладные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 научных статьях в журналах, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», в 3 патентах Российской Федерации на изобретения, в статье, помещенной в информационно-аналитическом сборнике по научным открытиям, идеям и гипотезам, в 9 публикациях в форме тезисов докладов.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы, при активном непосредственном участии автора, успешно внедрены на предприятиях России. Реализация результатов работы и достигнутый эффект подтверждены соответствующими актами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, приложения, списка сокращений и списка использованных источников из 133 наименований. Диссертация содержит 195 страниц текста, в том числе – 108 рисунков.

Во **введении** обоснованы актуальность темы исследования, ее теоретическая и практическая значимость, оценена степень разработанности темы исследования, проанализированы и выбраны подходы к решению поставленных задач, определена новизна и обоснована достоверность полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Раздел 1 диссертационной работы посвящен анализу принципов построения и основных характеристик подземных антенных систем.

Выполнен анализ основных требований к подземным антенным системам. Уточнены условия и основания применения подземных антенных систем в составе технических средств радиосвязи диапазона ДКМВ, основным из которых является возможность возникновения экстремальных внешних воздействий на объект. Уточнена минимальная номенклатура требований по назначению, включающая диапазон рабочих частот, номинальное входное сопротивление, минимальный КБВ, максимальную вмещающую мощность, вид диаграммы направленности, КНД, коэффициент усиления, вид поляризации, требования к параметрам составных частей, требования к контролю, индикации и управлению. Показано, что они носят противоречивый характер, в частности, улучшение параметров стойкости к внешним воздействиям предполагает увеличение глубины заложения излучающей системы, что в свою очередь, сказывается на снижении коэффициента усиления антенны.

Уточнены ограничения, связанные с требованиями удобства технического обслуживания и ремонта, а также с требованиями разведзащищенности.

Установлено, что наиболее перспективным является вариант построения излучающей системы в неразборном монолитном диэлектрическом укрытии («изолированная антенна»). Обоснована особая важность адекватности математического моделирования, точности и достоверности полученных результатов применительно к задачам разработки подземных антенн. Обоснованы примерный состав защищенной антенной системы, а также перспективность использования в составе излучающей системы бесшунтовых вибраторных излучателей, в том числе – турникетных.

Выполнен анализ основных характеристик существующих решений и принципов построения подземных антенных систем ДКМВ диапазона. Проанализированы опубликованные в открытой печати статьи и патенты, отечественных и зарубежных авторов, описывающих конкретные технические решения подземных антенных систем и их составных частей. Проанализированы приведенные в источниках сведения об основных характеристиках рассмотренных антенн.

Проанализированы основные методы электродинамического и существующие программные комплексы моделирования и проектирования подземных

антенных систем. Рассмотрены особенности и области применения точных, приближенных и комбинированных методов электродинамического анализа. Кратко рассмотрены и охарактеризованы универсальные и специализированные программные комплексы для решения электродинамических задач, включая отечественные (SCATER и SAMANT) и зарубежные (Feko, CST Studio, AWR MicroWave Office).

Обоснована необходимость разработки простого и достаточно точного метода электродинамического анализа подземных антенн, не связанного с использованием дорогостоящих универсальных и специализированных программных комплексов.

Раздел 2 посвящен разработке методики электродинамического анализа антенн, размещенных в диссипативной среде. Разработана методика электродинамического анализа антенн, размещенных в диссипативной среде, методом моментов. Предложена модель и методика расчета электрических характеристик проволочных антенн, размещенных в диссипативных средах, основанная на известном методе моментов и принципе эквивалентности. Это позволило свести задачу отыскания электромагнитного поля антенны, погруженной в диссипативную среду к задаче отыскания поля в свободном пространстве по найденным распределениям эквивалентных токов, учитывающим условия на границах раздела диэлектрических сред. Таким образом, из рассмотрения исключается дополнительная граница разделов сред, вследствие чего, математическая модель упрощается, а требования к вычислительным ресурсам уменьшаются.

Обоснован подход на основе декомпозиции структуры на ансамбль сегментов, представляющих собой частично перекрывающиеся электрически короткие симметричные вибраторы с экспоненциальным распределением тока вдоль плеч. Взаимное расположение сегментов и диполей показано на рис. 1.

Выведена система матричных уравнений, позволяющая определить парциальные токи в сегментах (т.е. распределение тока в антенне) при заданном режиме возбуждения структуры:

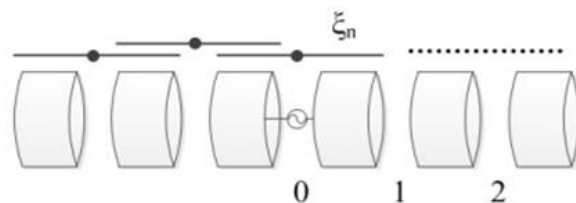


Рис. 1 – Взаимное расположение сегментов и диполей

$$([E] + [Y_{np}] [Z_{np}]) [I_p^{внеш}] = [Y_{n0}] U_0, \quad (1)$$

где $[Y_{n0}]$ - матрица-столбец взаимных адмитансов между входом и выходами; $[Y_{np}]$ - квадратная матрица взаимных адмитансов между выходами; $[Z_{np}]$ - матрица взаимных импедансов между выходами; U_0 – напряжение на входе антенны; $[E]$ - единичная матрица.

Получены аналитические выражения для расчета элементов матриц взаимных импедансов и адмитансов в структуре, содержащей произвольно ориенти-

рованные друг относительно друга сегменты. В частности, выведены соотношения для расчета элементов матрицы импедансов:

$$Z_{np} = \frac{30}{\sqrt{\varepsilon'}} \left\{ \exp(-j\gamma M_1) \times \right. \\ \times [E[\gamma(r_1 + l_p + l_n - M_1)] - E[\gamma(r_2 + l_p - M_1)] - E[\gamma(r_3 + l_n - M_1)] + E[\gamma(r_4 - M_1)]] + \\ + \exp(-j\gamma M_2) \times \\ \times [E[\gamma(r_1 + l_p + l_n - M_2)] - E[\gamma(r_2 + l_p - M_2)] - E[\gamma(r_3 + l_n - M_2)] + E[\gamma(r_4 - M_2)]] - \\ \left. - \frac{\exp(-j\gamma(r_2 + l_p))}{j\gamma r_2} + \frac{\exp(-j\gamma(r_1 + l_p + l_n))}{j\gamma r_1} + \frac{\exp(-j\gamma r_4)}{j\gamma r_4} - \frac{\exp(-j\gamma(r_3 + l_n))}{j\gamma r_3} \right\} \quad (2)$$

где
$$M_{1,2} = \frac{N_n - N_p \pm \sqrt{N_n^2 + N_p^2 - 2N_n N_p \cos(\alpha) - P_0^2 (1 - \cos^2 \alpha)}}{1 - \cos(\alpha)};$$

$$r_1 = \sqrt{P_0^2 + l_p^2 + l_n^2 - 2l_n l_p \cos \alpha + 2l_p N_p - 2l_n N_n};$$

$$r_2 = \sqrt{P_0^2 + l_p^2 + 2l_p N_p};$$

$$r_3 = \sqrt{P_0^2 + l_n^2 - 2l_n N_n};$$

$$r_4 = P_0;$$

$$N_n = P_x \cos \psi_n \cos \chi_n + P_y \sin \psi_n \cos \chi_n + P_z \sin \chi_n;$$

$$N_p = P_x \cos \psi_p \cos \chi_p + P_y \sin \psi_p \cos \chi_p + P_z \sin \chi_p;$$

$$\cos \alpha = \cos \psi_p \cos \chi_p \cos \psi_n \cos \chi_n + \cos \chi_p \sin \psi_p \cos \chi_n \sin \psi_n + \sin \chi_p \cos \chi_n$$

Разработанная методика расчета позволяет определить электрические характеристики антенного устройства, выполненного как из одиночного проводника, так и образованного системой изолированных проводников, произвольно ориентированных друг относительно друга, с учетом особенностей электрофизических свойств среды заложения.

Выполнена апробация разработанной методики электродинамического анализа антенн по результатам решения тестовых задач. Результаты расчета функции распределения тока по антенне, при разных значениях диэлектрической проницаемости ε и фиксированных длине вибратора $L = 15$ м и электропроводности $\sigma = 0.001$ приведены на рис. 2.

Проведено сравнение результатов расчета электрических характеристик по разработан-

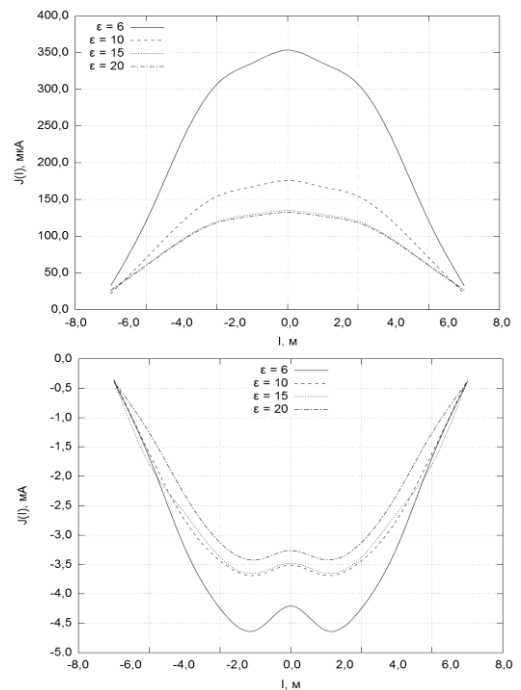


Рис. 2 – Действительная и мнимая части токовой функции

ной методике и известным программным комплексом Feko 7.0 при различных геометрических и электрофизических характеристиках тестовой модели. Результаты с достаточной степенью точности совпадают для обоих методов, в частности, численное расхождение полученных значений не превышает 10%, и хорошо согласуются с данными об электрических характеристиках подземных антенн, опубликованными в печати. Таким образом, результаты апробации подтвердили адекватность предложенной методики расчета электрических характеристик подземных антенн.

Исследованы возможности управления макроскопическими параметрами локального объема диссипативной среды за счет наложения постоянного электрического поля смещения. Показано, что приложение постоянного внешнего электрического поля может привести к локализации свободного пространственного заряда вдали от антенны, что, в свою очередь, приводит к локальному снижению проводимости среды (в окрестности антенны) и, соответственно, к снижению потерь.

В разделе 3 приведены результаты разработки и реализации методик проектирования базовых излучателей и подземных антенных систем на их основе.

Выполнены исследование и разработка технических решений базовых излучателей подземных антенных систем. Рассмотрены основные варианты реализации подземных симметричных вибраторов. Проанализированы возможности формирования на их основе ярусных и турникетных структур. Предложено

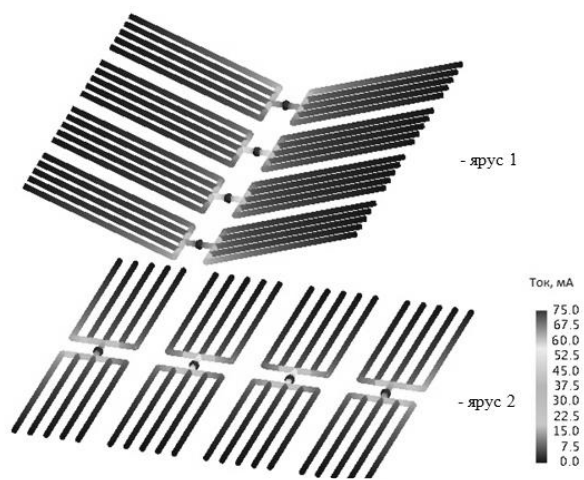


Рис. 3 – Электродинамическая модель
БИ

техническое решение базового излучателя подземной турникетной антенны в виде двухэтажной вибраторной структуры с повышенным коэффициентом усиления. Электродинамическая модель базового излучателя подземной антенны приведена на рис. 3. Получены предварительные оценки для основных электрических размеров излучателя. Проведенные расчеты электрических характеристик излучателя показали вполне приемлемые значения импедансных и пространственных характеристик. Как видно из графиков, приведенных на рис. 4, значения импеданса первого и второго ярусов достаточно близки.

Выполнено исследование и разработка технических решений подземных антенных систем. Рассмотрены варианты и возможности построения ФАР, состоящей из совокупности предложенных базовых излучателей. Обоснованы конфигурации линейной и двумерной (билинейной) решеток. Проведенные расчеты характеристик решеток показали возможность формирования требуемых диаграмм направленности, оперативного управления ими (для двумерной решетки) и реализации относительно высокого коэффициента усиления. Диа-

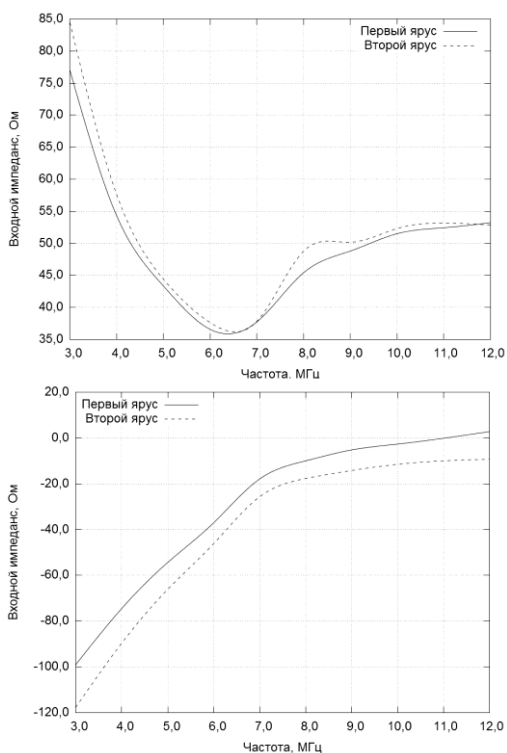


Рис. 4 – Действительная и мнимая части импеданса БИ

граммы направленности линейной ФАР, рассчитанные на частотах 3, 7 и 12 МГц представлены на рис. 5. Коэффициент усиления в направлении максимума излучения имеет значение -13 дБ, -4.8 дБ, 0 дБ соответственно.

Разработана методика проектирования базовых излучателей подземных антенных систем, включающая: анализ тактико-технических требований; выбор материала покрытия; определение электродинамических характеристик материала покрытия; выбор длины плеча симметричных вибраторов; принятие решения о необходимости кусочной изоляции проводников и определение их характеристик; выбор количества вибраторов в пакете и количества пакетов, формирующих каждый ярус; определение глубины залегания и расстояния между этажами; уточнение геометрических параметров излучателя по результатам расчетов; анализ необходимости

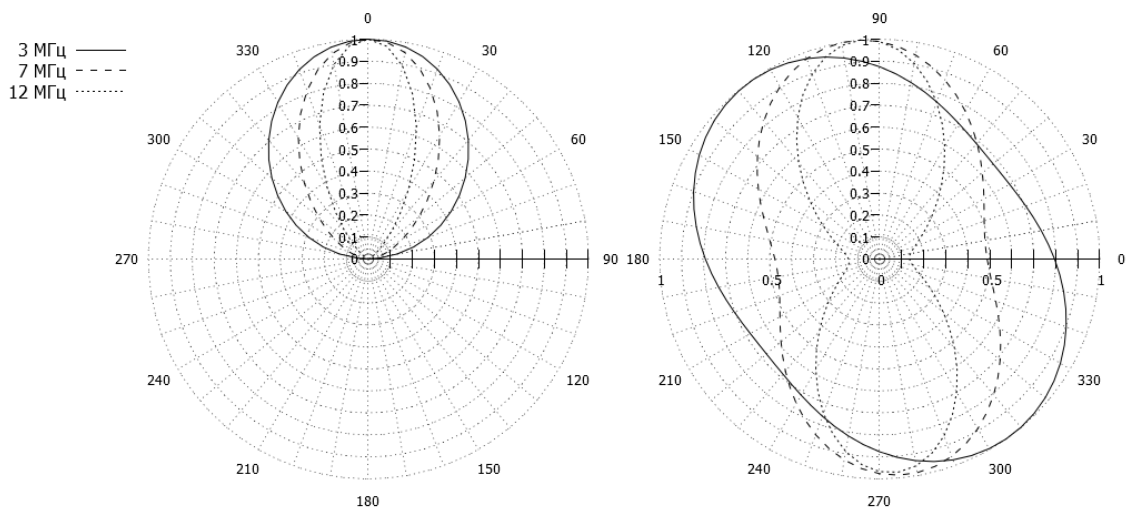


Рис. 5 – ДН линейной ФАР в вертикальной ($\varphi = 0^\circ$) и азимутальной ($\theta = 20^\circ$) плоскостях

применения средств управления макроскопическими параметрами локального объема диссипативной среды в месте размещения излучателя посредством наложения постоянного электрического поля смещения. Сформулированы критерии и получены необходимые расчетные соотношения для каждого этапа.

Разработана методика проектирования подземных антенных систем, включающая: выбор конфигурации базового излучателя; анализ доступных площадей для размещения антенной системы; анализ энергетических показателей; выбор количества базовых излучателей и их взаимного расположения; уточнение геометрических параметров излучателя по результатам расчетов; анализ

направлений обслуживания, определение необходимых амплитудно-фазовых распределений; принятие решения об адаптивности антенной системы. Обосновано содержание каждого этапа и соответствующие критерии. Рассмотрены основные варианты реализации диаграммообразующей системы, обеспечивающей требуемые амплитудно-фазовые распределения. Блок-схема данной методики представлена на рис. 6.

Раздел 4 посвящен вопросам практической реализации и экспериментальных исследований составных частей подземных антенных систем.

Рассмотрены вопросы практической реализации составных частей подземных антенных систем в рамках внедрения результатов диссертационной работы. Описана конструкция и основные геометрические размеры подземной антенны, приведенной на рис. 7, состоящей из двух ярусов симметричных вибраторов. Рассмотрена структура тракта возбуждения антенны, назначение и типы ее составных частей (возбудителя, усилителей мощности, делителей мощности, аттенюаторов, фазовращателей).

Подробно рассмотрен порядок работы подземной антенны. Показано, что антенна излучает поле с эллиптической поляризацией и формирует диаграмму направленности в вертикальной плоскости с максимумом, ориентированным в зенит, а в азимутальной плоскости - близкую к круговой. На основе оценки характера распределения тока показана более высокая эффективность рассмотренного решения по сравнению с ранее известным аналогом. Проведена экспериментальная проверка опытного образца антенны, которая подтвердила вполне приемлемые значения характеристик практически во всем диапазоне ДКМВ. В частности, экспериментальные значения коэффициента бегущей волны и приведены на рис. 8.

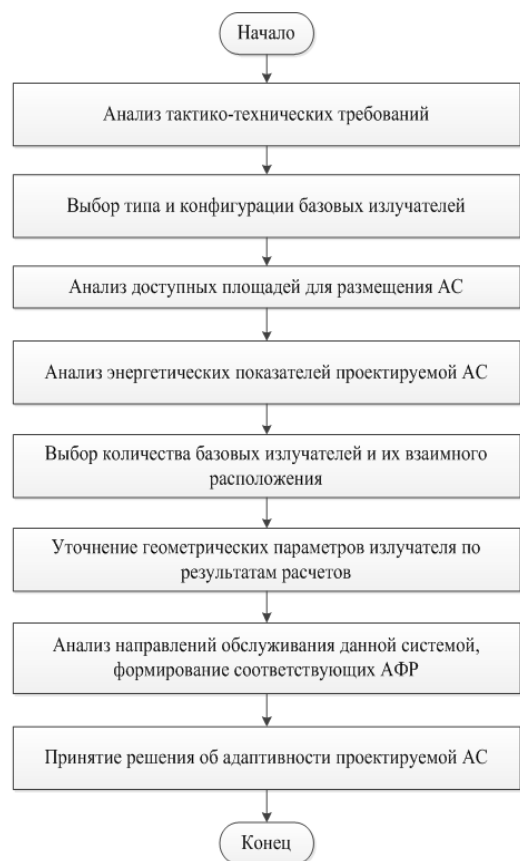


Рис. 6 – Блок-схема методики проектирования подземных антенн

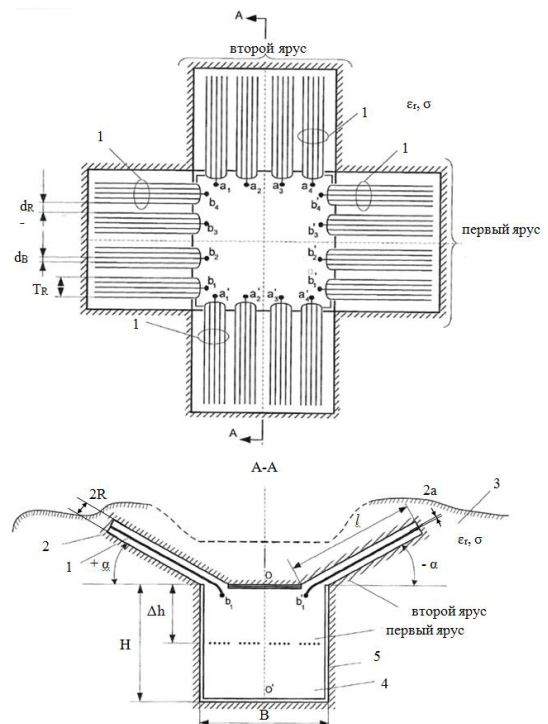


Рис. 7 – Конструкция подземной антенны

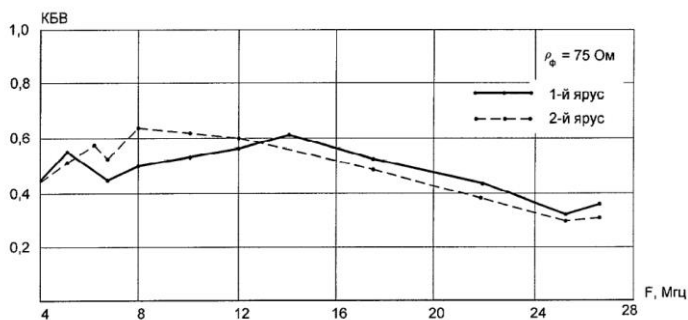


Рис. 8 – График зависимости коэффициента бегущей волны от частоты

Рассмотрена возможность построения антенной системы в виде подземной передающей модульной активной фазированной антенной решетки. Предложена структура ФАР, содержащая, по сравнению с известными аналогами, блок автоматизированного управления параметрами, блок из нескольких возбуждателей и коммутатор информационных сигналов.

Разработан алгоритм автоматизированного управления параметрами ФАР. Показано, что в результате обеспечивается возможность формирования одного или нескольких радиоканалов с требуемыми параметрами, необходимыми для достижения заданного энергетического потенциала, а также маневра уровнем энергетического потенциала радиолинии в целом при изменении условий распространения радиоволн. Показано, что предложенное техническое решение обеспечивает возможность повышения эффективности (увеличения коэффициента усиления) антенной решетки.

Выполнена экспериментальная проверка влияния электрического поля смещения на макроскопические параметры локального объема диссипативной среды. Достоверность теоретических предпосылок проверена в ходе экспериментальных исследований, проведенных косвенным методом, на специально созданной установке – радиолинии связи, образованной радиоприемником и радиопередатчиком с антеннами, погруженными в землю, причем в местах заложения обеих антенн обеспечивалась возможность наложения постоянного электрического поля смещения. Результаты эксперимента показали, что наложение поля смещения привело к повышению уровня принимаемого сигнала более чем в 3 раза, что подтвердило возможность использования данного решения для повышения эффективности подземных антенн.

В **Заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

В **Приложении А** представлены результаты расчета диаграмм направленности подземных антенных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках диссертационных исследований выполнен анализ принципов построения и основных характеристик подземных антенн для ДКМВ радиосвязи.

Уточнены условия и основания применения подземных антенных систем в составе технических средств радиосвязи диапазона ДКМВ, а также выполнен анализ основных требований к ним. Показано, что требования к подземным антеннам носят противоречивый характер.

Проанализированы опубликованные в открытой печати статьи и патенты, отечественных и зарубежных авторов, описывающих конкретные технические решения подземных антенных систем и их составных частей. В ходе чего, установлено, что наиболее распространенным является вариант построения излучающей системы в неразборном монолитном диэлектрическом укрытии.

Обоснована особая важность адекватности математического моделирования, точности и достоверности полученных результатов применительно к задачам разработки подземных антенн. Выполнен анализ основных методов и существующих программных средств моделирования и проектирования подземных антенных систем.

С учетом особенностей подземных антенн и характеристик полупроводящего приповерхностного слоя земли, в котором они размещаются, разработана методика расчета электрических характеристик проволочных антенн, размещенных в диссипативных средах, основанная на известном методе моментов и принципе эквивалентности. Выполнена апробация разработанной методики электродинамического анализа антенн по результатам решения тестовых задач.

Выполнены исследование и разработка технических решений базовых излучателей, а также подземных антенных систем на их основе. По результатам исследований предложено техническое решение базового излучателя подземной турникетной антенны в виде двухэтажной вибраторной структуры. Кроме того, рассмотрены варианты и возможности построения ФАР, состоящей из совокупности предложенных базовых излучателей.

Разработаны и реализованы методики проектирования базовых излучателей и подземных антенных систем на их основе.

Рассмотрены вопросы практической реализации составных частей подземных антенных систем в рамках внедрения результатов диссертационной работы. Описана конструкция и основные геометрические размеры подземной антенны. Рассмотрена структура тракта возбуждения антенны, назначение и типы ее составных частей.

Исследованы возможности управления макроскопическими параметрами локального объема диссипативной среды за счет наложения постоянного электрического поля смещения. Показано, что приложение постоянного внешнего электрического поля может привести к снижению потерь. Достоверность теоретических предпосылок проверена в ходе экспериментальных исследований, проведенных косвенным методом, на специально созданной установке.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Пестовский, И.Н. Повышение энергетического потенциала радиолинии [Текст] / И.Н. Пестовский, Л.С. Турнецкий, В.П. Чернолес // Мобильные системы. – 2007. - №2. – С.45-47.
2. Пестовский, И.Н. Метод моментов в применении к расчету электрических характеристик антенн в диссипативных средах [Текст] / И.Н. Пестовский // Радиотехника. – 2015. - №4 – С.51-57.

3. Пестовский, И.Н. Особенности построения базовых излучателей для использования в подземных фазированных антенных решетках [Текст]/ И.Н. Пестовский // Электросвязь. – 2015. - №6. – С. 54-58.
4. Пестовский, И.Н. Реализация метода моментов для расчета электрических антенн в диссипативных средах [Текст]/ И.Н. Пестовский // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. - №1. – С. 76-82.

Патенты:

5. Подземная антенна [Текст]: пат. 2262164 Рос. Федерация: МПК H01Q 1/04, RU 2262164C1 / Артамошин А.Д., Бусыгин Д.В., Галлеев К.Я., Гапонов Б.Ф., Курышев А.А., Пестовский И.Н., Чернолес В.П., Ятульчик О.В. – № 2004126396/09; заяв. 30.08.2004; опубл. 10.10.2005, Бюл. № 28; приоритет 30.08.2004. – 12 с.
6. Подземная передающая модульная активная фазированная антенная решетка [Текст]: пат. 2325742 Рос. Федерация: МПК H01Q 1/04 (2006.01), RU 2325742C1 / Артамошин А.Д., Бандейкин А.П., Блинов В.Н., Галлеев К.Я., Гапонов Б.Ф., Курышев А.А., Леппа В.Р., Пестовский И.Н., Чернолес В.П. – № 20077107418/09; заяв. 27.02.2007; опубл. 27.05.2008, Бюл. № 15; приоритет 27.02.2007.
7. Подземная ультракоротковолновая антенная решетка [Текст]: пат. 2400884 Рос. Федерация: МПК H01Q 21/00 (2006.01), RU 2400884C1. / Артамошин А.Д., Галлеев К.Я., Гапонов Б.Ф., Курышев А.А., Пестовский И.Н., Чернолес В.П. – № 2009133761/07; заяв. 08.09.2009; опубл. 20.03.2011, Бюл. № 8; приоритет 06.03.2011.

Труды научных конференций:

8. Пестовский, И.Н. Принципы построения подземных антенн приемопередающих центров [Текст] / И.Н. Пестовский, А.А. Курышев // Материалы XV-й научно-технической конференции ВМИРЭ им. А.С. Попова. – СПб.: ВМИРЭ, 2004. – С.311-312.
9. Пестовский, И.Н. Антенны, размещенные в поглощающих средах. Подход к расчету их параметров [Текст]/ И.Н. Пестовский, А.А. Курышев // Инновационная деятельность в ВС РФ: Труды всеармейской научно-практической конференции. 18-19 ноября 2004 г. – СПб.: ВАС, 2004. – С.194-195.
10. Пестовский, И.Н. Комплексы связи КВ-диапазона на основе подземных активных фазированных антенных решеток [Текст] / И.Н. Пестовский, А.А. Курышев // Инновационная деятельность в ВС РФ: Труды всеармейской научно-практической конференции. 17-18 ноября 2005 г. – СПб.: ВАС, 2005. – С.159-163.
11. Пестовский, И.Н. Передающая подземная антенна [Текст] / И.Н. Пестовский, А.А. Курышев, В.П. Чернолес // Инновационная деятельность в ВС РФ: Труды всеармейской научно-практической конференции. 17-18 ноября 2005 г. – СПб.: ВАС, 2005. – С.163-168.
12. Пестовский, И.Н. Методика экспериментального исследования влияния электрического поля смещения на макроскопические параметры локального

объема диссипативной среды [Текст]/ И.Н. Пестовский, А.А. Курышев, И.Г. Бавшин, Л.С. Турнецкий // Инновационная деятельность в ВС РФ: Труды всеармейской научно-практической конференции. 23-24 ноября 2006 г. – СПб.: ВАС, 2006. – С.106-110.

13. Пестовский, И.Н. Подземная передающая модульная активная фазированная антенная решетка [Текст] / И.Н. Пестовский, А.А. Курышев, В.П. Чернолес // Инновационная деятельность в ВС РФ: Труды всеармейской научно-практической конференции. 22-23 ноября 2007 г. – СПб.: ВАС, 2007. – С.356-362.
14. Пестовский, И.Н. Подземная УКВ антенная решетка [Текст] / И.Н. Пестовский, А.А. Курышев, В.П. Чернолес // Инновационная деятельность в ВС РФ: Труды всеармейской научно-практической конференции. 11-12 декабря 2009 г. – СПб.: ВАС, 2009. – С.318-321.
15. Пестовский, И.Н. Методы математического моделирования электродинамических систем, содержащих протяженные локальные области, заполненные «плохими» диэлектриками [Текст] / И.Н. Пестовский, А.Л. Бузов, Ю.И. Кольчугин // Тезисы докладов XXIII Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. 1-5 февраля 2016 г. — Самара, 2016. — С. 168.
16. Пестовский, И.Н. Программные средства электродинамического анализа и возможности их использования для моделирования подземных антенн [Текст] / И.Н. Пестовский // Тезисы докладов XXIII Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. 1-5 февраля 2016 г. — Самара, 2016. — С. 179.

Труды, опубликованные в других научных изданиях:

17. Закономерность изменения макроскопических параметров локального объема диссипативной среды от электрического поля смещения: диплом №315 по заявке на открытие № А-395 от 29.04.2006/ Бавшин И.Г., Курышев А.А., Пестовский И.Н., Турнецкий Л.С., Хитров Ю.А., Чернолес В.П. // В кн.: Потоцкий В.В. Научные открытия, идеи гипотезы (1992-2007): Информационно-аналитический обзор. – М.: МААНОИ, 2008. – С.296-297.

Подписано в печать 25.02.2016 г.

Формат 60 x 84/16. Бумага ксероксная. Печать оперативная.

Объем – 1,25 усл. п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 134.

Отпечатано в типографии ООО «Инсома-пресс»
443080, г. Самара, ул. Санфировой, 110 А; тел.: 222-92-40