

На правах рукописи



**ПЕНДЮРИН Владимир Андреевич**

**ЗАЩИЩЕННЫЕ ПРИЗЕМНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ АНТЕННЫ УКВ  
ДИАПАЗОНА**

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2022

Работа выполнена в АО «Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
**Николаев Валерий Иванович**

Официальные оппоненты: **Авдеев Владимир Борисович**, доктор технических наук, профессор, федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю РФ», управление, главный научный сотрудник

**Разиньков Сергей Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение 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, кафедра автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительных систем), доцент

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара

Защита состоится 22 декабря 2022 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский просп., 14 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан « 28 » октября 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук



Федоров Сергей Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Надежность функционирования систем управления во многом зависит от стабильности основных характеристик приземных и подземных антенн УКВ диапазона в условиях мощных механических воздействий. Антенны должны сохранить форму и основные параметры диаграммы направленности (ширину главного лепестка и его пространственную ориентацию, вид поляризации); падение коэффициента полезного действия антенны вследствие навала земли не должно привести к существенному снижению энергетического потенциала аппаратуры; важно обеспечить стабильность входных характеристик антенн в условиях изменившихся материальных и геометрических параметров окружающей среды.

Важной задачей является сохранение стабильных характеристик антенн в процессе их длительной эксплуатации – опыт использования подземных антенн УКВ диапазона показал, что использование в качестве диэлектрической подложки полимербетона приводит к накоплению влаги и существенному падению коэффициента полезного действия через 10-15 лет эксплуатации.

Существенным фактором, усложняющим задачу сохранения стабильных характеристик приземных и подземных антенн УКВ диапазона, являются их существенные габаритные размеры. С одной стороны – для обеспечения достаточно высоких значений коэффициента полезного действия и требуемой ширины полосы рабочих частот, в соответствии с критерием Чу-Харрингтона, размеры антенны должны быть не меньшими, чем  $(0.2 \div 0.5)\lambda_0$ , с другой стороны – при увеличении размеров антенн увеличиваются механические нагрузки, становится сложнее обеспечивать стабильность их функционирования в изменяющихся внешних условиях. Поэтому важной задачей является уменьшение габаритных размеров и массы антенн; существенным требованием к технологии производства антенн является возможность заводской сборки основных ее элементов и легкость транспортировки к месту эксплуатации.

Перспективным направлением развития теории и техники антенн является разработка импедансно-согласованных сред и метаматериалов, позволяющих существенно уменьшить размеры антенн при сохранении удовлетворительных значений ее коэффициента полезного действия и ширины полосы рабочих частот, произведение которых является константой, в соответствии с критерием Чу-Харрингтона. Весьма важной задачей является поиск и разработка материалов, которые возможно использовать в качестве импедансно-согласованных сред с сопоставимыми значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей, а также – метаматериалов, позволяющих существенно уменьшить размеры антенн УКВ диапазона. Актуальность этой задачи обусловлена также и тем обстоятельством, что производимые в США импедансно-согласованные материалы запрещены к поставке в Россию.

**Степень разработанности темы.** Фундаментальные основы теории и техники приземных и подземных антенн наиболее детально изложены в монографии Г.А. Лаврова и А.С. Князева «Приземные и подземные антенны», а также – в двухтомной монографии Р. Кинга и Г. Смита «Антенны в материальных средах». Классическими работами в области создания приземных антенн стали труды Г.З. Айзенберга, Б.В. Брауде, С.И. Надененко, Г.Т. Фрииса, С.А. Щелкунова. Физические аспекты распространения радиоволн, излучаемых приземными и подземными антеннами, а также –

вопросы математических методов их анализа детально рассмотрены в работах Д.А. Антропова, О.Ю. Перфилова, П.Я. Уфимцева, Е.Л. Фейнберга, В.Е. Фидельмана, С.И. Эминова.

Большой вклад в развитие методологии проектирования, создания и эксплуатации приземных и подземных антенн внесли А.И. Беляцкий, Р.Ю. Бородулин, А.Л. Бузов, М.А. Бузова, С.А. Букашкин, В.Г. Быков, А.В. Васин, Е.М. Верещагин, О.Б. Гончарук, С.Н. Елисеев, Л.С. Казанский, И.А. Колояров, Ю.И. Кольчугин, А.Д. Красильников, Е.Н. Маслов, М.А. Минкин, Ю.К. Муравьев, О.Г. Мясников, В.А. Неганов, Ю.Б. Нечаев, В.И. Николаев, Г.А. Нилов, А.В. Оглоблин, П.П. Павлов, И.Н. Пестовский, М.С. Проценко, Е.П. Пустовалов, Д.Ю. Риконен, И.Н. Самуйлов, Б.В. Сосунов, Ю.М. Сподобаев, В.И. Тамбовцев, А.П. Трофимов, В.В. Филиппов, Н.Г. Фитенко, В.П. Чернолес, В.В. Юдин.

Вместе с тем, многие важные научно-технические задачи, связанные с разработкой приземных и подземных антенн УКВ диапазона, обладающих повышенной устойчивостью к мощным механическим воздействиям, остаются актуальными на сегодняшний день:

- разработка малогабаритных приземных антенн УКВ диапазона, которые могут устанавливаться на стойках, предназначенных для размещения антенн СВЧ диапазона волн, аттестованных на предмет их надежного функционирования при мощных механических воздействиях;

- разработка приземных антенн УКВ диапазона вибраторного типа, механическая прочность и тепловая устойчивость которых существенно выше, чем у электрически изолированных вибраторов;

- разработка приземных многолучевых антенн УКВ диапазона полноазимутального обзора пространства, применение которых позволяет существенно повысить энергетический потенциал и пропускную способность систем управления, за счет одновременного формирования множества лепестков диаграммы направленности игольчатого типа;

- разработка малогабаритных подземных антенн УКВ диапазона, устойчиво функционирующих при различной проводимости окружающей почвы, при мощных механических воздействиях, а также - отвечающих требованию возможности заводского изготовления их основных узлов, легкости транспортировки к месту эксплуатации и простоте монтажа;

- разработка методики реально-временной диагностики степени неоднородности среды, используемой в качестве изолятора подземной антенны.

**Объектом исследования** являются приземные и подземные антенны УКВ диапазона с повышенной устойчивостью к мощным механическим и тепловым воздействиям.

**Предметом исследования** являются подходы, методы и способы построения приземных и подземных антенн УКВ диапазона волн, устойчиво функционирующих, при изменении в широких пределах материальных параметров окружающей почвы, а также – при мощных механических воздействиях.

**Целью работы** является разработка методологии проектирования приземных и подземных антенн УКВ диапазона волн, основные характеристики которых позволяют обеспечить устойчивое функционирование систем управления при изменении

проводимости подстилающей поверхности, а также – при мощных механических воздействиях.

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

анализа современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологий производства приземных и подземных антенн, входные характеристики и направленные свойства которых слабо зависят от проводимости почвы, а механические свойства – позволяют функционировать при сверхмощных механических воздействиях, а также – при нагреве и воздействии ионизирующих облучений;

анализа перспективных путей построения электрически малых антенн УКВ диапазона, связанных с использованием метаматериалов и импедансно-согласованных сред;

создания методики проектирования малогабаритных приземных антенн УКВ диапазона, электрически изолированных от заземленных стоек, на вершинах которых размещены композитные капсулы, предназначенные для размещения антенн СВЧ диапазона волн;

разработки и исследования монополей, защищенных от воздействия сверхмощных электромагнитных импульсов, за счет короткого замыкания их входа по постоянному току, механическая прочность и тепловая устойчивость которых существенно выше, чем у несимметричных вибраторов, электрически изолированных от подстилающей поверхности;

разработки и исследования многолучевых полноазимутальных антенн УКВ диапазона в виде осесимметричной линзы в форме усеченного конуса, в качестве материала которой используется мраморный или гранитный щебень, облучаемой системой монополей, или – электрически малых излучателей спирального типа;

разработки и исследования малогабаритных подземных антенн УКВ диапазона, стабильно функционирующих при изменении проводимости почвы, устойчивых к при мощным механическим воздействиям, качество согласования с фидерной линией и диаграмма направленности которых существенно не изменяются при навале дополнительного слоя почвы толщиной до 1 метра над антенной, а также - отвечающих требованию возможности заводского изготовления их основных узлов, легкости транспортировки к месту эксплуатации и простоте монтажа;

разработки методики диагностики степени неоднородности материальных параметров изоляционного материала подземной антенны, основанной на процедуре аппроксимации пространственного распределения электромагнитного поля, измеренного в ряде точек контура, ограничивающего анализируемую область пространства;

проведения натурных испытаний макетов разработанных приземных и подземных антенн, их конструкторской и технологической проработки с учетом условий эксплуатации.

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

– предложен и апробирован, путем численного электродинамического моделирования, подход к созданию малогабаритных приземных антенн УКВ диапазона, базирующийся на использовании, в качестве импедансно-согласованной среды, феррита с близкими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей, позволяющий в 20, и более раз, уменьшить габаритные размеры излучателя, при этом, в соответствии с критерием Чу-Харрингтона, коэффициент полезного

действия антенны падает приблизительно на 6 дБ и уменьшается ширина полосы рабочих частот, что является ценой уменьшения габаритных размеров антенного устройства;

– разработана методика проектирования электрически малых антенн УКВ диапазона в виде двухзаходной плоской Архимедовской спирали с плечами переменной ширины, а также – многозаходных цилиндрических спиралей, являющихся разновидностью петлевого вибратора Пистолькорса, принцип построения которых заключается в совмещении пространственной ориентации дипольного электрического момента и дипольного магнитного момента, вследствие чего уменьшается отношение энергии электрической составляющей поля к энергии магнитной его составляющей, сосредоточенных в ближней зоне поля излучения антенны, в результате чего уменьшаются потери мощности в металлической стойке и подстилающей поверхности, что позволяет реализовать значения коэффициента полезного действия существенно выше, чем у несимметричного электрического вибратора, запитанного относительно сетчатой металлической поверхности;

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

– разработана методика проектирования многолучевых полноазимутальных антенн УКВ диапазона на основе осесимметричной линзы, имеющей форму усеченного конуса, в качестве материала которой используется мраморный или гранитный щебень, облучаемой системой монополей, или – электрически малых излучателей спирального типа;

– разработана методика проектирования подземных УКВ антенн резонаторно-щелевого типа со щелями «Г»-образной формы, позволяющая, за счет возбуждения нескольких щелей с различными фазами, реализовать диаграмму направленности квази-кардиоидного, тороидального, или - игольчатого вида, а также – уменьшить габаритные размеры антенны, за счет выбранной геометрии щелей и диэлектрического заполнения полостей резонаторов;

– разработана методика проектирования подземных УКВ патч-антенн с метаматериальной подложкой в виде квадратных металлических пластин, середина каждой из которых соединена с подстилающей металлической поверхностью излучающего полоска патч-антенны, позволяющая уменьшить размеры антенного устройства более, чем в 3 раза, даже при использовании вспененного диэлектрика в качестве конструктивной основы;

– разработана модификация двухзаходной спирали Архимеда с экраном, реализуемая с использованием аттестованного на сверхмощное механическое воздействие коаксиального кабеля, отличающаяся тем, что в центре спирали ее плечи имеют вид половин окружностей с радиусом, большим или равным минимальному радиусу изгиба кабеля, благодаря чему оба плеча спирали изготавливаются из единого коаксиального кабеля с неразрывным внутренним проводником, что обеспечивает высокую механическую устойчивость подземной антенны, а геометрия ее плечей представляет, с точки зрения электродинамики и теории антенн, последовательное

соединение вибратора с плечами полукруглой формы, с Архимедовской спиралью, а с точки зрения механики – последовательное соединение двух пружин, компенсирующих, как сжатие, так и – вращательные деформации, что придает антенне дополнительную устойчивость к сверхмощным механическим воздействиям;

– разработана методика анализа степени неоднородности материальных параметров изолятора подземной антенны, основанная на использовании принципа эквивалентных полей и токов, реализованная на основе процедуры аппроксимации распределения поля на плоскости, ограниченной контуром, в ряде точек которого значения поля измерены с помощью электрически малых антенных элементов, сводящейся к нахождению комплексных амплитуд вспомогательных источников поля, суперпозиция излучения которых описывает поле в неоднородной среде, без использования априорной информации о пространственном распределении ее диэлектрической проницаемости и проводимости.

**Теоретическая значимость** работы заключается в развитии методологии проектирования приземных и подземных антенн УКВ диапазона волн, основанной на первостепенной значимости сохранения их функционального назначения и основных характеристик в заданных пределах при изменении проводимости подстилающей поверхности, а также – при мощных механических воздействиях. Предложены и апробированы пути построения электрически малых антенн УКВ диапазона волн, электрически изолированных от заземленных стоек, коэффициент полезного действия которых выше, чем у четвертьволнового несимметричного вибратора, при условии навала почвы. Показана перспективность применения в качестве импедансно-согласованной среды феррита с близкими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей для реализации электрического вибратора, длина которого составляет  $0.023\lambda_0$ . Показана перспективность использования метаматериальной подложки для уменьшения более, чем в 3 раза габаритных размеров подземной патч-антенны УКВ диапазона волн. Предложена модификация двухзаходной спирали Архимеда подземного базирования, характеризующейся высокой устойчивостью к при мощным механическим воздействиям, имеющая удовлетворительные электрические характеристики благодаря сохранению автоматической отсечки тока в ее плечах. Разработана методика реально-временного анализа степени неоднородности изолятора подземной антенны, не требующая априорной информации о материальных параметрах среды, окружающей антенну.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке приземных и подземных антенн, сохраняющих свою работоспособность при мощных механических воздействиях, а также – при навале слоя почвы толщиной до 1 метра, и при изменении проводимости почвы в широких пределах.

**Методы исследования.** В работе были использованы методы анализа и параметрического синтеза антенн, вычислительные методы технической электродинамики, реализованные в пространственно-временной и пространственно-частотной областях, а также - стандартные методики натуральных измерений характеристик и параметров приземных и подземных антенн УКВ диапазона.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

– использование феррита с близкими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей в качестве импедансно-согласованной среды

позволяет более, чем в 20 раз, уменьшить габаритные размеры приземных вибраторных антенн в УКВ диапазоне волн;

- коэффициент полезного действия приземных антенн в виде двухзаходной плоской Архимедовской спирали с плечами переменной ширины, а также – трехзаходной цилиндрической спирали, размещенной в полости на вершине заземленной стойки, плечи которой замкнуты на кольца, являющиеся основаниями цилиндра, имеющей длину  $0.019\lambda_0$  и функционирующей в частотной области с относительной шириной полосы около 7.4 %, расположенной вблизи границы КВ и УКВ диапазонов, от 1.5 до 1.9 дБ выше, чем у четвертьволнового несимметричного электрического вибратора, благодаря меньшим потерям мощности в подстилающей поверхности;

- многолучевая полноазимутальная антенная система в виде линзы в форме усеченного конуса, материалом которой является мраморный или гранитный щебень, с высотой  $0.27\lambda_{max}$  и диаметром основания  $4.5\lambda_{max}$ , характеризуется коэффициентом направленного действия до 15.5 дБ в полосе частот УКВ диапазона волн с относительной шириной 25.2 %, при этом суммарные потери, включающие потери в щебне и стальной подстилающей поверхности, не превышают  $2\div 3.4$  дБ;

- применение метаматериальной подложки в виде квадратных металлических пластин, замкнутых на подстилающую поверхность, позволяет уменьшить габаритные размеры подземной патч-антенны УКВ диапазона более, чем в 3 раза;

- модифицированная двухзаходная спираль Архимеда над экраном, в центре которой ее плечи имеют вид половин окружностей с радиусом, большим или равным минимальному радиусу изгиба жесткого коаксиального кабеля с неразрывным внутренним проводником, имеет коэффициент полезного действия от -11 дБ до -12 дБ на нижних частотах УКВ диапазона волн, при размещении антенны в бассейне с гранитным щебнем на глубине 1 метр от поверхности земли, при навале сверху антенны слоя почвы толщиной 0.5 метра с проводимостью 0.005 См/м;

- использование метода вспомогательных дискретных источников поля позволяет реализовать реально-временную процедуру анализа пространственного распределения потока мощности в неоднородной диссипативной среде на основе измеренных значений поля в ряде точек контура, ограничивающего плоскость наблюдения, без использования априорной информации о материальных параметрах среды, окружающей подземную антенну.

**Степень достоверности** полученных результатов обусловлена использованием известных методов анализа и синтеза антенных устройств, а также – известных вычислительных методов технической электродинамики. Полученные результаты не противоречат фундаментальным положениям теории антенн и электродинамики, а также – опубликованным результатам других авторов по исследуемой тематике. Теоретическое обоснование полученных результатов проводилось на основе фундаментальных положений электродинамики и теории антенн. Экспериментальные данные получены в научно-производственном предприятии «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж) с использованием стандартных методик измерения характеристик и параметров приземных и подземных антенн УКВ диапазона, и хорошо согласуются с результатами их численного электродинамического анализа.



**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на следующих научно-технических конференциях: международной НТК «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж), международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» (г. Самара), международной НТК Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC) (г. Санкт-Петербург). Результаты исследований подземной патч-антенны с метаматериальной подложкой докладывались на заседании рабочей группы научно-технического совета Военно-промышленной комиссии РФ по проблемным вопросам использования нанотехнологий при создании ВВСТ от 15.12.2021 г, протокол № НТС(ВПК)-(РГ-3)-2(25)пр.

**Реализация и внедрение результатов работы.**

Основные результаты работы внедрены в АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж) при разработке приземных и подземных антенн УКВ диапазона для систем управления, в АО «ВНИИ «Вега» (г. Воронеж) при разработке подземных антенн для аппаратуры беспроводного доступа в сеть Интернет, а также – в научно-техническом центре радиоэлектронной борьбы (г. Воронеж) при разработке многолучевых приземных антенн УКВ диапазона, что подтверждается актами внедрения.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах, из них 12 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 работ опубликовано в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций (одна из которых включена в базу данных Scopus), получен 1 патент РФ на изобретение.

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертационной работы, обладающие научной новизной и выносимые на защиту, получены автором лично. В работах [1-7, 9, 12-17] автору принадлежит разработка методик проектирования приземных и подземных антенн для аппаратуры управления; в работе [8] автором проведено обоснование выбора математического аппарата, используемого для анализа приземных и подземных антенн; в работе [10] автором разработана методика анализа степени неоднородности среды; в работе [11] автором разработана методика проведения эксперимента, проводилось участие в экспериментальных исследованиях и обработка результатов; в работе [18] автором разработана физико-математическая модель, основанная на использовании принципа эквивалентных источников, позволяющая аппроксимировать пространственное распределение электромагнитного поля вблизи трехмерных рассеивателей; в работе [19] автором предложено и обосновано конструктивное решение по построению антенного устройства.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует п. 1, 2, 3, 8, 10 паспорта специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 182 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 207 страницах, содержит 131 рисунок и 1 таблицу.

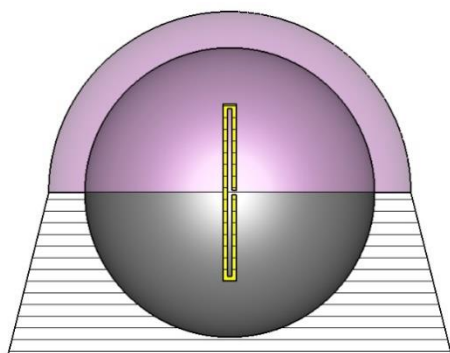
**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна, обоснованы теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности полученных результатов, обозначен личный вклад автора.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологий производства приземных и

подземных антенн, качество согласования с фидерной линией и направленные свойства которых существенно не изменяются при изменении влажности почвы, при мощных механических воздействиях, а также – при навале слоя почвы. Проведен анализ перспективных путей построения электрически малых антенн УКВ диапазона. Сформулированы основные задачи, решение которых необходимо для достижения цели диссертации.

**Во второй главе** разработана методология проектирования приземных антенн УКВ диапазона волн, механические свойства которых делают возможным их функционирование даже при нахождении вблизи источника мощных механических воздействий. Разработка и исследование надземных антенн УКВ диапазона велась в рамках двух основных подходов: 1) – размещение электрически малой антенны в сверхпрочной композитной капсуле, установленной на вершине стальной стойки, базирующейся на железобетонной платформе, при этом используются капсула и стойка, прошедшие все необходимые испытания и аттестованные к оговоренным выше условиям эксплуатации; 2) – разработка несимметричного вибратора с шунтовым питанием, внутренняя, или – внешняя мощная стальная опора которого непосредственно соединяется со стальной плитой, установленной на железобетонной платформе.

При исследовании путей реализации первого подхода были разработаны три вида антенн: 1) – вибратор Пистолькорса, размещенный внутри импедансно-согласованного материала – феррита с близкими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей; 2) – симметричный электрический вибратор с плечами в виде плоских Архимедовских спиралей переменной ширины; 3) – модификация вибратора Пистолькорса с тремя плечами в виде ветвей спирали, навитых на цилиндрическое основание, концы которых замкнуты на верхнее и нижнее основания цилиндра.



На рис. 1 показана модель вибратора Пистолькорса длиной 196 мм, размещенного внутри шара с диаметром 320 мм, изготовленного из феррита марки 20 ВН. Нижняя половина ферритового шара размещена в полости на вершине усеченного стального конуса высотой 1.2 м и диаметрами верхнего и нижнего оснований 0.4 м и 1 м, соответственно. Сверху ферритовый шар закрыт высокопрочной композитной капсулой ( $\epsilon_r = 9.9$ ;  $tg(\delta_d) = 0.002$ ) с толщиной стенки 40 мм. При проведении численного электродинамического анализа с использованием метода конечного интегрирования Вейланда, реализованного в пространственно-временной области, учитывались все материальные параметры всех деталей антенны, в т.ч. – потери в феррите электрического и магнитного характера, электрические потери в капсуле, а также – конечная проводимость металлов вибратора (медь) и конуса (сталь). Было выяснено, что среднее значение активной части входного сопротивления антенны на частоте полуволнового резонанса 35.9 МГц составляет около 18 Ом, что позволяет использовать для запитки антенны трансформатор с коэффициентом трансформации сопротивления 1:4. Относительная ширина полосы рабочих частот, при значении коэффициента отражения не более -10 дБ, – около 0.6%. Благодаря тому, что вибратор

изолирован относительно конуса, а также – укорочению длины волны в феррите в  $\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}$  раз, влияние параметров грунта ( $\epsilon_{r \text{ гр.}}$ ;  $\sigma_{\text{гр.}}$ ) на коэффициент полезного действия антенны (КПД)  $\eta_{\Sigma}$  может быть существенно ослаблено: при  $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 13$  и  $\sigma_{\text{гр.}} = 0.05$  См/м значение  $\eta_{\Sigma} = -9$  дБ; а при изменении проводимости на порядок, при  $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$  и  $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005$  См/м значение  $\eta_{\Sigma} = -11$  дБ. При идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности  $\eta_{\Sigma} = -6$  дБ. Значение входного сопротивления антенны при изменении параметров грунта в широких пределах существенно не изменяется, что позволяет обойтись без использования автоматического согласующего устройства. Отметим возможность варьирования величиной магнитной проницаемости феррита путем пропускания постоянного тока через петлевой вибратор Пистолькорса, что позволяет осуществлять, при необходимости, перестройку частоты его резонанса.

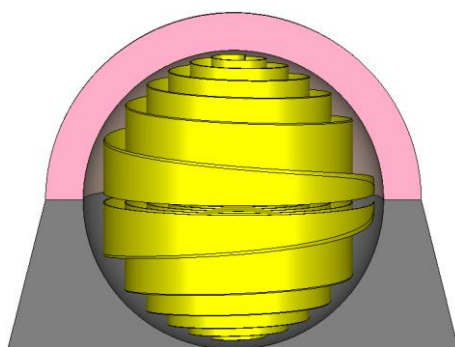


Рис. 2. Вибратор с плечами в виде спиралей Архимеда

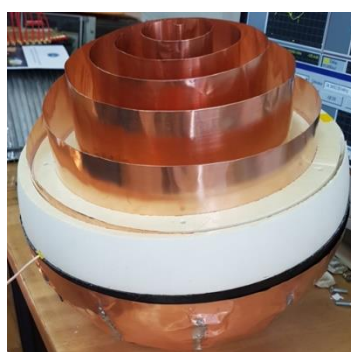


Рис. 3. Макет вибратора

На рис. 2 показана модель симметричного электрического вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда (медь, толщина - 0.2 мм), расположенного внутри полости сферической формы, размеры и материалы конуса и капсулы – прежние. Высота вибратора составляла 304 мм,

период спирали – 23 мм, длина каждого из его плечей - 2610 мм. В результате численного анализа было выяснено, что центральная рабочая частота антенны составляет 38.1 МГц, при этом относительная ширина полосы рабочих частот, ограниченная значением коэффициента отражения от входа антенны -10 дБ, составляет около 0.26%. Среднее значение входного сопротивления – 6 Ом. Расчетная величина суммарных потерь в антенне в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности составляет около 0.9 дБ. При расположении конуса на стальном основании размерами  $5 \times 5 \text{ м}^2$  и параметрах грунта  $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$  и  $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005$  См/м значение КПД равно  $\eta_{\Sigma} = -3.3$  дБ.

В случае, если конус установлен непосредственно на грунте, КПД антенны уменьшается до  $\eta_{\Sigma} = -9.1$  дБ. Для сравнения отметим, что несимметричный вибратор с резонансной высотой 2 м, запитанный относительно стального основания с размерами  $5 \times 5 \text{ м}^2$ , при засыпке его слоем грунта толщиной 0.8 м и параметрами  $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$  и  $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005$  См/м, имеет значение КПД  $\eta_{\Sigma} = -11.5$  дБ, т.е. – вибратор с плечами в виде спирали Архимеда имеет значение КПД на 2.4 дБ выше, чем несимметричный вибратор резонансной высоты, в случае засыпки его грунтом, при одинаковом расстоянии, от вершины конуса до грунта, и от вершины несимметричного вибратора до грунта, равном высоте конуса 1.2 м. Также отметим, что величина входного сопротивления вибратора с плечами в виде спирали Архимеда практически не изменяется в рассмотренных выше трех случаях (бесконечно проводящей подстилающей поверхности, стальном основании  $5 \times 5 \text{ м}^2$  и

подстилающей поверхности с  $\varepsilon_{r \text{ гр.}} = 8$  и  $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$ ), оставаясь равной 6 Ом, поэтому для питания антенны не требуется использование автоматического согласующего устройства (АСУ); в то время, как, активная часть входного сопротивления несимметричного вбратора изменяется приблизительно в 6 раз при засыпке его слоем грунта толщиной 0.8 м, что требует использования АСУ.

Модификация вибратора Пистолькорса с тремя плечами в виде цилиндрических спиралей (рис. 4) с резонансной частотой 35.1 МГц характеризуется внешним диаметром спирали 216 мм и высотой 206 мм, внутренний диаметр цилиндра – 238 мм, глубина полости в цилиндре – 113 мм. Высота антенны со стойкой – 1200 мм.

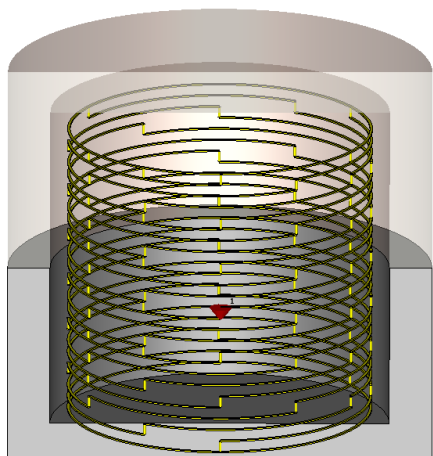


Рис. 4. Вибратор Пистолькорса с тремя спиральными плечами



а)



б)

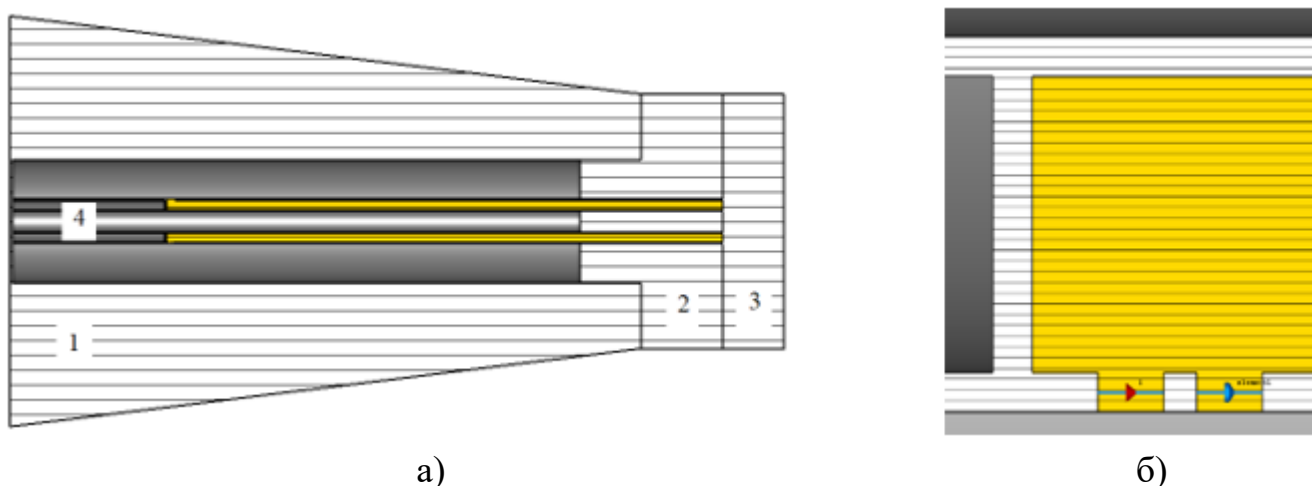
Рис. 5. Макет антенны высотой 700 мм (а) и его расположение при проведении полевых испытаний (б)

Входное сопротивление на частоте резонанса – около 135 Ом, что делает возможным использование трансформатора 2:1 для питания антенны от коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом. Относительная ширина полосы частот при значении коэффициента отражения от входа антенны не более -10 дБ составляет 2.4%. В полосе частот около 7.4 % вибратор Пистолькорса с тремя спиральными плечами имеет коэффициент усиления, на 1.5-1.9 дБ выше, чем у четвертьволнового несимметричного электрического вибратора, запитанного относительно подстилающей поверхности в виде металлической сетки с периодом 50 мм и размерами  $3 \times 3 \text{ м}^2$ . Исследования макета антенны показали, что использование каркаса из вспененного диэлектрика снижает значение резонансной частоты приблизительно до 27 МГц.

Была также разработана методика проектирования вибраторных антенн, характеризующихся более высокой механической прочностью, чем несимметричный вибратор, изолированный от подстилающей поверхности. Один из вариантов антенны показан на рис. 6. На рис. 6, а) обозначено: 1 – стальное основание; 2 – композитный изолятор; 3 – вершина вибратора; 4 – внутренний монополь с шунтовой запиткой.

Натурные испытания макета антенны высотой 1535 мм (рис. 6, в) подтвердили результаты ее моделирования, и показали, что входное сопротивление антенны составляют около 4 Ом (для запитки антенны использованы два последовательно включенные трансформатора 1:4, а также – сосредоточенная индуктивность). На частотах выше 30 МГц антенна существенно выигрывает по коэффициенту усиления у четвертьволнового штыря, настроенного на частоту 32 МГц, запитанного относительно

металлической сетки с размерами  $3 \times 3 \text{ м}^2$ , за счет уменьшенных потерь в земле, благодаря верхней ее запитке.



в)

Рис. 6. Вибратор с верхней запиткой (а), точки подключения фидера и сосредоточенной индуктивности (б), фото макета (в)

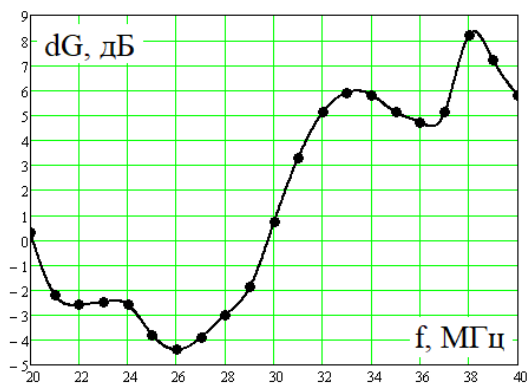


Рис. 7. Выигрыш в коэффициенте усиления относительно четвертьволнового штыря, дБ

Разработанные антенные элементы (рис. 1-6) могут быть использованы для облучения тела линзы многолучевой антенной системы (МАС) УКВ диапазона, рис. 8. В работе проведен численный анализ МАС с линзой в форме усеченного конуса с диаметром основания 30 м, диаметром вершины 26 м, высотой 1.8 м и диаметром стальной подстилающей поверхности 40 м. В качестве материала линзы предложено использовать гранитный или мраморный щебень. Для определения эффективной комплексной диэлектрической проницаемости щебня использовалась формула Лихтенкера для мелкодисперсной смеси двух диэлектриков – частиц гранитного щебня и воздуха:  $\ln(\epsilon_{эфф}) = x_1 \cdot \ln(\epsilon_1) + (1 - x_1) \cdot \ln(\epsilon_2)$ , где  $x_1$  и  $x_2 = (1 - x_1)$  – относительные объемные концентрации двух компонентов смеси;  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  – относительные диэлектрические проницаемости двух компонентов смеси. Эффективная диэлектрическая проницаемость щебня была принята равной  $\epsilon_{эфф} = 3.0$ , а значение тангенса угла диэлектрических потерь на низких частотах УКВ диапазона –  $tg(\delta_d) = 0.02$ .

В рассматриваемой модели МАС, для упрощения, продолжающаяся подстилающая поверхность считалась бесконечно проводящей и бесконечно протяженной. Суммарные потери, включающие потери в щелке, стальной подстилающей поверхности, в вибраторных антенных элементах с рефлекторами, не превышают  $2 \div 3.4$  дБ. Коэффициент направленного действия на частоте 35 МГц составляет 15.5 дБ, при этом ширина каждого главного лепестка в азимутальной плоскости по уровню половинной мощности составляет около  $9^\circ \div 10^\circ$ .

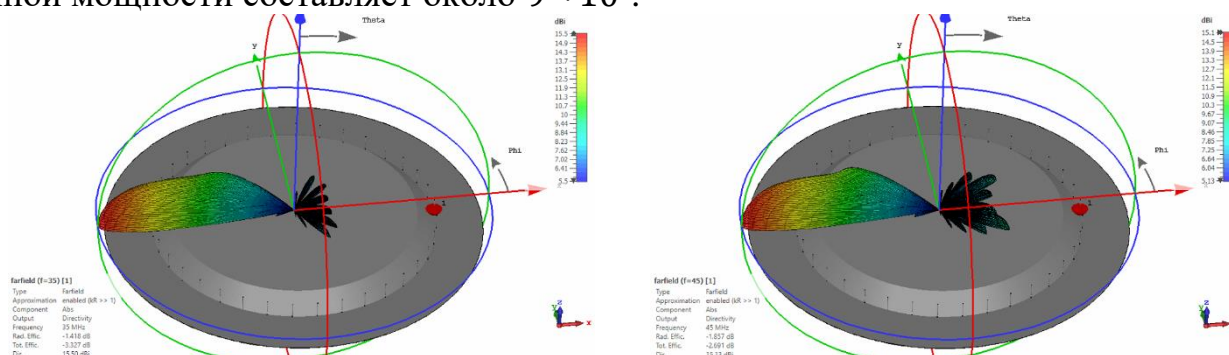


Рис. 8. Диаграммы направленности одного луча МАС,  $f=35$  МГц и  $f=45$  МГц

В третьей главе рассмотрены подземные антенны УКВ диапазона резонаторно-щелевого типа, а также – патч- антенна с метаматериальной подложкой. Один из вариантов антенны резонаторно-щелевого типа с 4 щелями в виде буквы «Г» показан на рис. 9. Габаритные размеры антенны составляют  $2600 \times 2600 \times 175$  мм<sup>3</sup>; центральная частота функционирования – 35.5 МГц, ширина полосы частот, ограниченная значением коэффициента отражения -10 дБ, составляет около 0.3 МГц.

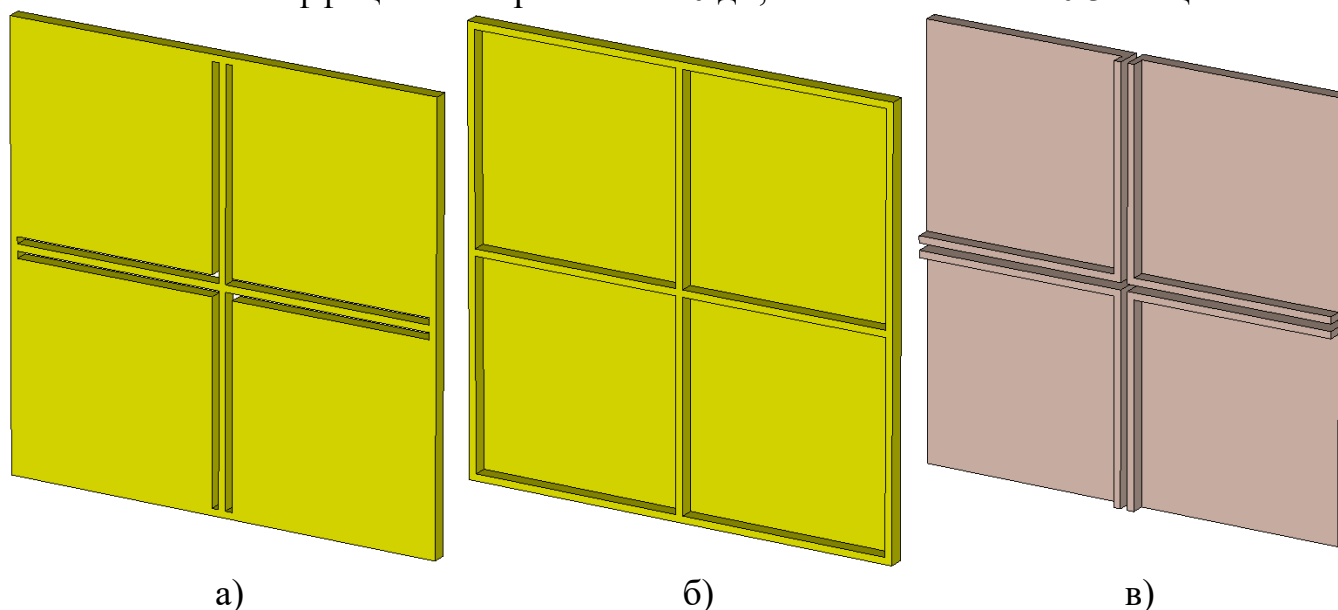


Рис. 9. Подземная антенна с 4 щелями: а) – плита со щелями; б) – основание, полости резонаторов; в) – диэлектрическое заполнение резонаторов (композитный материал)

Потери в материалах антенны составляют около 0.6 дБ (без учета потерь в грунте и слое гранитного щебня). Запитка антенны – квадратурная, осуществляется с помощью четырех коаксиальных кабелей (50 Ом), подключаемых вблизи внешних концов щелей. Коэффициент направленного действия антенны, расположенной в свободном пространстве, составляет около 5 дБи, диаграмма направленности – игольчатого типа, ширина главного лепестка в обеих плоскостях, по уровню -3 дБ, составляет

около  $106.5^\circ$ . Выяснено, что при навале слоя грунта с  $\varepsilon_{r \text{ гр.}} = 8$  и  $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005$  См/м толщиной 0.5 м суммарные потери (с учетом потерь в грунте) составляют около 10 дБ. Подключая 4 питающие антенну коаксиальные кабели на различном расстоянии от концов щелей, можно настраивать антенну в резонанс при изменении материальных параметров грунта, а также – при навале слоя грунта над антенной.

Модель и фото патч- антенны УКВ диапазона показаны на рис. 10. Габаритные размеры антенны составляют  $1830 \times 1830 \times 200$  мм<sup>3</sup>; центральная частота функционирования – 40 МГц, ширина полосы частот, ограниченная значением коэффициента отражения -10 дБ, составляет около 0.7 МГц. Потери в материалах антенны составляют около 2 дБ (без учета потерь в грунте). Форма диаграммы направленности показана на рис. 11, максимальная величина коэффициента направленного действия составляет около 6.9 дБи.

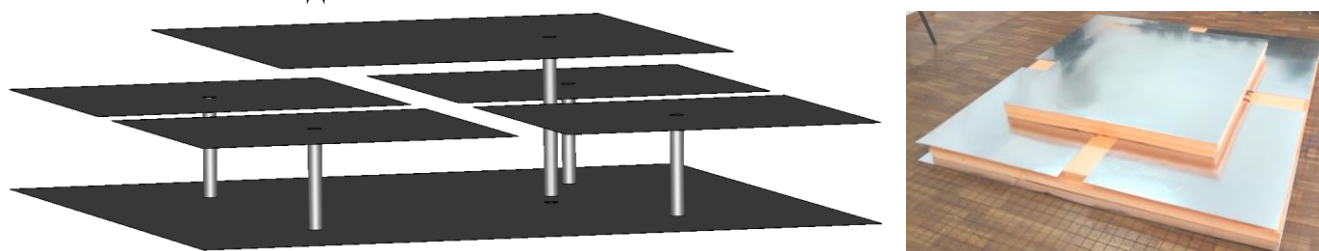


Рис. 10. Модель и макет патч- антенны с метаматериальной подложкой

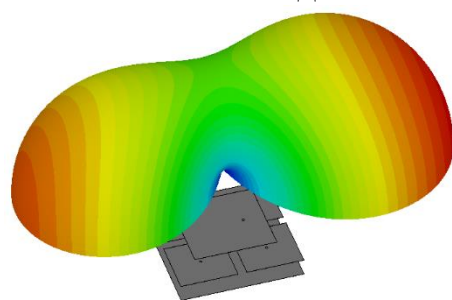


Рис. 11. Диаграмма направленности антенны

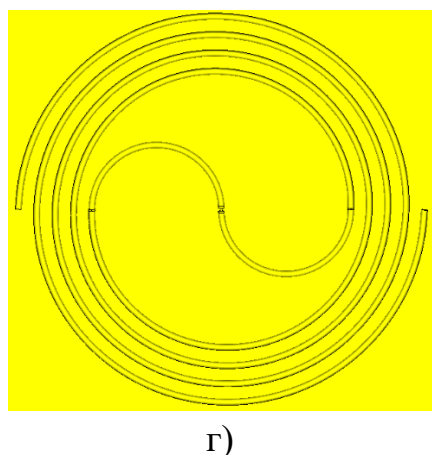
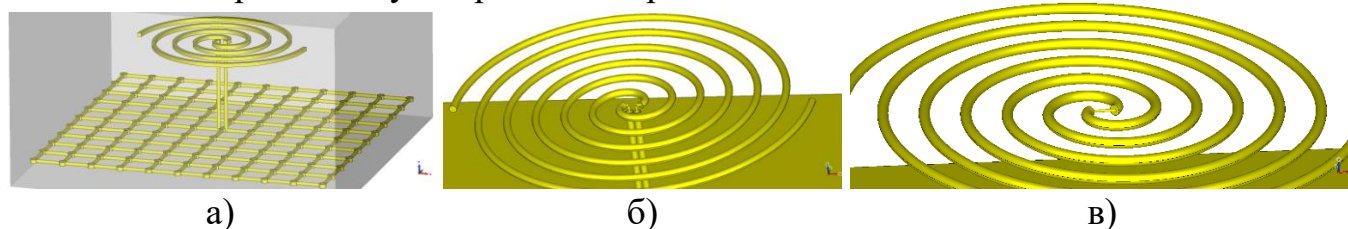
Во время натуральных испытаний антенна размещалась в яме с размерами  $2.5 \times 2.5$  м<sup>2</sup> и глубиной 0.5 м; на дне располагалась металлическая сетка с шагом ячейки 50 мм. Суммарная толщина слоя грунта над антенной составляла 0.5 м (0.3 м – для засыпки антенны вровень с поверхностью земли и дополнительный слой 0.2 м). Грунт равномерно полит водой (40 литров). Коэффициент усиления антенны оказался равным -9 дБ, относительно четвертьволнового штыря над сеткой  $4 \times 4$  м<sup>2</sup>.

**В четвертой главе** рассмотрены три варианта конструкции подземной УКВ антенны, основой которой является двухзаходная Архимедовская спираль с экраном, плечи которой изготовлены из коаксиального кабеля: 1) – с шунтовым питанием, реализованным с использованием двух отрезков коаксиального кабеля, рис. 12, а) – к плечам спирали подключены внешние проводники двух отрезков коаксиального кабеля, образующих шунт; рис. 12, б) – плечи спирали подключены к внутренним проводникам двух отрезков коаксиального кабеля, оболочки которых соединены; 2) – с запиткой сбоку, плечи спирали являются регулярными, с постоянным периодом, рис. 12, в); 3) – с запиткой сбоку, центральная часть спирали заменена двумя полуокружностями с радиусами, большими радиуса минимального изгиба коаксиального кабеля, рис. 12, г). В качестве конструкционного материала предложено использовать гранитный щебень.

Выбор двухзаходной Архимедовской спирали, расположенной над экраном, в качестве излучателя обусловлен следующими обстоятельствами: возможность реализации плечей спирали из отрезков коаксиального кабеля, соответствующего требованиям, предъявляемым с точки зрения механической прочности; возможность реализации подземной антенны, обладающей достаточно широкой полосой рабочих частот

по качеству согласования с фидерной линией, а также – по виду и параметрам диаграммы направленности; простота и дешевизна конструкции, удобство запитки от коаксиального кабеля; Архимедовская спираль, с точки зрения ее механических свойств, ведет себя, подобно пружине, при механических воздействиях, при окончании которых возвращается, практически, в исходную форму.

Размеры бассейна, заполненного гранитным щебнем, составляли  $4.5 \times 4.5 \times 2.55 \text{ м}^3$ ; толщина слоя щебня, насыпанного над плечами спирали – 1 м; плечи спирали – медный провод диаметром 44 мм; значение максимального диаметра спирали для вариантов антенны на рис. 12, а), б), в) – 2350 мм; шаг спирали – 500 мм; зазор между спиралью и экраном – 1170 мм; размеры экрана, состоящего из медных проводников круглого сечения, составляли  $4070 \times 4070 \text{ мм}^2$ . Моделирование проводилось с учетом расположения антенны в грунте с параметрами  $\epsilon_r = 8$  и  $\sigma = 0.005 \text{ См/м}$ ; толщина слоя грунта над верхней кромкой бассейна с гранитным щебнем составляла 0.5 метра. Вариант антенны на рис. 12. г) характеризуется максимальным диаметром спирали 2800 мм и зазором между спиралью и экраном 400 мм.



Наилучшим качеством согласования характеризуются варианты антенны, показанные на рис. 12, а), б) – в полосе от 30 до 40 МГц модуль коэффициента отражения меньше -10 дБ; вариант на рис. 12, в) имеет модуль коэффициента отражения менее -10 дБ на частотах выше 38.2 МГц, в полосе частот от 30 до 38.2 МГц модуль коэффициента отражения меньше -7.5 дБ (среднее значение входного сопротивления спирали с экраном – около 80 Ом, а волновое сопротивление кабеля – 50 Ом); вариант на рис. 12, г) имеет модуль коэффициента отражения менее -10 дБ на частотах от 33.5 до 34 МГц. Варианты антенны на рис. 12, а), б), в) характеризуются суммарными потерями не более 8.5 дБ в полосе частот от 30 до 40 МГц; вариант на рис. 12, г) имеет суммарные потери не более 12 дБ в полосе частот от 32.8 до 34.3 МГц. Максимальный коэффициент направленного действия (в зенитном направлении) всех вариантов антенны, показанной на рис. 12, составляет от 6.7 до 6.9 дБ в полосе частот от 30 до 40 МГц.

Был изготовлен уменьшенный, примерно в 20 раз, относительно оригинала, макет спирали Архимеда с экраном и шунтовым питанием, рис. 13. В качестве материала заполнения бассейна с антенной была выбрана прозрачная эпоксидная смола, значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь которой близки к соответствующим параметрам гранитного щебня на частотах функционирования антенны – оригинала, и уменьшенного макета. Сравнение характеристик макета спирали Архимеда и несимметричного



электрического вибратора с сеточной подстилающей поверхностью эквивалентного размера подтвердили известные преимущества подземных антенн с горизонтальной поляризацией в условиях навала слоя грунта одинаковой толщины, по критериям величины КПД и сохранения качества согласования с фидерной линией.

Подземная антенна в виде спирали Архимеда с экраном (рис. 13) уступает по коэффициенту усиления четвертьволновому штырю от 5 до 8 дБ в ее рабочей полосе частот, приблизительно от 600 до 1200 МГц. При размещении антенны под слоем грунта толщиной 5 см (средней влажности и влажного) коэффициент усиления антенны существенно не изменяется, на отдельных частотах уменьшение коэффициента усиления составляет не более 4-5 дБ.

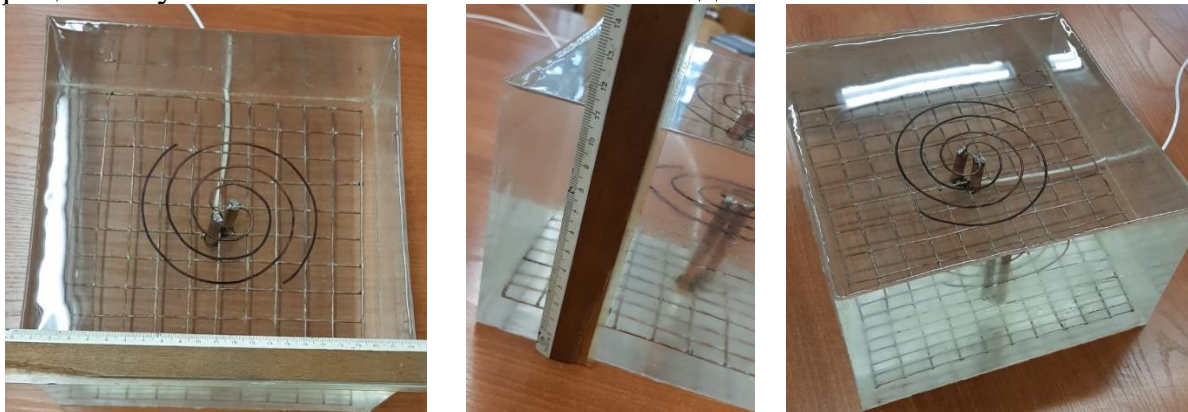


Рис. 13. Уменьшенный макет спирали Архимеда с экраном и шунтовым питанием

Предложена методика реально-временной оценки степени неоднородности диэлектрической среды, используемой для изоляции подземной антенны УКВ диапазона, основанная на использовании электродинамического принципа эквивалентных полей и токов. Проверка методики выполнялась с использованием модели, показанной на рис. 14.

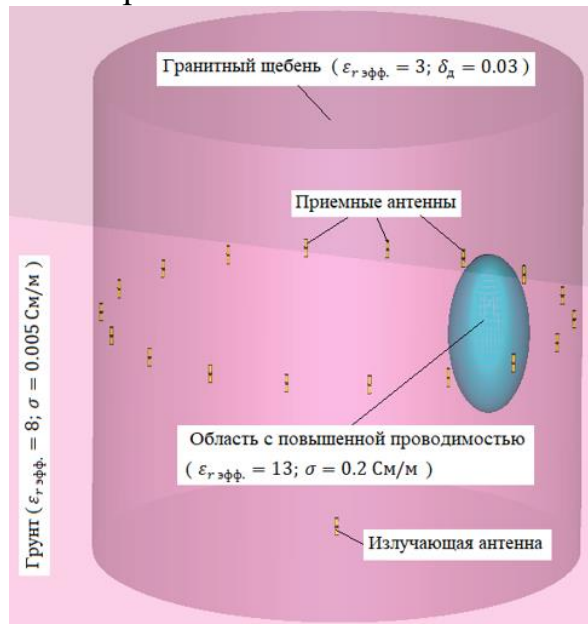


Рис. 14. Модель неоднородного изолятора подземной антенны

Электромагнитное поле в анализируемой плоскости, ограниченной датчиками в виде электрически коротких симметричных вибраторов, аппроксимировалась как суперпозиция полей излучения вспомогательных точечных источников  $Q_m$ , удаленных от области наблюдения на расстояние более  $10\lambda_{в}$  среде:

$$\dot{E}(P_n) = -i\omega_0\mu_a \cdot \sum_{m=1}^N (U_m \cdot \dot{G}(P_n; Q_m)),$$

$$n = 1, 2, \dots, N, \quad G(P, Q) = -\frac{\pi i}{2} \cdot H_0^1(k_0 r_{P,Q}),$$

где  $U_m$  – комплексные амплитуды источников;  $H_0^1(z) = J_0(z) + iN_0(z)$  – функция Ганкеля первого рода нулевого порядка.

Компоненты вектора напряженности магнитного поля вычислялись с использованием 2-

го уравнения Максвелла:  $\dot{H}_x = \frac{1}{-i\omega_0\mu_a} \frac{d\dot{E}_z}{dy}$ ,  $\dot{H}_y = \frac{1}{i\omega_0\mu_a} \frac{d\dot{E}_z}{dx}$ , далее вычислялись компоненты вектора Пойнтинга.

Проведенные численные эксперименты показали, что в области частот, близких к частоте полуволнового резонанса области с повышенной проводимостью (эллипсоид на рис. 14), пространственное распределение реальной части вектора Пойнтинга характеризуется повышенной концентрацией в области, прилегающей к месту расположения эллипсоида с повышенной проводимостью и диэлектрической проницаемостью; при этом на частотах ниже и выше полуволнового резонанса направления вектора Пойнтинга в неоднородности являются противоположными.

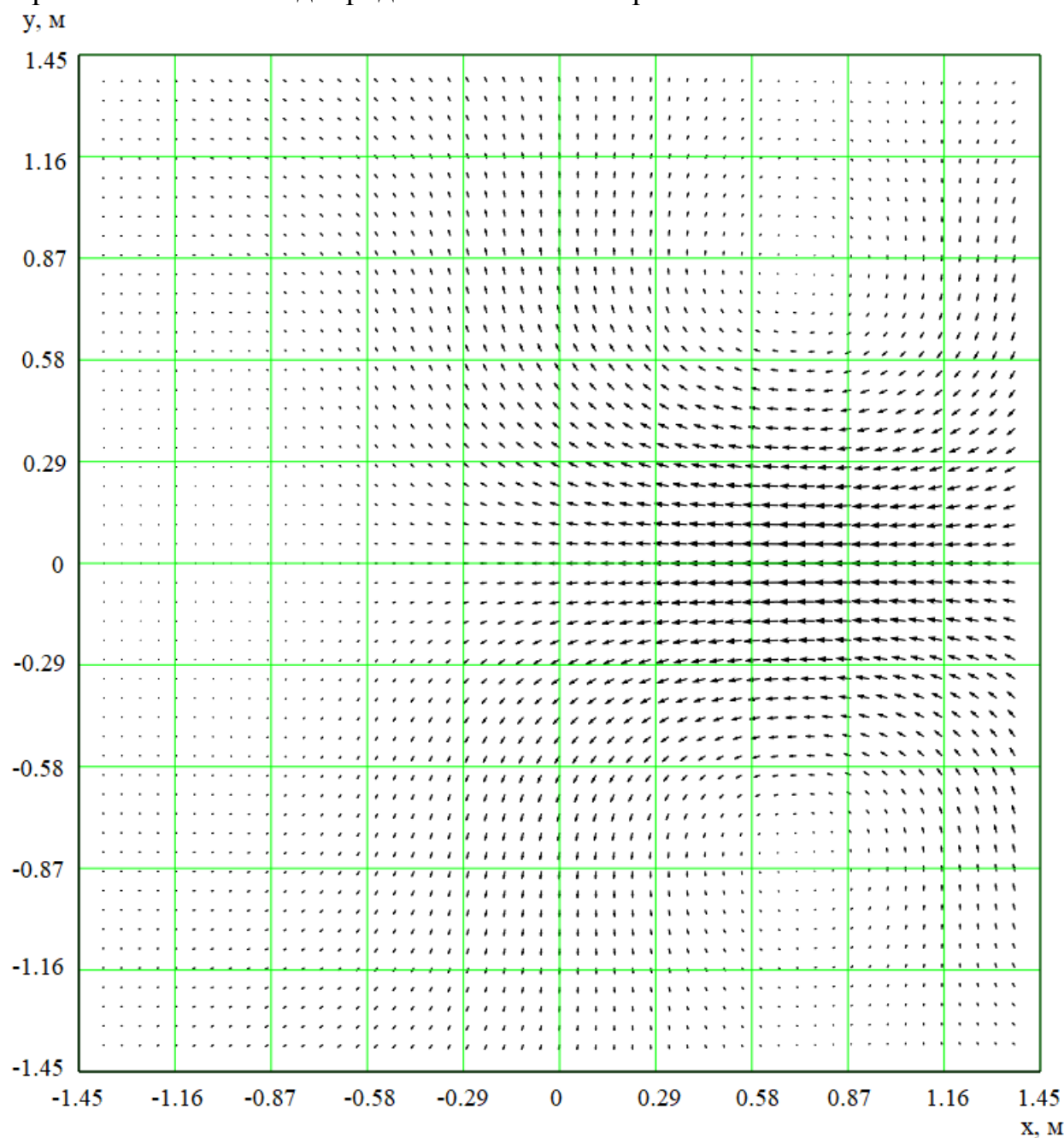


Рис. 15. Распределение реальной части вектора Пойнтинга на плоскости в сечении  $z = -1.5$  м (точка с координатами  $(0;0;0)$  расположена на верхней грани цилиндра из гранитного щебня, см. рис. 14) на частоте  $F = 100$  МГц

На частоте волнового резонанса проводящий эллипсоид, подобно электрическому вибратору с полной длиной  $2l = \lambda_0$ , характеризуется повышенной добротностью, а следовательно – изолированностью от окружающего его объема среды, поэтому на частоте волнового резонанса в области с повышенной проводимостью наблюдается минимум потока активной мощности электромагнитной волны.

**В заключении** формулируются основные результаты и выводы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В рамках проведенных исследований была разработана методология проектирования приземных и подземных антенн УКВ диапазона волн, основные характеристики которых позволяют обеспечить устойчивое функционирование систем управления при изменении проводимости почвы в широких пределах, при нахождении антенн вблизи источника мощных механических воздействий, а также – при навале слоя почвы толщиной до 1 метра.

**Основными результатами диссертации являются:**

1. Проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологий производства приземных и подземных антенн, входные характеристики и диаграмма направленности которых слабо зависят от проводимости почвы, при мощных механических воздействиях, а также – при навале слоя почвы. Проведен анализ перспективных путей построения электрически малых антенн УКВ диапазона, связанных с использованием метаматериалов и импедансно-согласованных сред.

2. Выяснено, что в качестве импедансно-согласованной среды, характеристическое сопротивление которой незначительно отличается от характеристического сопротивления воздуха, благодаря чему на границе раздела сред не возникает существенных отражений, в УКВ диапазоне частот могут использоваться ферриты, относительные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей которых незначительно отличаются:  $\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \approx 1$ . Размещение вибраторной антенны в шаре из феррита, диаметр которого в 1.6 раза больше длины антенны, позволяет уменьшить размеры излучателя, более, чем в  $\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}$  раз, при этом платой, за уменьшение размеров антенны более, чем в 20 раз, является снижение ее коэффициента полезного действия на 6 дБ, а также – сужение полосы рабочих частот при сохранении качества согласования с фидерной линией, что согласуется с критерием Чу-Харрингтона.

3. Разработана методика проектирования малогабаритных приземных антенн УКВ диапазона в виде двухзаходной плоской спирали с переменной шириной плечей, а также – трехзаходной спирали, плечи которой замкнуты на металлические кольца, электрические размеры которых составляют около  $0.02\lambda_0$ , что позволяет разместить их в капсулах, предназначенных для установки антенн СВЧ диапазона волн на вершинах аттестованных металлических стоек.

4. Разработана методика проектирования монополей, внутренняя, или – внешняя мощная механическая опора которых соединена с металлической подстилающей поверхностью, защищенных от воздействия мощных электромагнитных излучений, за счет короткого замыкания по постоянному току их входа, и характеризуемых существенно большей механической прочностью, чем несимметричный электрический вибратор, изолированный от подстилающей поверхности.

5. Разработана методика проектирования многолучевых полноазимутальных антенн УКВ диапазона в виде осесимметричной линзы в форме усеченного конуса, в качестве материала которой используется мраморный или гранитный щебень, облучаемой системой монополей, или – иными электрически малыми излучателями. Показано, что при диаметре линзы около  $3.5\lambda_0 \div 4.5\lambda_0$  потери мощности в ней не превышают 2÷3.4 дБ, а коэффициент направленного действия каждого лепестка многолепестковой диаграммы направленности может достигать 15.5 дБ в низкочастотной области УКВ диапазона.

6. Разработана методика проектирования малогабаритных подземных антенн УКВ диапазона, входное сопротивление и диаграмма направленности которых незначительно изменяются при изменении проводимости почвы и толщине слоя ее навала, технология производства которых позволяет изготавливать их основные узлы в заводских условиях, характеризующихся легкостью транспортировки к месту эксплуатации и простотой монтажа. Разработаны конструкции подземных антенн резонаторно-щелевого типа, антенны в виде патч-излучателя с метаматериальной подложкой, а также – нескольких вариантов Архимедовской двухзаходной спирали над экраном, один из которых отличается возможностью изготовления обоих плечей спирали из аттестованного, на возможность эксплуатации вблизи источника мощных механических воздействий, коаксиального кабеля с неразрывным внутренним проводником, что обеспечивает дополнительную механическую прочность конструкции антенны.

7. Разработана методика оценки степени неоднородности изолятора подземной антенны, основанная на анализе пространственного распределения реальной части вектора Пойнтинга, концентрация линий которого резонансным образом увеличивается в области полуволнового резонанса проводящих неоднородностей, и резонансным образом уменьшается в области их волнового резонанса. Для вычисления пространственного распределения вектора Пойнтинга используется процедура пространственной аппроксимации электрической компоненты электромагнитного поля, проводимая с использованием электродинамического принципа эквивалентных полей и токов, реализованная с помощью введения системы вспомогательных источников поля, удаленных от анализируемой области пространства на расстояние более  $10\lambda_{в\text{ среде}}$ . При этом методика не использует априорной информации о пространственном распределении материальных параметров среды в анализируемой области.

8. Проведены конструкторская и технологическая проработка с учетом условий эксплуатации, изготовлены действующие макеты большинства разработанных приземных и подземных антенн, проведены натурные экспериментальные исследования их электрических характеристик в полевых условиях, в том числе – при навале дополнительного слоя почвы, а также - при заливке водой. Полученные результаты натурных экспериментов подтверждают основные результаты численных электродинамических расчетов, в ходе которых учитывались материальные параметры материалов антенн и почвы.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации связаны с серийным производством приземных и подземных антенн УКВ диапазона для систем управления и их совершенствованием с учетом опыта эксплуатации.

## **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

### **Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Иванов А.В. Подземная антенна метровых волн на основе патч-структуры с метаматериальной подложкой / А.В. Иванов, В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин // Радиотехника. – 2021. – Т. 85. – № 8. – С. 80-90.
2. Иванов А.В. Подземная антенна для защищенной системы авиационной радиосвязи / А.В. Иванов, В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин // Телекоммуникации. – 2021. – № 12. – С. 8-15.
3. Блинов В.В. Разработка и исследование штыревых антенн с повышенной механической прочностью / В.В. Блинов, В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин // Теория и техника радиосвязи. – 2021. – № 4. – С. 28-43.
4. Блинов В.В. Использование феррита в качестве импедансно-согласованной среды для уменьшения габаритных размеров антенны УКВ диапазона / В.В. Блинов, В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин // Теория и техника радиосвязи. – 2021. – № 2. – С. 66-72.
5. Николаев В.И. Многолучевая антенная система УКВ диапазона волн на основе усеченного конуса, насыпанного из гранитного щебня / В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Федоров // Вестник ВГТУ. – 2021. – Т. 17. – № 6. – С. 100-106.
6. Николаев В.И. Исследование малогабаритной УКВ антенны вибраторного типа с плечами спиральной формы / В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Федоров // Вестник ВГТУ. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 91-96.
7. Николаев В.И. Модифицированный вибратор Пистолькорса с плечами на основе трех цилиндрических спиралей, замкнутых на торцах / В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин // Вестник ВГТУ. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 123-128.
8. Николаев В.И. Методы численного электродинамического моделирования приземных и подземных антенн / В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Федоров // Теория и техника радиосвязи. – 2022. – № 2. – С. 55–63.
9. Николаев В.И. Исследование возможности использования антенн резонаторно-щелевого типа в качестве подземных излучателей УКВ диапазона / В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Федоров // Теория и техника радиосвязи. – 2022. – № 3. – С. 58-64.
10. Николаев В.И. Методика оценки степени неоднородности диэлектрической среды, используемой для изоляции подземной антенны УКВ диапазона / В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Федоров // Теория и техника радиосвязи. – 2022. – № 2. – С. 46-54.
11. Володько А.В. Экспериментальные исследования макета подземной антенны дециметрового диапазона волн в виде спирали Архимеда с экраном / А.В. Володько, В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин // Теория и техника радиосвязи. – 2022. – № 2. – С. 32-38.
12. Николаев В.И. Варианты реализации подземной антенны УКВ диапазона в виде двухзаходной спирали Архимеда с экраном / В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Федоров // Теория и техника радиосвязи. – 2022. – № 1. – С. 68-77.

**Работы, опубликованные в сборниках трудов конференций и другие публикации:**

13. Блинов В.В. Исследование электрически малой антенны УКВ диапазона, в составе которой используется феррит / В. В. Блинов, В. И. Николаев, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVII Международной НТК. – Воронеж. – 2021. – Издательский дом ВГУ. – Т. 3. – С. 254-260.

14. Иванов А.В. Подземная резонаторно-щелевая антенна ультракоротковолнового диапазона волн / А. В. Иванов, В. И. Николаев, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVII Международной НТК. – Воронеж. – 2021. – Издательский дом ВГУ. – Т. 3. – С. 359-366.

15. Иванов А.В. Уменьшение габаритных размеров подземной антенны за счет использования метаматериальной подложки / А. В. Иванов, В. И. Николаев, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVII Международной НТК. – Воронеж. – 2021. – Издательский дом ВГУ. – Т. 4. – С. 34-44.

16. Иванов А.В. Исследование возможности использования резонаторно-щелевой антенны в качестве подземной антенны УКВ диапазона / А. В. Иванов, В. И. Николаев, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин // V НАУЧНЫЙ ФОРУМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ТТТ-2021. XIX Международная научно-техническая конференция «ФИЗИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ-2021». – Самара. – 2021. – С. 143-144.

17. Иванов А.В. Исследование подземной антенны УКВ диапазона в виде патч-излучателя с метаматериальной подложкой / А. В. Иванов, В. И. Николаев, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин // V НАУЧНЫЙ ФОРУМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ТТТ-2021. XIX Международная научно-техническая конференция «ФИЗИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ-2021». – Самара. – 2021. – С. 145-146.

**Доклад на международной научно-технической конференции, издание включено в базу данных Scopus:**

18. Ishchenko E. A. Applying Virtual Antenna Array Technology to Minimize DOA Errors / E. A. Ishchenko, Y. G. Pasternak, V. A. Pendyurin, S. M. Fedorov // 2021 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC). – S.-Peterburg. – 2021. – pp. 68-70. – doi: 10.1109/ADMInC54110.2021.9670913.

**Патент на изобретение Российской Федерации:**

19. Николаев В.И. Антенное устройство для радиоканалов, работающих в диссипативных средах / В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, В.Ф. Свердел // Патент РФ № 2755050. Патентообладатель – АО «Концерн «Созвездие». Заявлено 25.03.20, зарегистрировано в Госреестре изобретений РФ 10.09.21.

Подписано в печать 13.10.2022.

Формат 60×84/16. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ № \_\_\_\_\_.

Отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84