

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ПЕНДЮРИН Владимир Андреевич

ЗАЩИЩЕННЫЕ ПРИЗЕМНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ АНТЕННЫ УКВ ДИАПАЗОНА

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Николаев Валерий Иванович
доктор технических наук, профессор

Воронеж – 2022

Оглавление

Введение	4
1. Анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологий производства приземных и подземных антенн	17
1.1. Основные эксплуатационные требования, предъявляемые к приземным и подземным антеннам УКВ диапазона	17
1.2. Анализ перспективных технических и технологических решений по созданию подземных антенн.....	19
1.3. Анализ перспективных подходов к созданию электрически малых антенн с эффективностью, близкой к предельной, определяемой в соответствии с критерием Чу-Харрингтона.....	22
1.4. Методы численного электродинамического анализа характеристик приземных и подземных антенн.....	35
1.5. Выводы по первой главе.....	51
2. Методология проектирования приземных антенн УКВ диапазона волн, устойчивых к мощным механическим воздействиям.....	53
2.1. Исследование перспективности использования феррита в качестве импедансно-согласованной среды для уменьшения габаритных размеров приземной антенны УКВ диапазона.....	56
2.2. Методика проектирования монополей, внутренняя, или – внешняя мощная механическая опора которых соединена с металлической подстилающей поверхностью.....	69
2.3. Методика проектирования электрически малых антенн УКВ диапазона в виде двухзаходной плоской Архимедовской спирали с плечами переменной ширины....	84
2.4. Методика проектирования модификации вибратора Пистолькорса в виде трехзаходной спирали, размещенной на боковой поверхности цилиндра.....	92
2.5. Методика проектирования многолучевых полноазимутальных антенн УКВ диапазона с диаграммообразующей системой на основе осесимметричной линзы из гранитного щебня.....	102

2.6. Выводы по второй главе.....	111
3. Методология проектирования подземных антенн УКВ диапазона волн на основе резонаторно-щелевых структур и патч-излучателей.....	113
3.1. Методика проектирования подземной антенны УКВ диапазона волн на основе патч-структуры с метаматериальной подложкой.....	115
3.2. Натурные экспериментальные исследования в полевых условиях подземной патч-антенны с метаматериальной подложкой.....	129
3.3. Методика проектирования подземных УКВ антенн резонаторно-щелевого типа со щелями «Г»-образной формы.....	135
3.4. Выводы по третьей главе.....	142
4. Методика проектирования подземной антенны УКВ диапазона в виде двухзаходной спирали Архимеда с экраном.....	143
4.1. Исследование и разработка вариантов реализации подземной антенны УКВ диапазона в виде двухзаходной спирали Архимеда с экраном.....	144
4.2. Методика оценки степени неоднородности диэлектрической среды, используемой для изоляции подземной антенны УКВ диапазона.....	167
4.3. Выводы по четвертой главе.....	178
Заключение.....	181
Список литературы.....	184
Приложение А. Акт внедрения результатов диссертации в АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж).....	204
Приложение Б. Акт внедрения результатов диссертации в АО ВНИИ «Вега» (г. Воронеж)	205
Приложение В. Акт внедрения результатов диссертации в научно-техническом центре радиоэлектронной борьбы (НТЦ РЭБ) (г. Воронеж)	206
Приложение Г. Основные положения методики проектирования приземных и подземных антенн УКВ диапазона	207

Введение

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 полимера 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, А.С. Сухарев, 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, ограничивающей 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, ограниченного 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÷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. **(Приложения А, Б, В).**

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 [164-170, 172, 175-180] автору принадлежит разработка методик проектирования приземных и подземных антенн для аппаратуры управления; в работе [171] автором проведено обоснование выбора математического аппарата, используемого для анализа приземных и подземных антенн; в работе [173] автором разработана методика анализа степени неоднородности среды; в работе [174] автором разработана методика проведения эксперимента, проводилось участие в экспериментальных исследованиях и обработка результатов; в работе [181] автором разработана физико-математическая модель, основанная на использовании принципа эквивалентных источников,

позволяющая аппроксимировать пространственное распределение электромагнитного поля вблизи трехмерных рассеивателей; в работе [182] 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 при мощных механических воздействиях. Основные положения методики проектирования приземных и подземных антенн УКВ диапазона для систем управления изложены в **Приложении Г**. 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.

Показано, что разработанные антенные элементы могут быть использованы для облучения тела линзы многолучевой антенной системы УКВ диапазона. В качестве материала линзы предложено использовать гранитный или мраморный щебень.

В третьей главе рассмотрены подземные антенны УКВ диапазона резонаторно-щелевого типа, а также – патч- антенна с метаматериальной подложкой.

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.

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; 2) – с запиткой сбоку, плечи спирали являются регулярными, с постоянным периодом; 3) – с запиткой сбоку, центральная часть спирали заменена двумя полуокружностями с радиусами, большими радиуса минимального изгиба коаксиального кабеля. В качестве конструкционного материала предложено использовать гранитный щебень. 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.

В заключении формулируются основные результаты и выводы.

1. Анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологий производства приземных и подземных антенн

1.1. Основные эксплуатационные требования, предъявляемые к приземным и подземным антеннам УКВ диапазона

Основные эксплуатационные требования, предъявляемые к приземным и подземным антеннам УКВ диапазона, определяются, исходя из всех требований, диктуемых всеми возможными условиями их эксплуатации, перечисленным ниже.

Перечислим основные эксплуатационные требования, предъявляемые к приземным и подземным антеннам УКВ диапазона систем управления:

- антенны должны сохранить свои основные характеристики даже при мощных механических воздействиях: диаграмму направленности, качество согласования с фидерной линией, коэффициент полезного действия;

- основные характеристики антенн не должны существенно изменяться при навале слоя грунта толщиной до 1 метра, при этом они могут уступать по величине коэффициента усиления несимметричному электрическому вибратору четвертьволновой высоты не более, чем 10 дБ, в тех же условиях;

- использование разработанных приземных и подземных антенн должно обеспечивать надежную передачу информации с наземными абонентами (с помощью поверхностных и ионосферных трасс), а также – с воздушными летательными аппаратами и космическими объектами;

- высокая стабильность характеристик антенн должна сохраняться при различных факторах воздействия природного характера: при изменении в широких пределах влажности окружающего грунта, при землетрясениях, ударах молнии, и т.д.;

- весьма желательным требованием является использование материалов и изделий, аттестованных для применения в вышеуказанных условиях, для сокращения затрат по аттестации антенн;

- основная часть конструкции антенн должна удовлетворять требованию возможности изготовления ее в заводских условиях и легкости транспортировки к месту эксплуатации, а также – простоте монтажа;

- простота контроля характеристик антенны и степени неоднородности окружающей ее среды, в частности – изоляционного материала, предохраняющего антенное устройство от непосредственного соприкосновения ее с грунтом, в целях уменьшения потерь в грунте;

- удобство обслуживания и ремонта антенны, в частности – замены части изолирующего материала, который не должен накапливать существенное количество влаги, снижающее коэффициент полезного действия антенны;

- расположение магистрального кабеля не должно сильно влиять на характеристики антенны (вид диаграммы направленности, ее параметры; качество согласования с фидерной линией и коэффициент полезного действия);

- простота автоматического согласующего устройства (АСУ), а в лучшем случае – отсутствие в его надобности для согласования антенны при изменяющихся параметрах среды;

- минимизация габаритных размеров антенн и их себестоимости.

Отдельно отметим, что весьма желательным является простота масштабного моделирования антенных устройств в более высокочастотных диапазонах, а также – возможность использования существующих пакетов численного электродинамического анализа для моделирования и оптимизации параметров антенн.

1.2. Анализ перспективных технических и технологических решений по созданию подземных антенн

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» [1], а также – в двухтомной монографии Р. Кинга и Г. Смита

«Антенны в материальных средах» [2]. Классическими работами в области создания приземных антенн стали труды Г.З. Айзенберга [3, 4], Б.В. Брауде [5, 6], С.И. Надененко [7], Г.Т. Фрииса, С.А. Щелкунова [8]. 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, В.Е. Фидельмана [9, 10], П.Я. Уфимцева [11], Е.Л. Фейнберга [12], С.И. Эминова [13, 14].

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. Негапов, 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. Сокунов, Ю.М. Сподобаев, В.И. Тамбовцев, А.П. Трофимов, В.В. Филиппов, Н.Г. Фитенко, В.П. Чернолес, В.В. Юдин [15-89].

Фундаментальными принципами построения подземных антенн являются [1-90]:

- использование горизонтальной поляризации для уменьшения отражения волн от границ раздела сред;
- размещение антенн в слое диэлектрика с относительно малыми потерями с целью уменьшения потерь мощности в ближней зоне электромагнитного поля;
- увеличение диаметра проводников с целью уменьшения величины волнового сопротивления и уменьшения постоянной затухания волны в диссипативной среде;
- применение системы синфазно запитанных проводников с целью увеличения их коэффициента усиления.

В качестве изолятора подземных антенн часто используется асфальто-бетон, в толще слоя которого расположены проводники антенного устройства [77, 10, 49, 91]. Для повышения коэффициента полезного действия подземных антенн в ряде случаев используют специальные системы водоотвода с целью предотвращения накопления

влаги в окружающем грунте и изолирующем диэлектрике с относительно малыми потерями [77, 18, 45, 46, 49].

Расположение антенн в слоистой среде, включающей грунт, изолятор и воздушное пространство, негативно сказывается на качестве их согласования с фидером. Поэтому широкое распространение получили быстродействующие перестраиваемые автоматизированные согласующие устройства, обеспечивающие согласование антенны с фидерным трактом и перестройку частоты [77, 3, 15, 16, 20, 39, 41]. Методика построения широкополосных симметрирующих и согласующих устройств для питания симметричных антенн рассмотрена в работах [77, 15, 21, 39].

Важной задачей, связанной с эксплуатацией подземных антенн, является контроль их работоспособности, а также – анализ параметров окружающей среды. Опыт разработчиков подземных антенн показывает, что в антеннах, разомкнутых по постоянному току, контроль состояния антенны и окружающего ее изолятора удобно проводить по постоянному току, т.к. в большом числе случаев работа антенны на передачу разрешается только по специальному регламенту [77, 9, 10, 45, 46, 49, 52, 84, 91].

Вместе с тем, использование шунтовых антенн [79, 80] позволяет защитить аппаратуру от мощных механических воздействий, что отвечает основной задаче, решаемой в настоящей диссертации.

В турникетных вибраторах возникает необходимость квадратурной запитки их плечей. Вопросы создания фазовращателей для запитки турникетных вибраторов, а также – способы управления поляризацией излучения подземных антенн рассмотрены в работах [77, 39, 43].

Эффективным способом снижения величины волнового сопротивления вибраторов и уменьшения в них потерь мощности является использование вибраторов с плечами пластинчатой формы [77, 9, 10, 52, 84].

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.

1.3. Анализ перспективных подходов к созданию электрически малых антенн с эффективностью, близкой к предельной, определяемой в соответствии с критерием Чу-Харрингтона

При разработке приземных антенн УКВ диапазона, сохраняющих свои основные функциональные свойства – приема и излучения электромагнитных волн с высокой эффективностью, при мощных механических воздействиях, а также – при навале земли слоем до 1 метра, весьма актуальными являются методы минимизации их излучающих элементов.

В настоящее время при разработке и эксплуатации радиопередающих и радиоприемных устройств для систем связи, телекоммуникации, управления, и т.д., актуальными являются требования, связанные с минимизацией размеров этих технических средств, что существенно расширяет возможности их практического использования и области применения.

Активное развитие данного направления теории и техники антенн связано не только с сугубо научным интересом к реализации минимально достижимого размера антенн, но и – в связи с требованиями по миниатюризации аппаратуры, а также – в связи с развитием области материаловедения, и новыми технологическими возможностями по производству антенн, тесно связано с прогрессом в области прикладной вычислительной электродинамики, а также – в связи с возросшими мощностями компьютеров.

Первые работы, посвященные проектированию электрически малых антенн, появились в середине 20 века [92, 93]. В это же время были сформулированы важные фундаментальные ограничения на основные параметры электрически малых антенн [94-97], не подвергавшиеся сомнению вплоть до публикации работы [98], появившейся в 1996 году, в которой поставлены под сомнения установленные ограничения [99]. В подтверждение установленных ограничений можно привести доводы профессора D.M. Grimes из Пенсильванского университета [100, 101]: размеры атома, приблизительно, составляют примерно 0,1 нм, а длина волны его излучения равна 500 нм. Таким образом, отношение размера атома к длине волны равно 1:5000. Иными

словами, это в 500 раз меньше, чем соответствующий параметр для реально созданных на настоящий момент антенн [99].

Одной из характеристик антенны, определяющей полосу ее рабочих частот, является добротность антенны [99]. Классический подход к определению добротности антенны состоит в следующем: предполагается, что антенна целиком вмещается в гипотетическую сферу радиуса a [99]. Вычисляются запасенные вне указанной сферы электрическая W_e' и магнитная W_m' энергии электромагнитного поля, а также мощность излучения P антенны [99]. Энергиями, запасенными внутри сферы, а также – потерями мощности в самой антенне пренебрегают, и вычисление величины добротности Q проводят по формуле [99]:

$$Q = \begin{cases} \frac{2\omega W_e'}{P}, & W_e' > W_m' \\ \frac{2\omega W_m'}{P}, & W_m' > W_e' \end{cases}. \quad (1.1)$$

Реализация подобного подхода в работах [94-96, 98] позволила установить фундаментальное ограничение (часто называемое в литературе критерием Чу-Харрингтона). Согласно критерию Чу-Харрингтона, величина добротности не может превосходить следующих значений, для волн ТЕ- и ТМ- типов:

$$Q = \frac{1}{ka} + \frac{1}{(ka)^3} - \text{для ТЕ- типа волн}, \quad (1.2)$$

$$Q = \frac{1}{ka} + \frac{1}{2(ka)^3} - \text{для ТМ- типа волн}, \quad (1.3)$$

где ka – электрический радиус сферы.

В работе [102] приведено следующее приближенное выражение для добротности антенны, уточняющее приведенное в работах [94, 95]:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}ka} + \frac{3}{2(ka)^3}. \quad (1.4)$$

Sievenpiper и его коллеги в работе [103] предложили, вместо вычисления добротности, использовать следующее соотношение:

$$B\eta_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{ka} + \frac{1}{n \cdot (ka)^3} \right)^{-1}, \quad (1.5)$$

где

B – полоса пропускания антенны по заданному качеству ее согласования с фидерной линией;

η_r – КПД антенны;

число n определяется типом электромагнитной волны в ближней зоне антенны (ТЕ-, ТМ-) [103].

Электрически малые рамочные антенны (в литературе также используется термин «магнитное кольцо»), как правило, имеют диаметр меньше одной десятой длины волны [104]. Из-за своих малых размеров, такие антенны нашли широкое применение в различных областях: в авиации, кораблестроении, автомобильной технике [104]. В работе [105] рассмотрена модификация электрически малой антенны в виде двух половин рамки, удобной для установки на различные объекты, рис. 1.1.

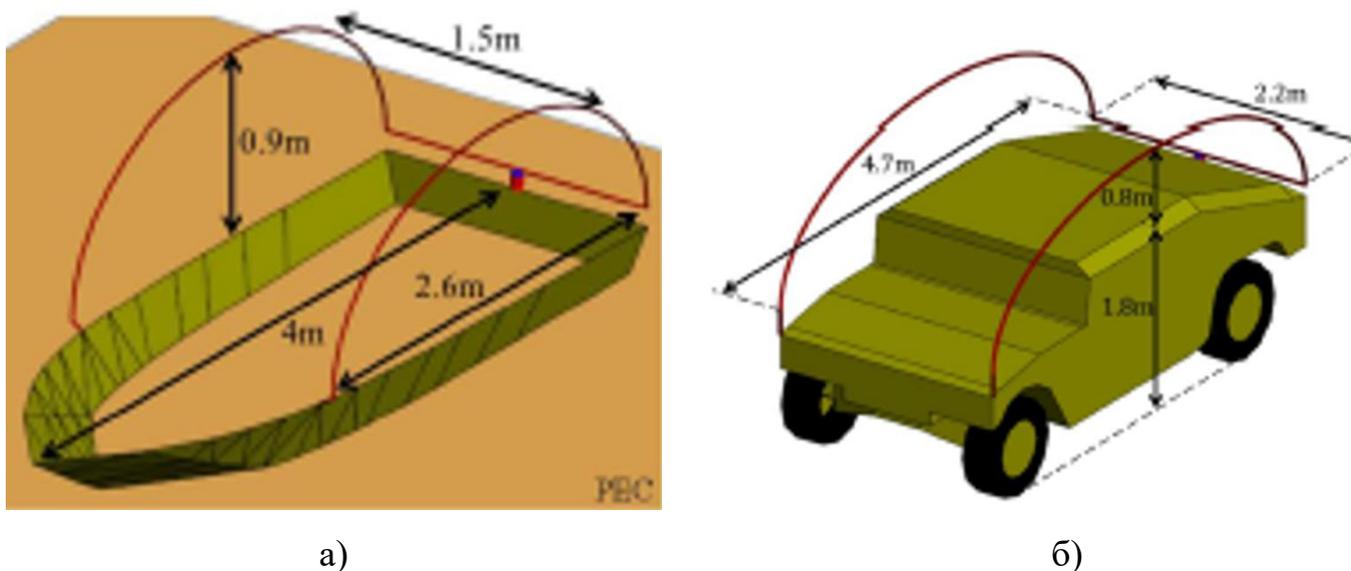


Рис. 1.1. Варианты размещения электрически малой антенны из двух половин рамки на малом судне (а), автомобиле (б)

В работе [105] показано, что, для уменьшения возвышения антенны над крышей корпуса носителя (рис. 1.1, а), можно увеличивать число плечей рамочной антенны, уменьшая при этом ее высоту; при этом значение центральной рабочей частоты антенны остается постоянным, рис. 1.2.

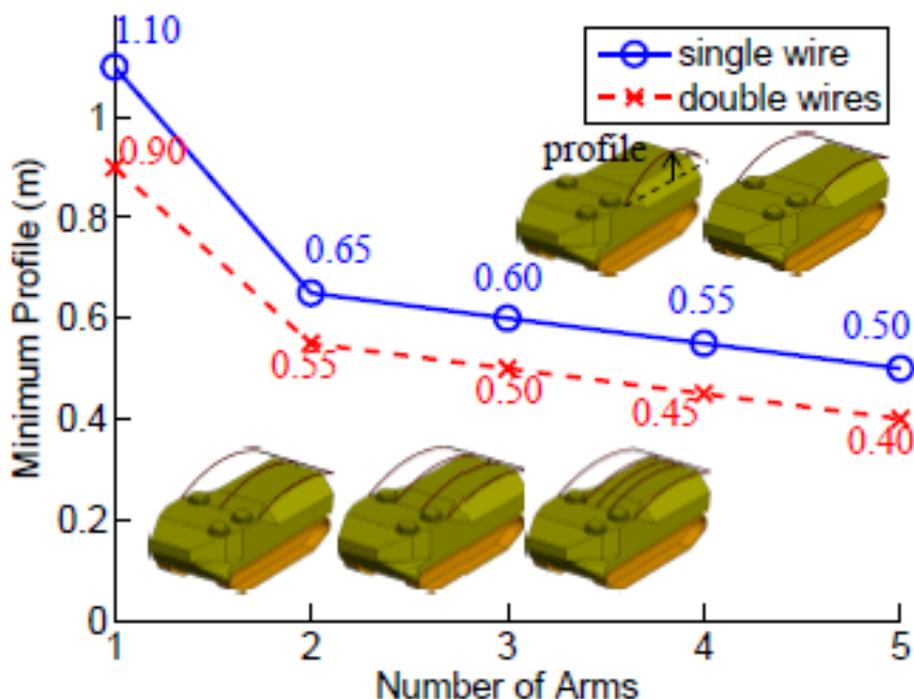


Рис. 1.2. Зависимости высоты антенны от числа плечей рамки при неизменном значении ее центральной рабочей частоты

В работе [106] проведен анализ потерь в рамочной антенне с согласующим тороидальным трансформатором. Суммарная величина активного сопротивления антенны вычислялась в [106] следующим образом:

$$R_{tot} = R_{rad} + R_{loop} + R_{gnd} + R_{cap}, \quad (1.6)$$

где

R_{tot} - суммарное активное сопротивление антенны;

R_{rad} - сопротивление излучения;

R_{loop} - сопротивление, учитывающее скин-эффект проводника рамки;

R_{cap} - сопротивление настроечного конденсатора;

R_{gnd} - сопротивление, связанное с наводками на землю.

На рис. 1.3 приведена зависимость эффективности излучения от частоты для двух значений диаметра поперечного сечения рамки: 6.3 мм и 22 мм. Видно, что при увеличении диаметра проводника рамки, приблизительно в 3 раза, величина коэффициента полезного действия увеличивается почти вдвое.

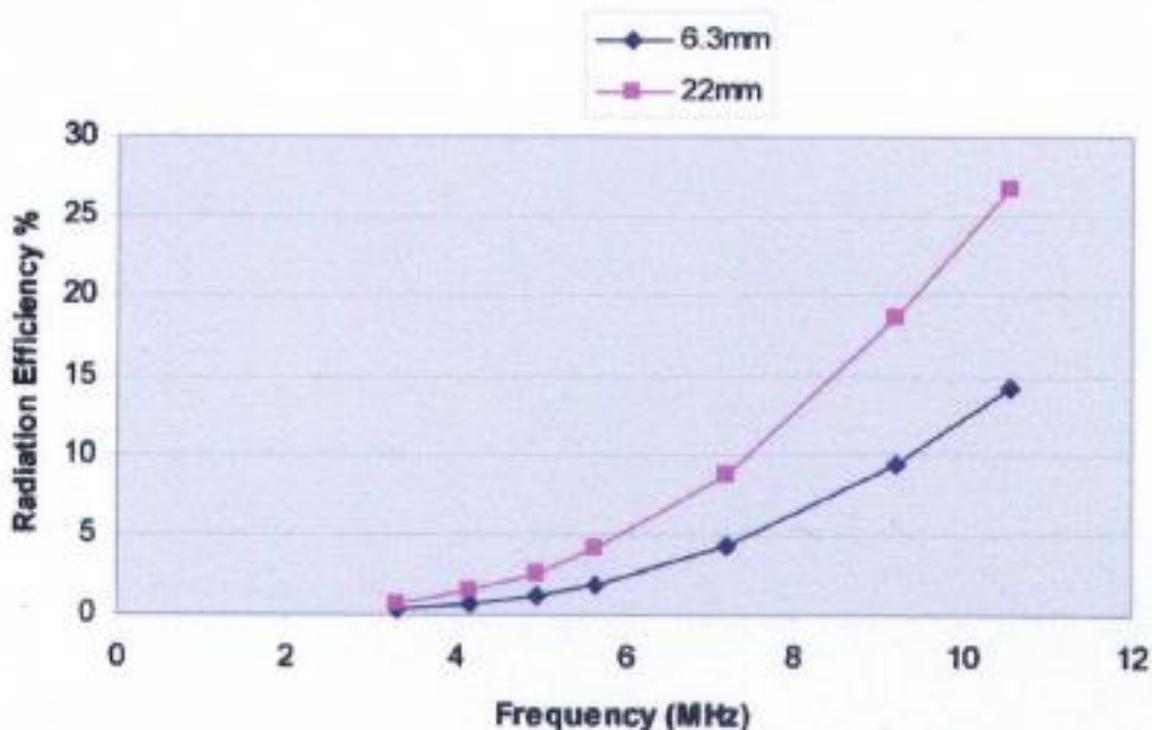


Рис. 1.3. Зависимость эффективности излучения от частоты для двух значений диаметра поперечного сечения рамки: 6.3 мм и 22 мм

Эффективный способ уменьшения размеров кольцевых антенн описан в работе [104]: магнитный монополь, в виде половины электрически малой рамки, окружен дополнительным емкостным экраном (рис. 1.4). В работах [109, 110] обоснована возможность использования данного способа для уменьшения размеров электрических монопольных антенн.

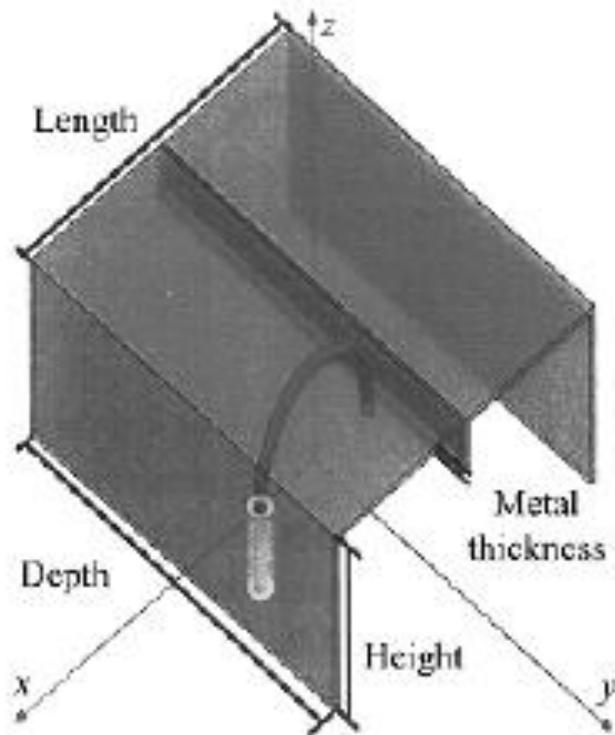


Рис. 1.4. Магнитный монополю в металлической оболочке

Основная идея предложенного в [104] способа заключается в компенсации реактивной составляющей входного сопротивления магнитного монополя, имеющей индуктивный характер, с помощью емкостной реактивности окружающей его оболочки (рис. 1.5); при этом оболочка магнитного монополя характеризуется отрицательной диэлектрической проницаемостью (epsilon-negative (ENG)) – фактически, является метаповерхностью [109, 110]. Толщина оболочки может быть меньше нескольких сотых долей длины волны в свободном пространстве, что не приводит к заметному затуханию в ней электромагнитного поля [109, 110].

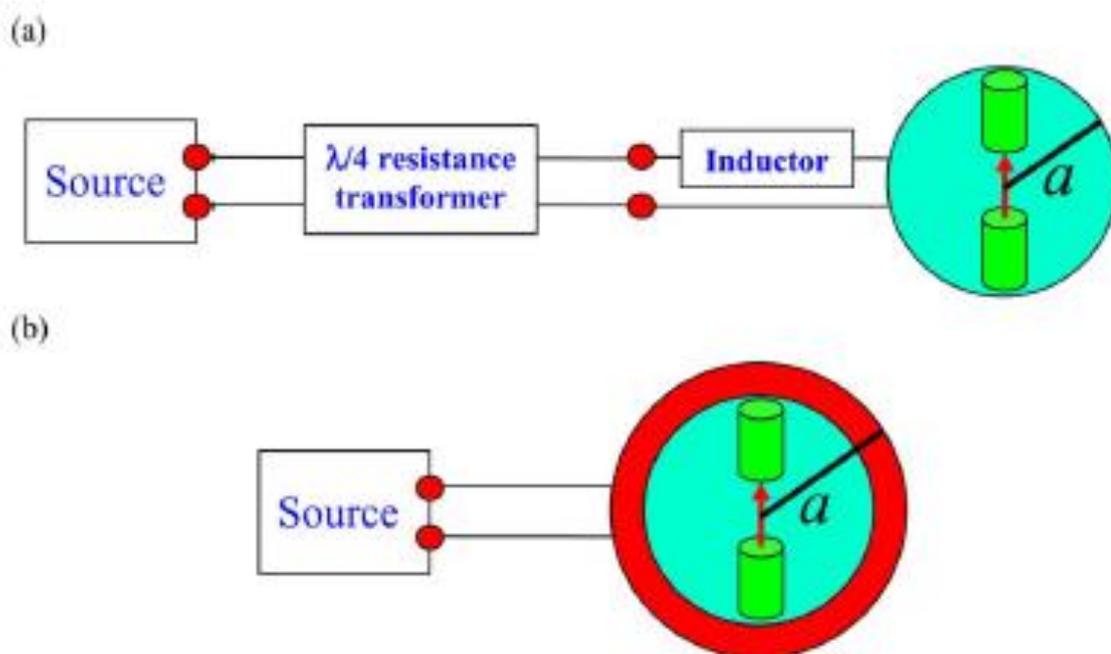


Рис 1.5. Эквивалентная схема компенсации реактивности электрически малой антенны с помощью метаповерхности с обратным характером реактивности: а) – электрически малая антенна; б) – компенсация реактивности антенны путем помещения ее в оболочку, обладающую свойствами метаповерхности

Бурное развития теории и технологий реализации метаматериалов способствовало их применению, при создании электрически малых антенн, не только в качестве оболочек, но и в качестве излучателей электромагнитных волн [104, 109-114]. Примеры конструкций полосковых антенн, в которых использованы метаматериальные элементы с отрицательным показателем преломления, приведены на рис. 1.6, 1.7.

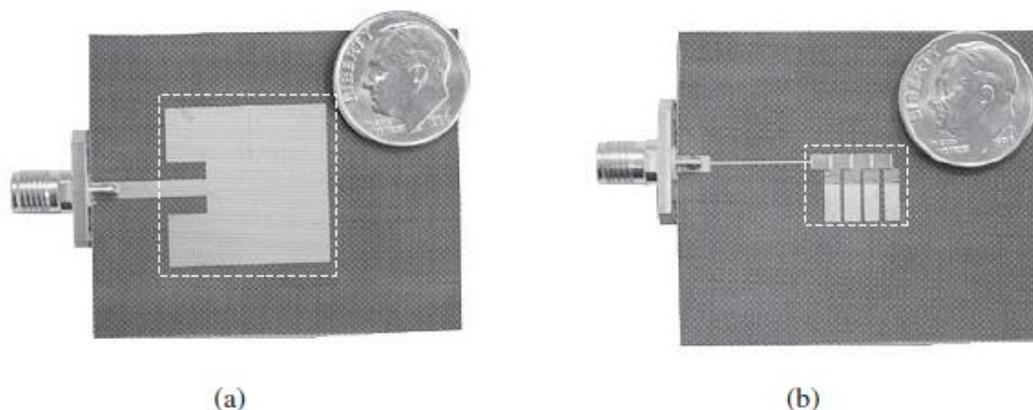


Рис. 1.6. Уменьшение размеров полоска патч- антенны с помощью использования подложки с отрицательным показателем преломления

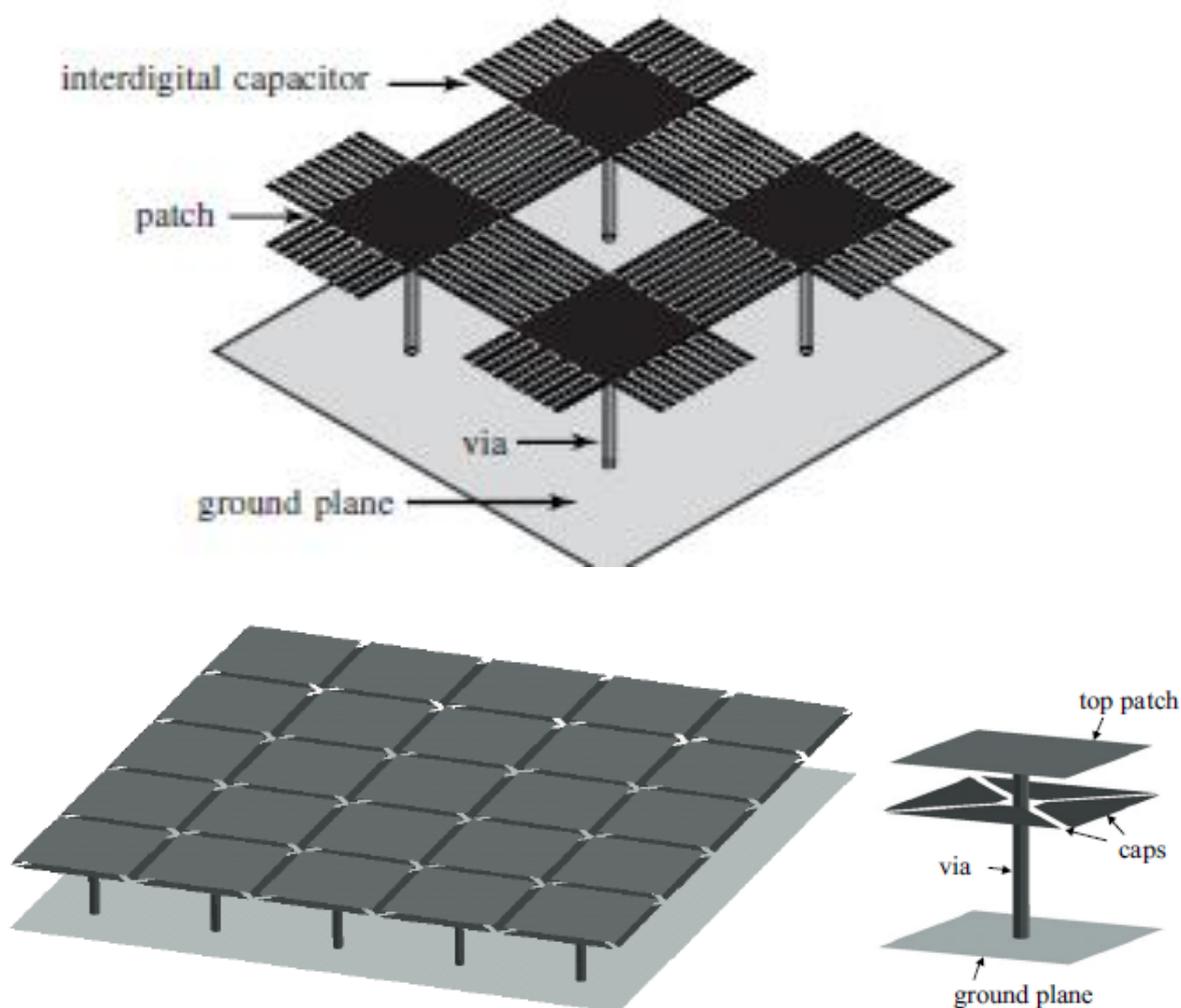


Рис. 1.7. Примеры реализации двумерных антенных решеток из патч-элементов с различными видами метаповерхностей

Интересный пример использования метаматериала для существенного уменьшения размеров электрического симметричного вибратора приведен в работе [113]. Авторы разработали симметричный электрический вибратор длиной около $0.2\lambda_0$, функционирующий в полосе частот с относительной шириной около 4.8% при сохранении качества согласования с фидерной линией на уровне модуля коэффициента отражения не более -10 дБ. Плечи антенны представляют собой периодическую структуру, включающую в себя сосредоточенные емкости и индуктивности, рис. 1.8.

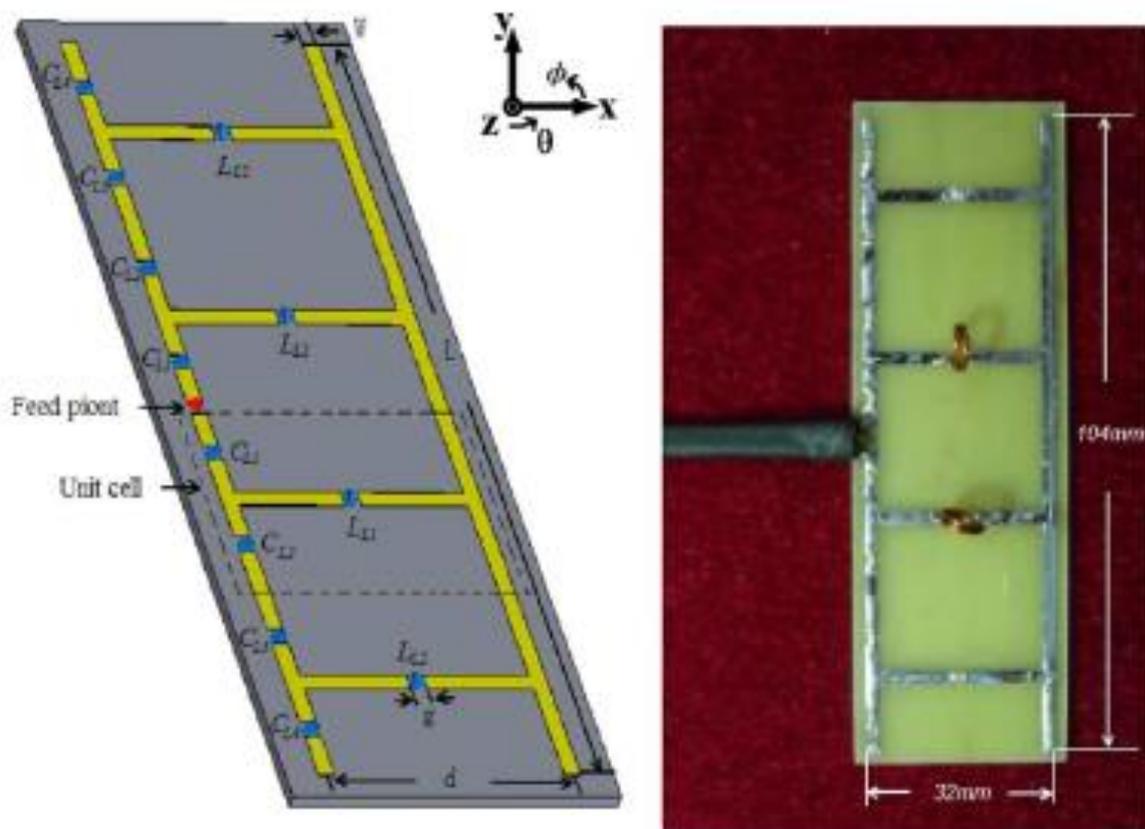


Рис. 1.8. Модель и макет антенны на основе периодической структуры, обладающей свойствами метаповерхности

Применение разорванных кольцевых резонаторов для создания электрически малых антенн описано в работе [115]. За счет сильного магнитного взаимодействия между резонаторами, составной резонатор имеет частоту резонанса, на которой длина волны намного больше его собственных размеров, что позволяет создать электрически малую антенну [115]. На рис. 1.9 показаны модели вариантов антенны, содержащие 1 и 4 резонатора, и проиллюстрировано пространственное распределение магнитного поля в ближней зоне излучения.

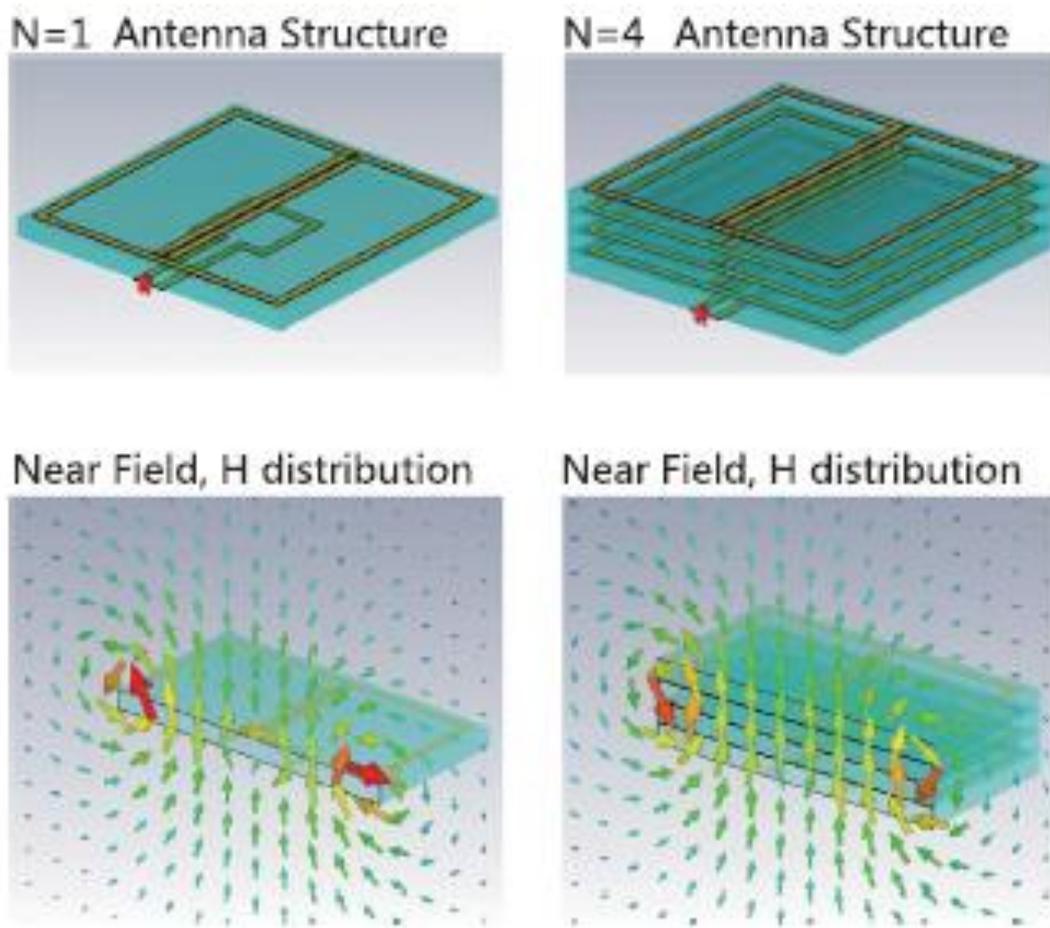


Рис. 1.9. Модели вариантов антенны и распределение в них магнитного поля

Электрически малые дипольные антенны могут реализованы не только на метаматериалах. Более простые варианты реализации описаны в [104, 112, 116]. Например, одним из способов реализации плеч вибратора может быть меандровая линия. Такие антенны нашли широкое применение во многих отраслях: мобильные телефоны, беспроводные каналы передачи данных и др.

Принцип работы подобных антенных устройств основан на использовании нелинейной формы их проводников, по плечам которых укладывается по четверти длины волны тока, вследствие чего электрическая длина антенны становится намного большей геометрической длины антенны, измеряемой по прямой линии между крайними точками противоположных плеч вибратора, рис. 1.10. Работа [116] посвящена анализу характеристик вибраторов с различными формами плеч.

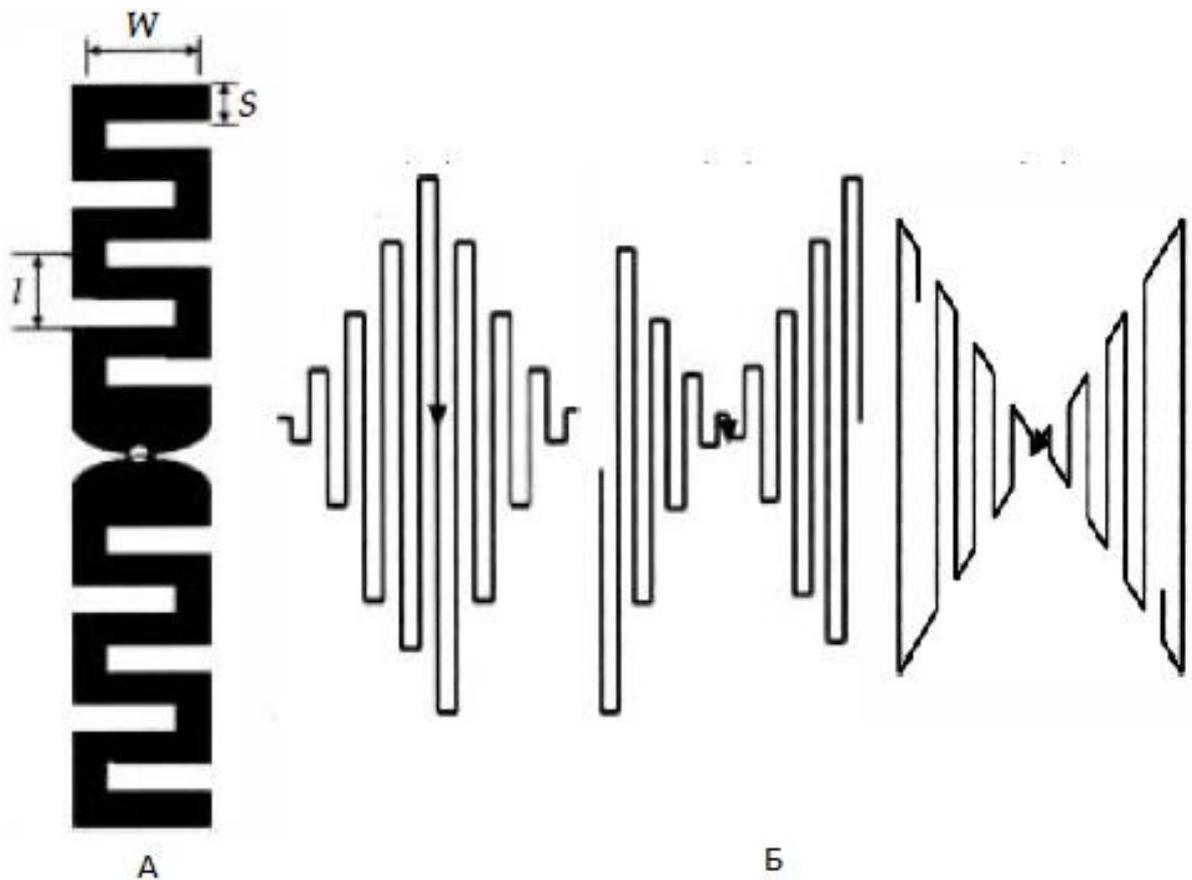


Рис. 1.10. Варианты геометрии плечей симметричных электрических вибраторов

Возможна и реализация не только плоских вибраторных антенн, но и объемных структур, например, древовидных [112]. На рис. 1.11 проиллюстрирована эволюция топологии симметричного электрического вибратора квази-фрактальной формы.

В работе [117] реализован четвертьволновой монополю в виде одновитковой модулированной спиральной микрополосковой антенны, состоящей из набора симметричных прямоугольных сегментов электрически малых размеров, соединенных металлизированными отверстиями на противоположных сторонах печатной платы, рис. 1.12.

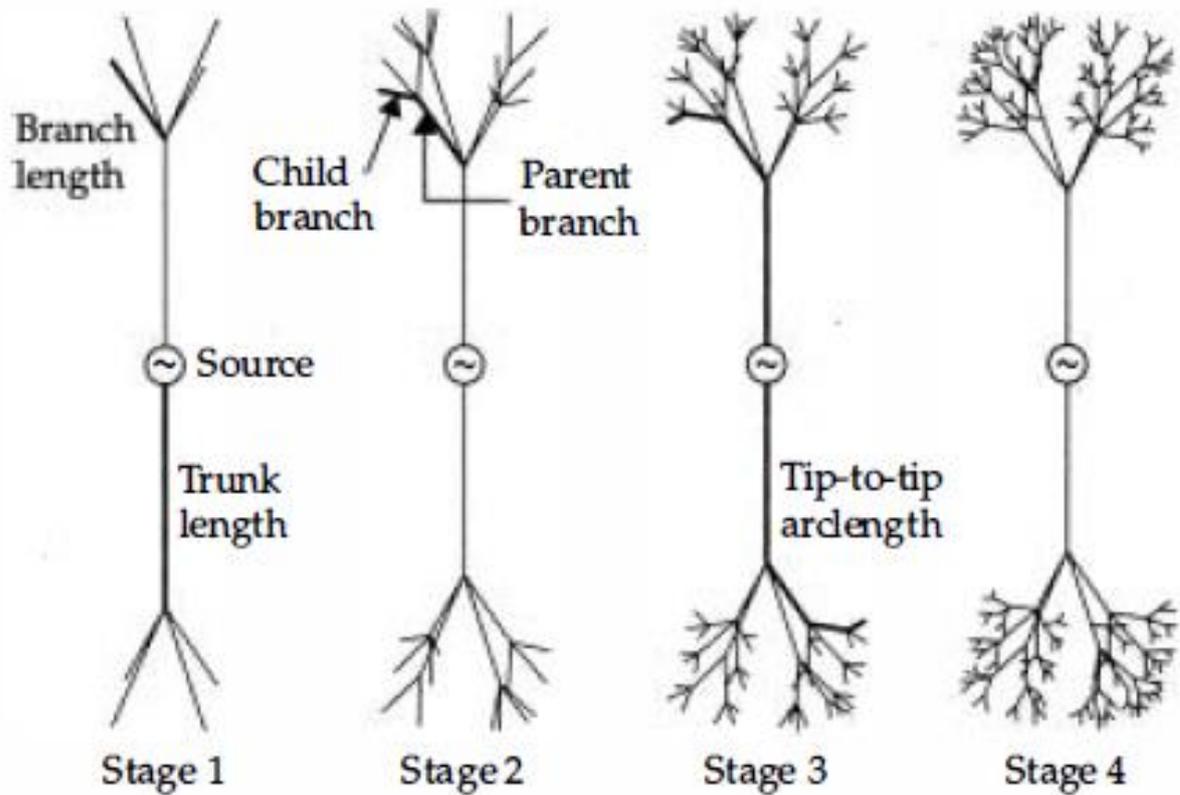


Рис. 1.11. Древоподобная квази-фрактальная структура вибраторной антенны

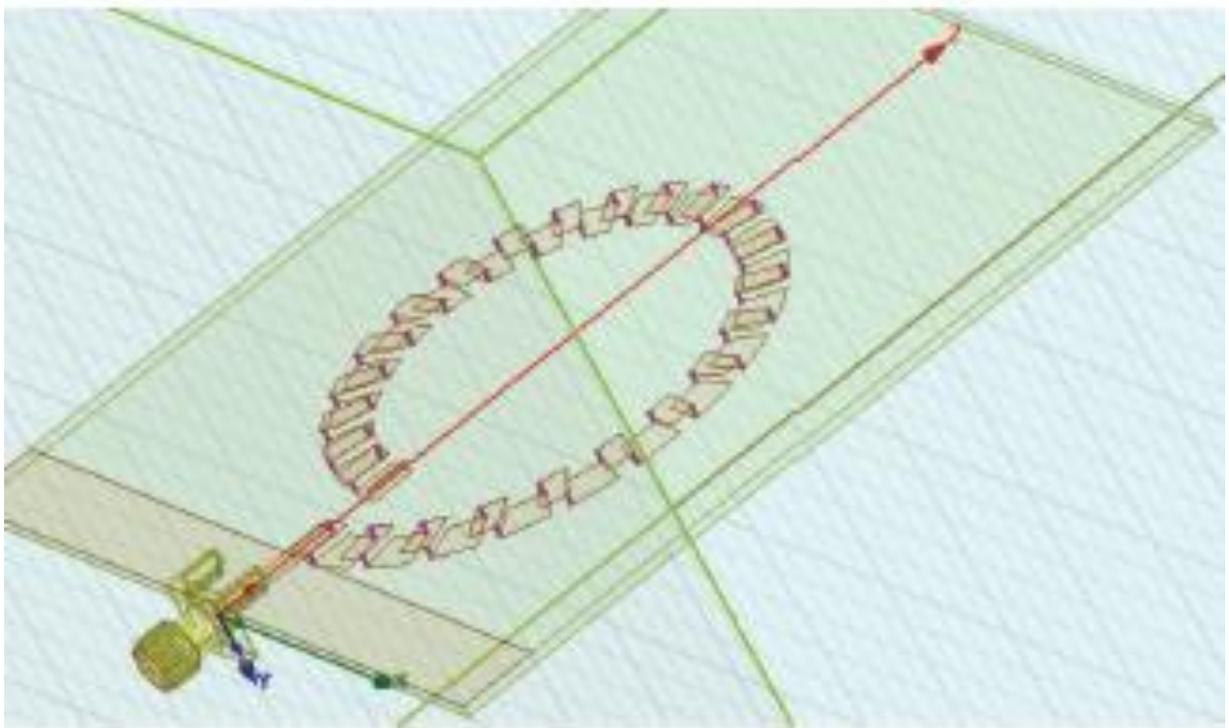


Рис. 1.12. Модель одновитковой модулированной спиральной антенны в микрополосковом исполнении

На основании выполненного аналитического обзора перспективных подходов к построению электрически малых антенн можно сформулировать следующие выводы.

1. Для создания электрически малых антенн, обладающих повышенной эффективностью, перспективно использовать антенны вибраторного типа с проводниками спиралевидной формы.

2. Электрически симметричные антенны позволяют снизить чувствительность антенного устройства к характеристикам подстилающей поверхности, характеристики которой необходимо учитывать для вычисления входного сопротивления антенны, величины ее КПД и диаграммы направленности.

3. При проектировании несимметричных антенн необходимо учитывать свойства подстилающей поверхности – металлической сетки и окружающей земной поверхности.

4. Перспективно использовать метаматериалы и метаструктуры, а также – импедансно-согласованные среды (например – ферриты с близкими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей).

5. Перспективным направлением является создание электрически малых антенн на основе разновидностей спиральных антенн в печатном исполнении, патч-антенн, а также – резонаторно-щелевых антенн.

6. Представляется перспективным рассмотреть два подхода к созданию электрически малых антенн: а) – размещенных в радиопрозрачном обтекателе, приподнятым над поверхностью земли на расстояние до 700 мм, с целью минимизации влияния земной поверхности на эффективность излучения антенны; б) – низкопрофильных антенн, расположенных непосредственно над земной поверхностью – патч-антенн, резонаторно-щелевых антенн.

7. При проектировании приземных и подземных антенн необходимо учитывать их механические характеристики, а также – реакцию на различные внешние воздействия природного и антропогенного характера.

1.4. Методы численного электродинамического анализа характеристик приземных и подземных антенн

В настоящем подразделе рассмотрены методы численного электродинамического анализа характеристик приземных и подземных антенн с использованием интегро-дифференциального уравнения Поклингтона, интегрального уравнения Халлена, а также - метода конечного интегрирования Вейланда. Рассмотрены особенности методов численного решения этих уравнений. Проанализированы преимущества и недостатки рассматриваемых методов.

Исследование процессов излучения и рассеяния волн на тонкопроволочных элементах конструкции антенн с помощью интегральных и интегро-дифференциальных уравнений является важным направлением развития численных методов электродинамики [118, 119]. Анализ тонкопроволочных конструкций антенн в частотной, или во временной области, представляет практический интерес, как при проектировании одиночных тонкопроволочных антенн, так – и антенных решеток, состоящих из тонкопроволочных элементов, а также – фидерных линий [118, 119]. Кроме того, проволочные структуры очень удобны для моделирования многих трехмерных электродинамических объектов. С начала шестидесятых годов 20-го века множество численных методов были проверены на структурах из тонких проводов.

В 1897 году Генри Кэбурн Поклингтон сформулировал первое интегро-дифференциальное уравнение в частотной области для полного тока, протекающего по прямой тонкой проволочной антенне, а также представил первое приближенное решение своего собственного уравнения [120].

С этого времени было проведено множество исследований формулировки уравнения Поклингтона и его численного решения. В конце тридцатых годов 20 века Эрик Халлен существенно развил теорию, разработанную Поклингтоном [121]. Начав с интегро-дифференциального уравнения Поклингтона в частотной области, Халлен вывел новый тип интегрального уравнения для структур из тонких проводов. В последующем было разработано множество численных методов решения уравнений Поклингтона и Халлена [118, 122].

Важным достижением в развитии уравнения Поклингтона является расширение его исходной формулировки на проволочные структуры при наличии неидеально проводящего полупространства [123-126].

В настоящем подразделе приведено описание трех методов решения электродинамических задач: уравнение Поклингтона, уравнение Халлена и метод Вейланда.

Рассмотрим уравнение Поклингтона, сформулированное в частотной области, на примере дипольной антенны длиной $2L$ и радиусом a , помещенную на глубину d в среду с потерями и возбужденную с помощью сосредоточенного источника напряжения, рис. 1.13.

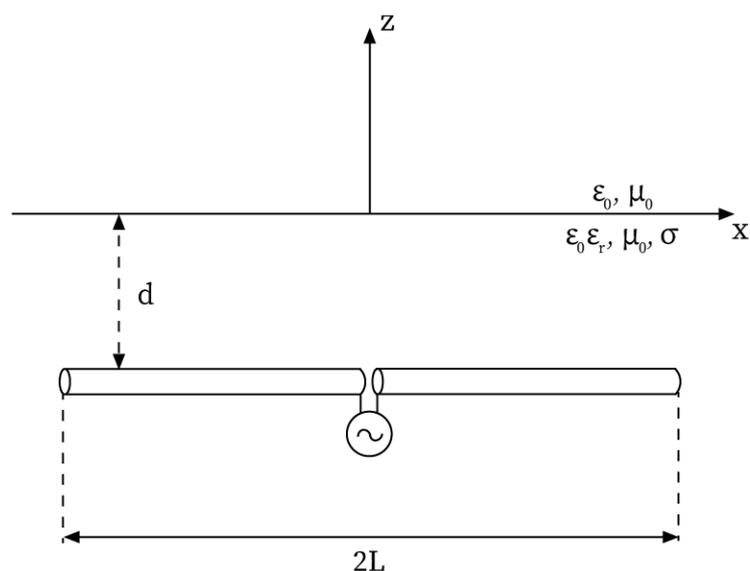


Рис. 1.13. Симметричный электрический вибратор в среде с потерями

Приближение тонкого провода требует, чтобы размеры провода удовлетворяли следующим соотношениям: $a \ll \lambda_0$ и $a \ll L$, где λ_0 – длина плоской волны в свободном пространстве.

Распределение тока вдоль прямой тонкой проволочной антенны, находящейся в среде с потерями, описывается интегро-дифференциальным уравнением Поклингтона. Уравнение Поклингтона может быть получено из уравнений Максвелла для гармонических полей, путем учета граничных условий на границе раздела сред для тангенциальных компонент электрического поля.

Предполагая, что провод является идеально проводящим, интегро-дифференциальное уравнение Поклингтона для неизвестного распределения тока, протекающего вдоль провода, имеет вид

$$E_x^{exc} = j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{-L}^L I(x') g(x, x') dx' - \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_{eff}} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-L}^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} g(x, x') dx', \quad (1.7)$$

где

E^{exc} – электрическая составляющая поля падающей волны;

$I(x')$ – токи, возбуждаемые в диполе;

$\epsilon_{eff} = \epsilon_r \epsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость земли с потерями;

$g(x, x')$ – функция Грина, определяемая из

$$g(x, x') = g_0(x, x') - g_i(x, x'), \quad (1.8)$$

где $g_0(x, x')$ и $g_i(x, x')$ определяются следующими выражениями:

$$g_0(x, x') = \frac{e^{-jk_2 R_1}}{R_1}, \quad g_i(x, x') = \frac{e^{-jk_2 R_2}}{R_2}, \quad (1.9)$$

где

k_2 – постоянная распространения волны в нижней среде;

R_1 и R_2 – расстояния от источника до точки наблюдения, и от изображения источника до точки наблюдения.

Влияние границы раздела сред земля-воздух учитывается с помощью коэффициента отражения Френеля для плоской волны:

$$R_{TM} = \frac{\frac{1}{n} \cos\theta - \sqrt{\frac{1}{n} - \sin^2\theta}}{\frac{1}{n} \cos\theta + \sqrt{\frac{1}{n} - \sin^2\theta}}; \quad \theta = \arctg \frac{|x-x'|}{2d}; \quad n = \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_0}. \quad (1.10)$$

Аппроксимация с помощью коэффициента отражения обеспечивает точность до 10%, по сравнению с результатами, полученными с использованием строгого подхода Зоммерфельда, при условии, что проводник находится на расстоянии не менее четверти длины волны от границы раздела сред [118].

После нахождения распределения продольной составляющей тока антенны мы можем оценить величину ее комплексного входного сопротивления и диаграмму направленности [118, 119]. Для учета влияния конечной проводимости проводников антенны используется условие Леонтовича [118, 119].

После проведения процедуры алгебраизации уравнения Поклингтона (1.7) с использованием метода коллокаций запишем его в операторной форме:

$$K(I) = E, \quad (1.11)$$

где

K – линейный оператор;

I – неизвестный ток, который необходимо найти для заданного источника возбуждения антенны E .

Решение с помощью метода Бубнова-Галеркина (Galerkin Bubnov Indirect Boundary Element Method, GB-IBEM) основано на разложении неизвестного тока $I(x)$ на конечную сумму линейно-независимых базисных функций $f_n(x)$ с неизвестными комплексными коэффициентами I_n :

$$I_n(x') = \sum_{n=1}^{N_g} I_n f_n(x'), \quad (1.12)$$

где N_g – общее число базисных функций.

Подставляя формулу (1.12) в выражение (1.11), получим:

$$K(I) = \sum_{n=1}^{N_g} I_n K(f_n). \quad (1.13)$$

Обозначим R как

$$R = \sum_{n=1}^{N_g} I_n K(f_n) - E, \quad (1.14)$$

и приравняем скалярные произведения функции R и весовых функций $\{W_j\}$ к нулю:

$$\int_L R W_m^* dx = 0, m = 1, 2, \dots, N_g \quad (1.15)$$

где знак (*) – обозначает комплексно-сопряженное.

Учитывая линейность оператора K , и приравняв $W_m = f_m$, получим систему алгебраических уравнений

$$\sum_{n=1}^{N_g} \int_L K(f_n) f_m dx = \int_L E f_m dx, \quad m = 1, 2, \dots, N_g. \quad (1.16)$$

Уравнение (1.16) известно [118, 119] как сильная формулировка Бубнова-Галеркина для интегрального уравнения Поклингтона (1.7). Используя симметрию ядра интегрального уравнения и принимая во внимание граничные условия Дирихле для тока на свободных концах цилиндра, получим [118, 119]:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{N_g} I_j \frac{1}{j^4 \pi \omega \varepsilon_{eff}} \left[\int_{-L}^L \frac{\partial f_j(x)}{\partial x} \int_{-L}^L \frac{\partial f_i(x')}{\partial x'} g(x, x') dx' dx + \right. \\ \left. + k_2^2 \int_{-L}^L f_i(x') g(x, x') dx' dx \right] = \int_{-L}^L E_x^{inc} f_j(x) dx, \\ j = 1, 2, \dots, N_g \end{aligned} \quad (1.17)$$

Уравнение (1.17) известно [118, 119] как слабая формулировка интегрального уравнения (1.7), удобная для реализации метода GB-IBEM. Отметим, что граничные условия впоследствии включаются в систему линейных уравнений, что является важным преимуществом по сравнению с другими численными методами – например

методом моментов (МОМ), где все базисные и весовые функции должны удовлетворять заданным граничным условиям [127].

Результирующая система линейных алгебраических уравнений, полученная в результате сегментации провода, определяется следующим выражением:

$$\sum_{j=1}^M [Z]_{ji} \{I\}_i = \{V\}_j, j = 1, 2, \dots, M, \quad (1.18)$$

где

вектор $\{I\}$ состоит из комплексных амплитуд базисных функций искомого тока; $[Z]_{ji}$ – матрица, отображающая взаимодействие i -го граничного элемента источника и j -го граничного элемента:

$$[Z]_{ji} = \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_{eff}} \left[\int_{-L}^L \{D\}_j \int_{-L}^L \{D\}^T g(x, x') dx' dx + k_2^2 \int_{-L}^L \{f\}_j \int_{-L}^L \{f\}^T g(x, x') dx' dx \right]. \quad (1.19)$$

Матрицы $\{f\}$ и $\{f\}^T$ включают в себя значения базисных функций, а матрицы $\{D\}$ и $\{D\}^T$ – значения их производных; M – общее количество отрезков разбиения проводника; Δl_i и Δl_j – ширина i -го и j -го отрезков.

Векторы $\{V\}_j$ состоят из величин наведенных электродвижущих сил в j -м сегменте проводника:

$$\{V\}_j = \int_{\Delta l_j} E_x^{inc} \{f\}_j dx, \quad (1.20)$$

где величина E_x^{inc} означает x - компоненту электрического поля стороннего источника и определяется выражением

$$E_x^{inc} = \frac{V_g}{\Delta l_g}, \quad (1.21)$$

где

V_g – напряжение запитки;

$\Delta l_g = \Delta x$ – зазор между клеммами запитки антенны.

В работе [118] показано, что использование линейной аппроксимации тока на элементах разбиения обеспечивает устойчивость процедуры численного решения уравнения Поклингтона.

Рассмотрим далее формулировку интегрального уравнения Халлена и метод его численного решения [128].

Векторный потенциал Герца в произвольной точке вблизи антенны (рис. 1.13) имеет две составляющие: $\bar{\Pi}_1 = \Pi_{x1}\hat{x} + \Pi_{z1}\hat{z}$ [128].

Тангенциальная составляющая рассеянного электрического поля может быть выражена как:

$$E_{x1}^{sct}(x, x') = \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \underline{\gamma}_1^2 \right] \Pi_{x1} + \frac{\partial^2 \Pi_{z1}}{\partial x \partial z}, \quad (1.22)$$

где

$$\Pi_{x1} = \frac{1}{4\pi\sigma} \int_{-l}^l I(x') [g_0(x, x') - g_i(x, x') + U_{11}] dx', \quad (1.23 \text{ а})$$

$$\Pi_{z1} = \frac{1}{4\pi\sigma} \int_{-l}^l I(x') \frac{\partial W_{11}}{\partial x} dx', \quad (1.23 \text{ б})$$

где $I(x')$ – распределение тока вдоль антенны (x' - ось провода) и

$$U_{11} = \int_{\alpha=0}^{\infty} \tilde{T}_{\eta 1}(\alpha) e^{-u_1(z+h)} \frac{\alpha}{u_1} J_0(\alpha\rho) d\alpha, \quad (1.24 \text{ а})$$

$$W_{11} = \int_{\alpha=0}^{\infty} \tilde{T}_{\eta 2}(\alpha) e^{-u_1(z+h)} \frac{\alpha}{u_1} J_0(\alpha \rho) d\alpha, \quad (1.24 \text{ б})$$

где

$$\tilde{T}_{\eta 1}(\alpha) = \frac{2u_1}{u_0 + u_1};$$

$$\tilde{T}_{\eta 2}(\alpha) = \frac{2u_1(u_0 - u_1)}{\gamma_1^2 u_0 + \gamma_0^2 u_1};$$

$J_0(\alpha \rho)$ – функция Бесселя нулевого порядка первого рода;

$$u_i = \sqrt{\alpha^2 + \underline{\gamma}_i^2};$$

$i = 0, 1$.

Учитывая формулы (1.25 а) и (1.25 б), выражение (1.22) приобретает вид

$$E_{x1}^{sct}(x, x') = \frac{1}{4\pi\sigma_{-1}} \int_{-l}^l I(x') G(x, x') dx', \quad (1.25 \text{ а})$$

$$G(x, x') = \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \underline{\gamma}_1^2 \right] (g_0(x, x') - g_i(x, x') + U_{11}) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \left(\frac{\partial W_{11}}{\partial x} \right). \quad (1.25 \text{ б})$$

Часто используется упрощенная формулировка функции Грина (1.25 б), имеющая следующий вид:

$$G(x, x') = \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \underline{\gamma}_1^2 \right] (g_0(x, x') - g_i(x, x') + U_{11}). \quad (1.26)$$

Интегральное уравнение Халлена может быть выведено как решение уравнения Поклингтона, как дифференциального уравнения, при учете граничных условий для суммарной тангенциальной составляющей электрического поля в любой заданной точке поверхности антенны.

Интегральное уравнение Халлена записывается в следующем виде [128]:

$$\int_{-l}^l I(x') [g_0(x, x') - g_i(x, x') + U_{11}] dx' - C \cos(j\gamma_{-1}x) = \quad (1.27 \text{ а})$$

$$j \frac{n}{60} U \sin(j\gamma_1 x),$$

где C – постоянная интегрирования.

Учитывается, что ток обращается в ноль на концах проводника:

$$I(-L) = I(L) = 0. \quad (1.27 \text{ б})$$

При численном решении уравнения Халлена часто используется полиномиальная аппроксимация пространственного распределения тока [128-131].

В настоящее время известны многочисленные публикации по обобщению методов анализа антенн, опирающихся на использование уравнения Поклингтона и уравнения Халлена на случай толстых проводников, в которых учитываются не только продольные, но и азимутальные и радиальные компоненты токов.

Тем не менее, более универсальным подходом к анализу подземных антенн является использование метода конечного интегрирования Вейланда [132], не имеющего ограничений по геометрии и материальным свойствам анализируемых электродинамических объектов. По этой причине именно метод Вейланда был выбран в качестве основного метода численного анализа приземных и подземных антенн, рассмотренных в настоящей диссертации.

Метод конечного интегрирования (Finite Integration Method - FIT) [132], разработанный профессором Вейландом в 1977 году, основан на дискретной переформулировке уравнений Максвелла, записанных в интегральной форме, и позволяет моделировать электромагнитные поля в электродинамических структурах со сложной геометрией, включающих неоднородные и анизотропные среды с потерями электрического и магнитного характера. Использование интегральной формы уравнений Максвелла в методе Вейланда [132] позволяет обеспечить высокую устойчивость процедуры численного анализа электродинамических структур.

Первый шаг дискретизации FIT-метода Вейланда состоит в задании граничных условий для решаемой электродинамической задачи. Задача расчета электромагнитного поля рассматривается как односвязная и ограниченная область пространства $\Omega \in R^3$. Следующий шаг состоит в разложении области Ω на конечное число симплицальных ячеек V_i (таких, как тетраэдры, или – гексаэдры). Разбиение должно осуществляться с соблюдением условия, при выполнении которого все ячейки точно соответствуют друг другу: пересечение двух разных ячеек либо пусто, либо представляет собой двумерный многоугольник, одномерное ребро, общее для обеих ячеек или точки. Это разложение создает конечный набор симплицальных ячеек G , который выполняет роль вычислительной сетки.

FIT-метод Вейланда [132] не ограничивается только трехмерными декартовыми сетками координат. Для расчета могут использоваться все типы координатных сеток, ортогональных и не ортогональных сеток [133, 134]. Также используются согласованные подсетки, применяемые для локального уточнения сетки [135].

Каждое ребро ячеек включает в себя начальную ориентацию, т.е. такое направление, при котором объединение всех ребер этой ячейки можно описать как ориентированный граф [136]. Аналогичным образом с данным направлением будут связаны и многоугольные грани ячеек.

Для простоты описания FIT-метода Вейланда [132] предполагают, что анализируемая область Ω имеет форму прямоугольного параллелепипеда, и процедура дискретизация проводится с применением аппарата тензорной алгебры, в результате выполнения которой мы получаем набор ячеек

$$G \quad (1.28)$$

$$:= \left\{ V_{i,j,k} \in R^3 \left| \begin{array}{l} V_{i,j,k} := [x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}] \times [z_k, z_{k+1}], \\ i = 1, \dots, I - 1, j = 1, \dots, J - 1, k = 1, \dots, K - 1 \end{array} \right. \right\}$$

где узлы (x_i, y_j, z_k) пронумерованы координатами i, j и k вдоль осей x, y и z . Это позволяет сформировать $N_p := I \cdot J \cdot K$ точек сетки для $(I - 1) \cdot (J - 1) \cdot (K - 1)$ ячеек сетки.

После определения набора ячеек сетки G дальнейшее рассмотрение ФТ-метода Вейланда может быть ограничено только одной ячейкой V_n . Запишем закон Фарадея в интегральной форме

$$\oint_{\partial A} \vec{E}(\vec{r}, t) d\vec{s} = - \int \int_A \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} d\vec{A}, \quad (1.29)$$

и переформулируем его для грани $A_z(i, j, k)$ ячейки V_n (рис. 1.14) в виде обыкновенного дифференциального уравнения

$$\begin{aligned} \hat{e}_x(i, j, k) + \hat{e}_y(i + 1, j, k) - \hat{e}_x(i, j + 1, k) - \hat{e}_y(i, j, k) \\ = - \frac{d}{dt} \hat{b}_z(i, j, k) \end{aligned} \quad (1.30)$$

где скалярная величина $\hat{e}_x(i, j, k)$ – электрическое напряжение вдоль одного ребра поверхности $A_z(i, j, k)$, вычисляемая как значение интеграла напряженности электрического поля вдоль этого ребра. Скалярная величина $\hat{b}_z(i, j, k)$ представляет собой магнитный поток, т.е. интеграл плотности магнитного потока через грань $A_z(i, j, k)$. Ориентация ребер ячейки будет влиять на знаки в формуле (1.30). Уравнение (1.30) является частным случаем формулы (1.29) для рассматриваемой поверхности ячейки.

Интегральная формулировка закона Фарадея (1.29) справедлива для каждой отдельной грани $A(i, j, k)$ набора G , а дискретный подход (1.30), может быть легко расширен на другие площади граней $A = \cup A(i, j, k)$. Аналогичный подход используется и для вычисления значений поверхностных интегралов.

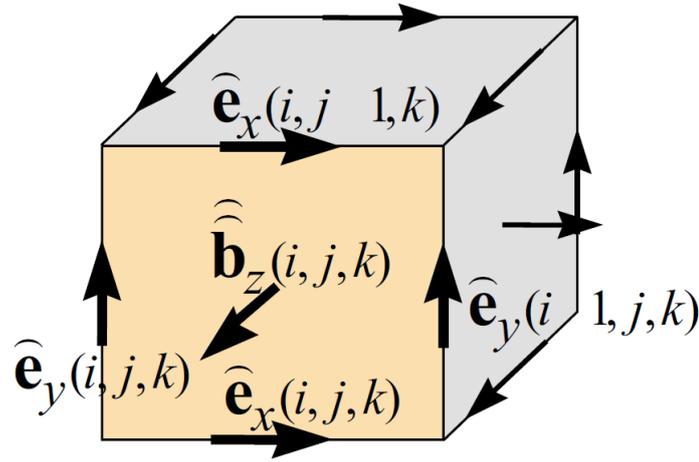


Рис. 1.14. Ячейка $V_{i,j,k-1}$ из набора ячеек G с распределением электрических напряжений \hat{e} на ребрах ячейки A и магнитного потока \hat{b} через грани

Учитывая направления силовых линий электрического и магнитного поля при вычислении значений напряжений $\hat{e}(i, j, k)$ и магнитных потоков $\hat{b}(i, j, k)$ на всем наборе ячеек G , объединяем их в векторы-столбцы так, чтобы, сначала ячейки выстраивались по оси x , затем по y , и, далее – по оси z , получаем соответствующие векторы напряжений и магнитных потоков:

$$\hat{e} = (\hat{e}_{x,n} | \hat{e}_{y,n} | \hat{e}_{z,n})_{n=1, \dots, N_p}^T \in R^{3N_p}, \quad (1.31)$$

$$\hat{b} = (\hat{b}_{x,n} | \hat{b}_{y,n} | \hat{b}_{z,n})_{n=1, \dots, N_p}^T \in R^{3N_p}. \quad (1.32)$$

Уравнения (1.30) для всех граней и ребер ячеек можно записать в матричной форме:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & -1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}}_C \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{e}_{n1} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n2} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n3} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n4} \end{pmatrix}}_{\hat{e}} = -\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{pmatrix} \vdots \\ \hat{b}_n \\ \vdots \end{pmatrix}}_{\hat{b}}. \quad (1.33)$$

Матрица C содержит только топологическую информацию о взаимной ориентации ребер ячеек внутри набора ячеек G , поэтому она состоит только из коэффициентов $C_{i,j} \in \{-1, 0, 1\}$ и представляет собой дискретную форму оператора ротора на сетке ячеек G .

Рассмотрим далее дискретную форму оператора дивергенции. Она выводится из 4-го уравнения Максвелла, постулирующего отсутствие магнитных зарядов:

$$\int \int_{\partial V} \vec{B}(\vec{r}, t) d\vec{A} = 0 \quad \forall V \in R^{3N_p}, \quad (1.34)$$

которое применяется для ячейки $V_{i,j,k}$, показанной на рис. 1.15.

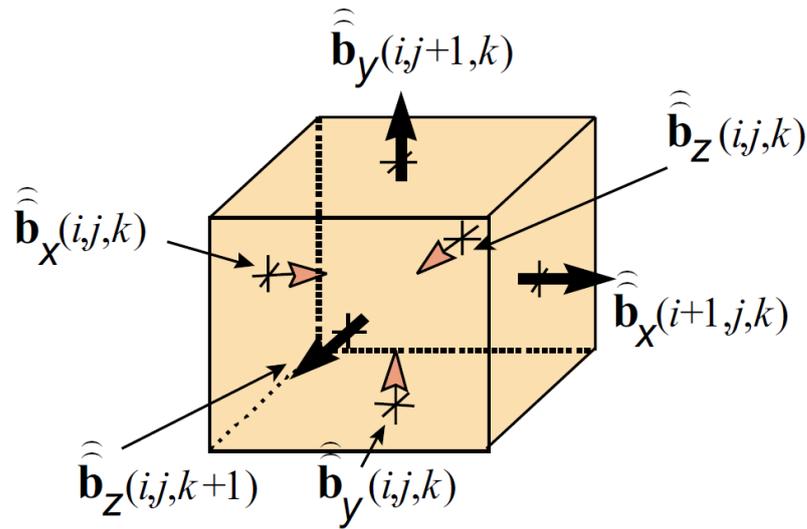


Рис. 1.15. Распределение шести магнитных потоков через грани ячейки, которые необходимо учитывать при оценке интеграла по замкнутой поверхности при отсутствии магнитных зарядов внутри ячейки

Оценка поверхностного интеграла в (1.34) для анализируемой ячейки (рис. 1.15) приводит к следующему выражению:

$$-\hat{b}_x(i,j,k) + \hat{b}_x(i+1,j,k) - \hat{b}_y(i,j,k) + \hat{b}_y(i,j+1,k) - \hat{b}_z(i,j,k) + \hat{b}_z(i,j,k+1) = 0. \quad (1.35)$$

Это соотношение для одной ячейки может быть расширено для всего набора ячеек G :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \cdot & -1 & 1 & \dots & \dots & \cdot \\ & & & -1 & 1 & \\ & & & \dots & \dots & \\ & & & & & -1 & 1 & \cdot \end{pmatrix}}_S \underbrace{\begin{pmatrix} \vdots \\ \hat{\hat{b}}_{m1} \\ \hat{\hat{b}}_{m2} \\ \hat{\hat{b}}_{m3} \\ \hat{\hat{b}}_{m4} \\ \hat{\hat{b}}_{m5} \\ \hat{\hat{b}}_{m6} \end{pmatrix}}_{\hat{\hat{b}}} = 0. \quad (1.36)$$

Матрица дискретной дивергенции (источника) $S \in R^{N_p \times 3N_p}$ также зависит только от топологии сетки, как и дискретная матрица C [137].

Дискретизация двух оставшихся уравнений Максвелла в рамках метода конечного интегрирования требует введения второго набора ячеек \tilde{G} , который является дуальным к первичному набору G . Узлы сетки \tilde{G} задаются как центры ячеек G , рис. 1.16.

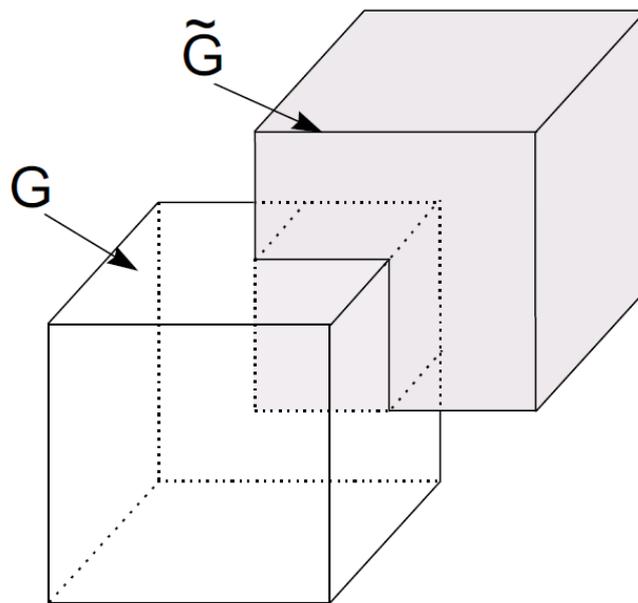


Рис. 1.16. Пространственное размещение ячейки и дуальной ячейки

Из этого определения следует, что существует взаимно однозначное отношение между ребрами ячеек G , пересекающими поверхности ячеек \tilde{G} , и наоборот. Вдоль ребер \tilde{L}_k дуальной сетки мы интегрируем напряженности магнитного поля, порождающие магнитодвижущую силу $\hat{h}_k = \int_{\tilde{L}_k} \vec{H} d\vec{s}$. На поверхности ячеек \tilde{G} диэлектрические потоки и электрические токи распределяются по аналогии с электрическими напряжениями и магнитными потоками в G .

Следовательно, полный интеграл плотности заряда в дуальной ячейке \tilde{V} может быть связан с дискретным зарядом в одной точке первичной сетки G , помещенной внутрь \tilde{V} .

Дискретизация закона Ампера в интегральной форме

$$\oint_{\partial\tilde{A}} \vec{H}(\vec{r}, t) d\vec{s} = \iint_A \left(\frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(\vec{r}, t) + \vec{J}(\vec{r}, t) \right) d\vec{A} \quad (1.37)$$

может быть выполнена для произвольной грани \tilde{A} дуальной ячейки \tilde{V} по аналогии с законом Фарадея, путем суммирования магнитных напряжений, для определения тока смещения и тока проводимости, текущих через рассматриваемую грань ячейки.

Дискретизация закона Гаусса, записанного в интегральной форме для ячеек дуальной сетки, проводится следующим образом. Проведение процедур дискретизации для дуального набора ячеек позволяет получить матричные уравнения с топологическими операторами C для дуального дискретного ротора и S для дуальной дискретной дивергенции. Для двойного набора ячеек $\{G, \tilde{G}\}$ дискретные матричные уравнения можно записать в следующем виде:

$$C\tilde{e} = -\frac{d}{dt}\hat{b}, \quad \tilde{C}\tilde{h} = -\frac{d}{dt}\hat{d} + \hat{j}, \quad (1.38)$$

$$S\hat{b} = 0, \quad \tilde{S}\hat{d} = q. \quad (1.39)$$

Безвихревые электромагнитные поля в области Ω могут быть представлены как градиентные поля скалярных потенциалов, согласно лемме Пуанкаре.

Таким образом, использование метода Вейланда при решении электродинамических задач сводится к дискретному представлению системы уравнений Максвелла в интегральной форме, решаемой в пространственно-временной или пространственно-частотной областях.

В заключение отметим, что все три рассмотренные выше метода – метод интегро-дифференциального уравнения Поклингтона, метод интегрального уравнения Халлена и метод конечного интегрирования Вейланда являются эффективным инструментом анализа характеристик приземных и подземных антенн.

Основным преимуществом интегро-дифференциального уравнения Поклингтона, по сравнению с интегральным уравнением Халлена, является простота его формулировки и численного решения [137]. Серьезным недостатком метода Поклингтона является квазисингулярность ядра уравнения Поклингтона, из-за наличия дифференциального оператора. Данная проблема может быть устранена путем использования слабой формулировки уравнения Поклингтона при использовании в качестве метода его алгебраизации метода Бубнова-Галеркина [137].

Получение интегрального уравнения Халлена [128] для анализируемой антенной системы, состоящей из совокупности проволочных элементов, связано с проведением более громоздких математических выкладок, чем при использовании уравнения Поклингтона. Однако, в случае использования уравнения Халлена нет проблемы квазисингулярности ядра, поскольку в уравнении Халлена отсутствует дифференциальный оператор.

Метод Вейланда конечного интегрирования является универсальным подходом, позволяющим решать широкий круг электромагнитных задач, в том числе – при использовании сложной морфологии анализируемых структур, включающих в себя среды с электрическими и магнитным и потерями, неоднородные и анизотропные среды. Однако, применение метода Вейланда связано с весьма высокими требованиями к вычислительным мощностям и оперативной памяти компьютеров.

1.5. Выводы по первой главе

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:

- проведение 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;

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

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

- разработка и исследование 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;

- разработка и исследование 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;

- разработка и исследование малогабаритных подземных антенн УКВ диапазона, стабильно функционирующих при изменении проводимости почвы, устойчивых к 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;

- разработка 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;

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

2. Методология проектирования приземных антенн УКВ диапазона волн, устойчивых к мощным механическим воздействиям

Проведенный анализ известных технических решений по созданию приземных антенн УКВ диапазона с высокой устойчивостью к сверхмощным механическим воздействиям показал, что перспективными подходами решения настоящей проблемы являются:

1) – размещение электрически малой антенны, изолированной по постоянному току от опорного стального основания, в сверхпрочной композитной капсуле, расположенной на вершине основания, установленного на железобетонной платформе; при этом используются капсула и опорное основание, 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.

Преимуществами первого подхода являются:

- отсутствие необходимости проведения натурных испытаний механической прочности капсулы и опорного основания, т.к. используются узлы, ранее апробированные и сертифицированные;

- возможность совмещения в одном корпусе антенн УКВ и СВЧ диапазонов, которые могут одновременно функционировать, не создавая помех друг другу;

- использование импедансно-согласованных сред с близкими значениями относительных диэлектрической ϵ_r и магнитной μ_r проницаемостей позволяет существенно, приблизительно, в $\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}$ раз, уменьшить габаритные размеры излучателей; при этом, за счет концентрации значительной доли энергии электрической и магнитной компонент поля ближней зоны в импедансно-согласованной среде, удается существенно ослабить влияние проводимости и диэлектрической проницаемости грунта на входные характеристики и направленные свойства антенны, а также – существенно ослабить влияние проводимости грунта на коэффициент полезного действия антенны;

- использование вибраторов с плечами непрямолинейной формы, в частности – с плечами спиральной формы, позволяет существенно уменьшить габаритные размеры антенны; за счет существенного повышения емкости между свернутыми плечами антенны (по сравнению с вибратором с прямолинейными плечами) удастся сконцентрировать существенную долю энергии ближнего поля вблизи излучателя, благодаря чему растет коэффициент полезного действия антенны, вследствие уменьшения потерь в грунте; наличие существенного магнитного момента спиральных плечей также позволяет уменьшить зависимость коэффициента полезного действия антенны от проводимости грунта, т.к. в подавляющем большинстве видов грунта преобладают потери электрического характера.

Второй подход базируется на использовании несимметричного вибратора, несущая механическая опора которого непосредственно крепится к железобетонной платформе, без изолирующей прокладки между плечом вибратора и подстилающей поверхностью. При использовании, в качестве несущего основную механическую нагрузку, внутреннего проводника, изолирующая втулка располагается у основания вибратора и может быть засыпана грунтом вследствие взрыва.

Поэтому более перспективным является использование вибраторов с верхней запиткой, впервые предложенных Г.З. Айзенбергом [3, 4], в которых изолирующая втулка располагается сверху и, с высокой вероятностью, не будет засыпана грунтом, при высоте монополя более 1 метра. Другим преимуществом вибратора с верхней запиткой является более высокий коэффициент полезного действия, что связано с более равномерным распределением тока по вибратору, чем у вибратора с нижней запиткой (как – с шунтовым способом запитки, так – и у вибратора, изолированного по постоянному току от подстилающей поверхности), а также – с концентрацией значительной доли энергии электрической компоненты поля в области вблизи изолирующей втулки, расположенной от грунта существенно дальше, чем у вибратора с нижней запиткой.

Как уже отмечалось в главе 1, для анализа характеристик тонкопроволочных антенн в диссипативных средах, а также – расположенных в близости от сред с конечной проводимостью, рациональным математическим аппаратом, в смысле

минимизации вычислительных затрат, является аппарат интегральных уравнений Халлена [128-131], а также – интегро-дифференциальных уравнений Покклингтона [118-127]. Поэтому часть разработанных в рамках настоящей диссертации антенн может быть исследована с использованием данного математического аппарата.

Однако, не все виды разработанных антенн могут быть адекватно представлены с помощью тонкопроволочного приближения: вибратор с плечами в виде плоских спиралей Архимеда; стальное опорное основание в форме усеченного конуса; а также – подземные антенны, рассмотренные в главах 3 и 4, содержащие плоские металлические листы.

Кроме того, для корректного сравнения характеристик приземных и подземных антенн существенно различной конструкции (как – содержащих тонкопроволочные элементы, так – и без них), автором было принято решение использовать аппарат конечного интегрирования Вейланда [132-135] для анализа характеристик всех разработанных антенн, как – один из самых универсальных методов вычислительной электродинамики, не имеющий ограничения, ни по геометрии антенн, ни по – виду материалов.

Во второй главе разработана методология проектирования приземных антенн УКВ диапазона волн, устойчивых к мощным механическим воздействиям:

- 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.

2.1. Исследование перспективности использования феррита в качестве импедансно-согласованной среды для уменьшения габаритных размеров приземной антенны УКВ диапазона

Одним из стимулов для активного исследования путей создания электрически малых антенн послужило стремительное развитие космической техники, где вопрос снижения габаритных размеров и массы антенных устройств УКВ диапазона является весьма актуальным. Антенны с существенно уменьшенными габаритными размерами также широко востребованы в аппаратуре связи бортового и мобильного базирования, в портативной аппаратуре телекоммуникации, а также – в стационарной аппаратуре, где пространство для расположения антенны жестко ограничено.

В частности, установочные размеры приземных антенн, размещаемых вблизи систем вооружения, являются строго ограниченными.

Уменьшение габаритных размеров антенны приводит к росту ее добротности и сужению полосы рабочих частот, за исключением тех случаев, когда для улучшения качества согласования электрически малой антенны в нее включают сосредоточенные или распределенные диссипативные элементы – в последнем случае существенно падает значение коэффициента полезного действия.

Фундаментальная теория, в которой устанавливается связь между добротностью и размерами антенн описана в работах Чу и Харрингтона [138]. Чу и Харрингтоном было установлено, что произведение коэффициента полезного действия и относительной ширины полосы частот по заданному качеству согласования антенны с фидерной линией является константой при заданных размерах электрически малой антенны. Отсюда следует, что электрически малые антенны с высокими значениями коэффициента полезного действия являются физически реализуемыми, только, чем выше будет значение КПД, тем уже будет полоса частот по согласованию, а также – по значениям коэффициента усиления, т.к. величина коэффициента усиления пропорциональна величине КПД, которая зависит, не только от омических и диссипативных потерь, но – и от коэффициента отражения от входа антенны.

В ряде работ, в частности, в работе [98], для электрически малых антенн выявлены общие закономерности поведения предельных характеристик добротности. Вместе с тем, информации о поведении и количественной оценке коэффициента полезного действия электрически малых антенн, расположенных вблизи диссипативных сред, в литературе недостаточно, хотя известно, что этот показатель непосредственно связан с электрическим размером антенны [139].

Целью настоящего подраздела является исследование возможности и эффективности использования феррита в качестве импедансно-согласованной среды для уменьшения габаритных размеров приземной антенны УКВ диапазона, основной излучатель которой изолирован по постоянному току от опорной стойки, на вершине которой расположена высокопрочная композитная капсула с антенной в оболочке из феррита с близкими значениями относительных диэлектрической и магнитной

проницаемостей: $\mu_r/\varepsilon_r \approx 1$. Частные задачи, которые предстоит решить в подразде: 1) – выбор типа антенны с тороидной диаграммой направленности, которая бы имела значения входного сопротивления, при расположении ее в сфере из импедансно-согласованного материала, удобные для ее согласования с фидерной линией с волновым сопротивлением 50 Ом; 2) – исследование антенны при использовании бесконечно протяженной и бесконечно проводящей подстилающей поверхности, с целью оценки потерь непосредственно в излучателе и опорной стойке; 3) – оценки влияния конечной металлической подстилающей поверхности и параметров грунта на КПД антенны и качество ее согласования.

В некоторых странах, в частности – в США производятся импедансно-согласованные материалы, у которых значения относительных диэлектрической и магнитных проницаемостей близки. Их использование позволяет уменьшить размеры антенн в число раз, приблизительно равное величине коэффициента преломления среды $n = \sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r}$, при этом на границе раздела среды и воздуха не возникает отражений, т.к. характеристические сопротивления импедансно-согласованной среды и воздуха равны. Импедансно-согласованные материалы запрещены к поставке в Россию. В России подобные материалы, к сожалению, пока не выпускаются. Поэтому актуальным является поиск подходящих выпускаемых материалов для использования в качестве импедансно-согласованной среды.

При выборе типа антенны, размещаемой внутри импедансно-согласованного материала, учитывалось, что уменьшение геометрических размеров излучателя приводит к уменьшению величины сопротивления излучения, а, следовательно – и к уменьшению величины активной части входного ее сопротивления. Поэтому, учитывая, что антенна должна обладать тороидной диаграммой направленности, в качестве излучателя был выбран петлевой вибратор Пистолькорса, входное сопротивление которого в 4 раза выше, чем у симметричного электрического вибратора эквивалентной длины.

Геометрические размеры модели антенного устройства, размещаемого внутри высокопрочной композитной капсулы, установленной на вершине стальной опорной стойки, приведены на рис. 2.1.

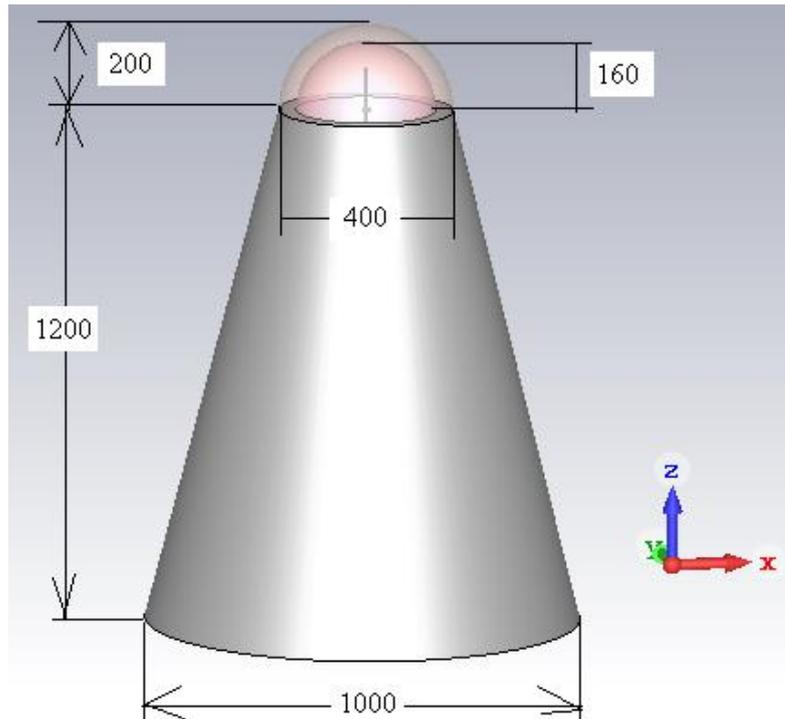


Рис. 2.1. Размещение вибратора Пистолькорса на опорной стойке

В качестве импедансно-согласованной среды был выбран феррит марки 20ВН [140]. Достоинствами данной марки феррита является высокая температурная стабильность его параметров, малый разброс начального значения магнитной проницаемости и возможность функционирования на частотах до 100 МГц.

Параметры феррита марки 20ВН следующие: $\mu_r = 20$ (на частоте 30 МГц); $\varepsilon_r = 15$; электрическая проводимость $\sigma = 10^{-6}$ См/м; тангенс угла магнитных потерь на частоте 30 МГц $tg\delta_m = 0.006$.

Для функционирования на частоте, приблизительно равной 36 МГц, длина вибратора Пистолькорса, расположенного внутри ферритового шара диаметром 320 мм, составляет 196 мм, рис. 2.2. Сверху ферритовый шар закрыт высокопрочной композитной капсулой ($\varepsilon_r = 9.9$; $tg(\delta_d) = 0.002$) с толщиной стенки 40 мм. Нижняя половина ферритового шара располагается внутри полости на вершине опорной стойки.

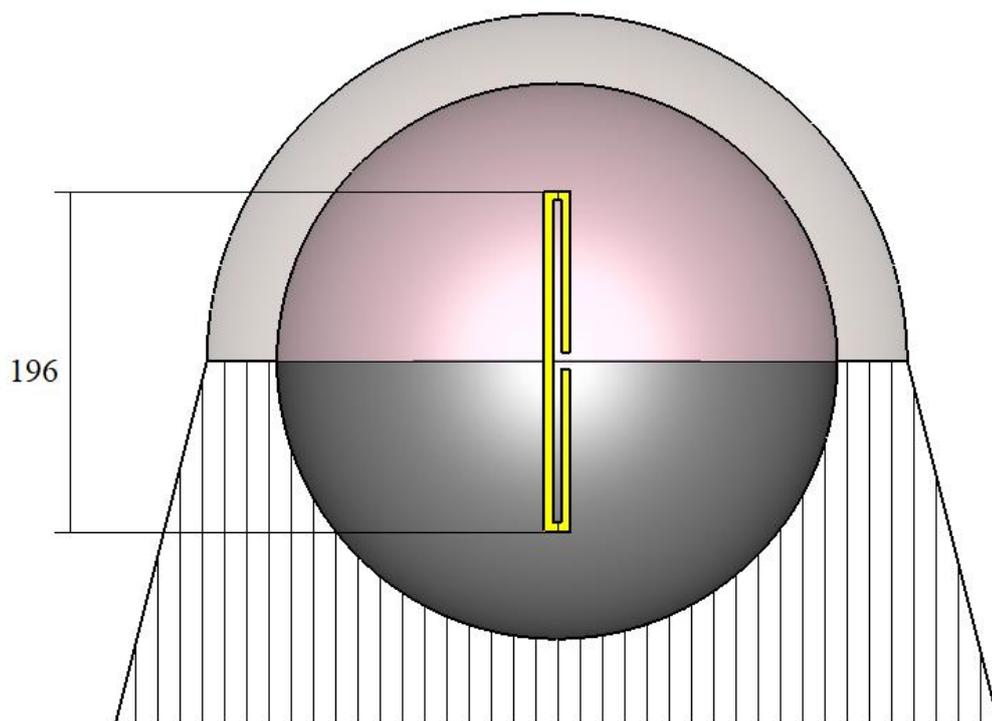


Рис. 2.2. Модель вибратора Пистолькорса в импедансно-согласованной среде

Ожидаемой ценой за существенное уменьшение размеров антенного устройства более, чем 20 раз (резонансная длина вибратора Пистолькорса уменьшается в число раз, большее, чем $n = \sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r} = \sqrt{20 \cdot 15} \approx 17.321$, за счет наличия обтекателя – композитной капсулы), в соответствии с критерием Чу-Харрингтона, является существенное снижение коэффициента полезного действия антенны: даже в случае идеально проводящей подстилающей поверхности бесконечной протяженности значение КПД на частоте резонанса составляет около -6 дБ, или около 25%, а также – существенным сужением полосы рабочих частот по критерию сохранения значения модуля коэффициента отражения от входа антенны не более -10 дБ, по сравнению с полноразмерным вибратором Пистолькорса, размещенным в воздухе - относительная ширина полосы рабочих частот составляет около 0.6%. Тем не менее, резонансная длина вибратора Пистолькорса, благодаря размещению его в импедансно-согласованной среде, уменьшена более, чем в 20 раз, что и являлось нашей основной целью.

Полезной функцией антенного устройства является возможность варьирования величиной магнитной проницаемости феррита путем пропускания постоянного тока через петлевой вибратор Пистолькорса, что позволяет осуществлять, при

необходимости (например – при изменении проводимости грунта, а также – в случае навала грунта вследствие взрыва), перестройку частоты его резонанса. Удобство подобного способа перестройки частоты обусловлена сходством пространственной структуры силовых линий магнитного поля постоянного тока, протекающего через вибратор Пистолькорса, и силовых линий магнитной составляющей ближнего электромагнитного поля антенны.

Диаграмма направленности вибратора Пистолькорса, размещенного в импедансно-согласованной среде на вершине опорной стойки (рис. 2.1), которая расположена на идеально проводящей и бесконечно проводящей подстилающей поверхности, на частоте резонанса 35.9 МГц приведена на рис. 2.3.

Расчеты проводились с использованием пакета программ численного электродинамического моделирования Microwave Studio CST, использовался метод конечного интегрирования Вейланда, решение задачи проводилось в пространственно-временной области.

С целью проверки сходимости численных результатов, величина шага ячейки изменялась от 40 до 100 ячеек на длину волны. Было установлено, что входные характеристики антенны, ее диаграмма направленности, а также – величина омических и диссипативных потерь слабо изменяются при уменьшении величины ячейки сетки в указанных выше пределах. На рис. 2.4 показано сечение антенного устройства при значении координаты $y = 0$ и ячейки построенной сетки при числе ячеек на длину волны, равном 100. В виде конуса, расположенного в точках запитки вибратора Пистолькорса, на рис. 2.4 показан сосредоточенный порт с внутренним сопротивлением 18 Ом.

В результате численного анализа было выяснено, рис. 2.5, что средняя величина входного сопротивления вибратора Пистолькорса в ферритовом шаре составляет около 18 Ом, что позволяет использовать для запитки антенны трансформатор с коэффициентом трансформации сопротивления 1:4.

Была проведена оценка влияния конечной металлической подстилающей поверхности и параметров грунта на КПД антенны и качество ее согласования. Рассматривались следующие частные случаи: 1) - расположения опорной стойки на стальной

платформе с размерами $10 \times 10 \text{ м}^2$, которая продолжается бесконечно проводящим материалом; 2) – опорная стойка расположена непосредственно на грунте с параметрами $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 13$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.05 \text{ См/м}$; 3) – опорная стойка расположена непосредственно на грунте с параметрами $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$.

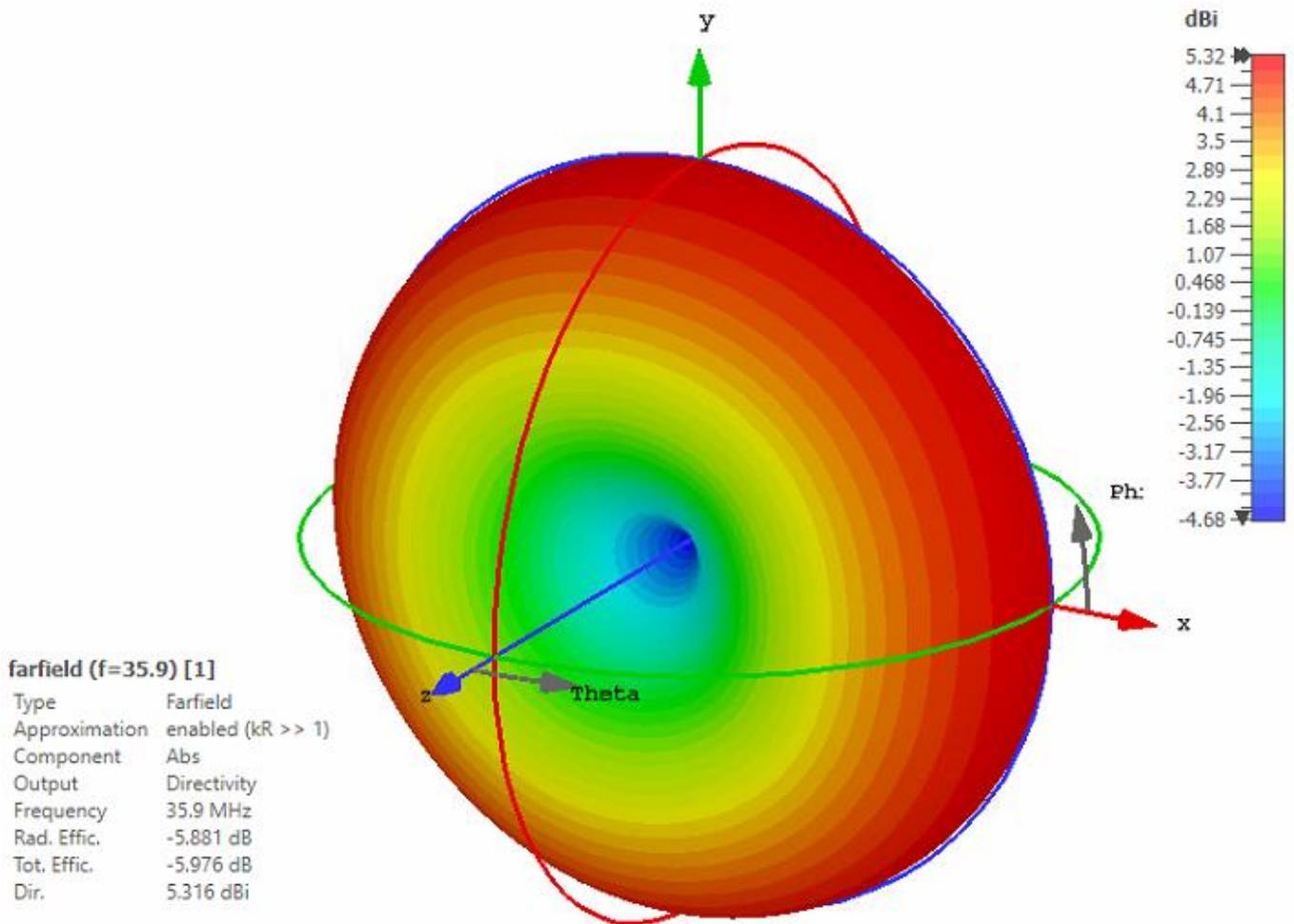


Рис. 2.3. Диаграмма направленности вибратора Пистолькорса на частоте 35.9 МГц, размещенного в ферритовом шаре, установленном на вершине опорной стойки, случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

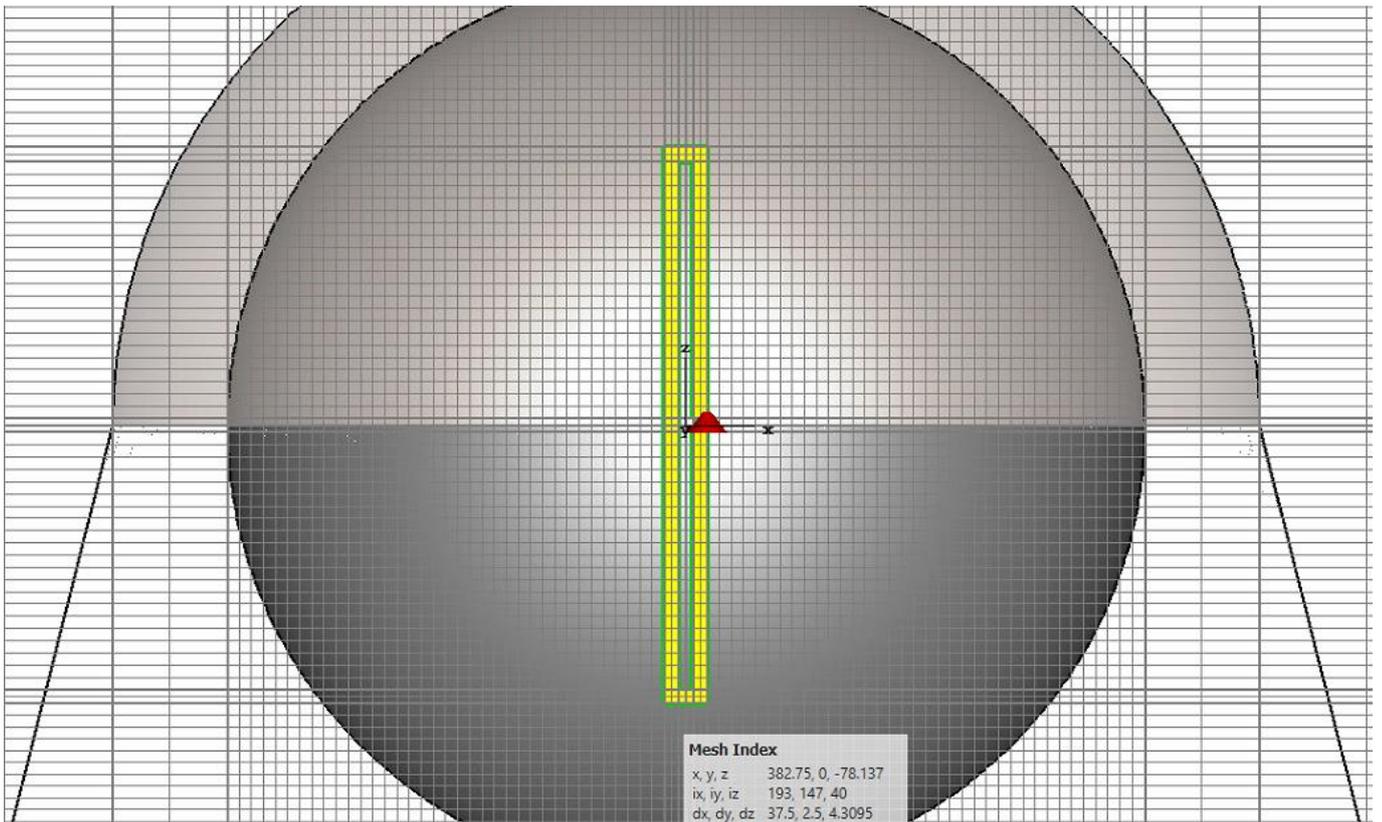


Рис. 2.4. Разбиение пространства, занимаемого антенной, а также – пространства, окружающего антенну, на ячейки сетки в рассматриваемой модели. Число ячеек на длину волны - 100

На рис. 2.6 приведены зависимости суммарных потерь, включающих потери в подстилающей поверхности, от частоты для анализируемого антенного устройства. Благодаря тому, что вибратор изолирован относительно опорной стойки, а также – укорочению длины волны в феррите в $\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}$ раз, влияние параметров грунта с материальными параметрами ($\epsilon_{r \text{ гр.}}$; $\sigma_{\text{гр.}}$) на коэффициент полезного действия антенны η_{Σ} 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 значение коэффициента полезного действия составляет $\eta_{\Sigma} = -6$ дБ.

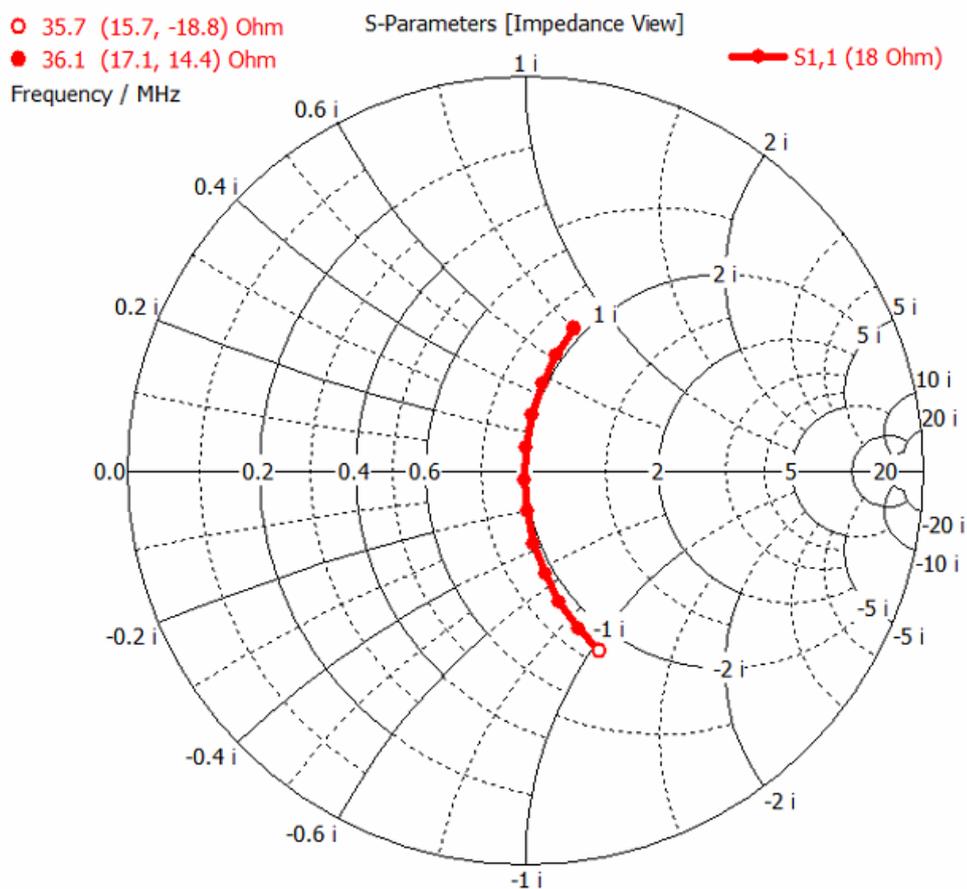


Рис. 2.5. Номограмма Вольперта-Смита направленности вибратора Пистолькорса, размещенного в ферритовом шаре, установленном на вершине опорной стойки, случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

На рис. 2.7 показаны зависимости модулей коэффициента отражения от входа антенны от частоты. Было выяснено, что значение входного сопротивления антенны при изменении параметров грунта в широких пределах существенно не изменяется, что позволяет обойтись без использования автоматического согласующего устройства. И это при том, что, с целью анализа наихудшего случая – навала земли вследствие взрыва, опорная стойка размещалась, не на железобетонном основании, внутри которого расположена стальная сетка, не на стальной плите, а – непосредственно на грунте, что соответствует максимальным возможным потерям в антенне, составной частью которой, с точки зрения электродинамики, является конечно проводящая подстилающая поверхность.

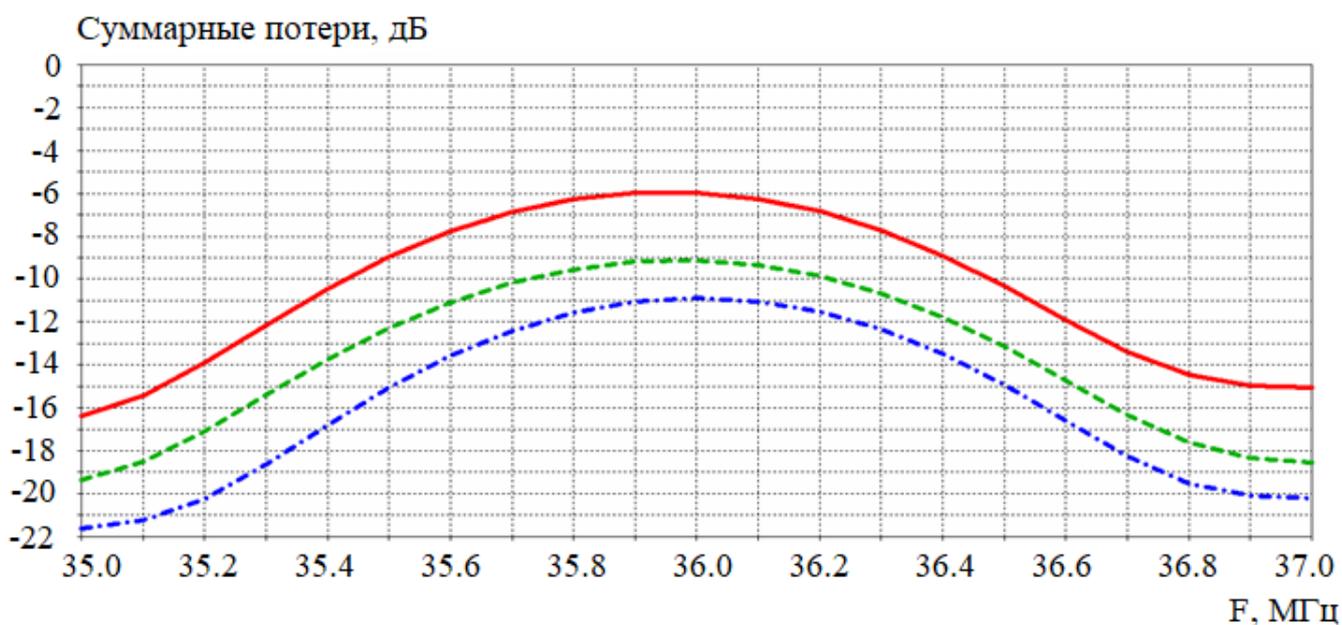


Рис. 2.6. Зависимости суммарных потерь (включающих потери в подстилающей поверхности) от частоты для случаев: 1) - расположения опорной стойки на стальной платформе с размерами $10 \times 10 \text{ м}^2$, которая продолжается бесконечно проводящим материалом – сплошная линия; 2) – опорная стойка расположена непосредственно на грунте с параметрами $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 13$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.05 \text{ См/м}$ – штриховая линия; 3) – опорная стойка расположена непосредственно на грунте с параметрами $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$ – штрих-пунктирная линия

Другим способом использования феррита с близкими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей, предложенным автором диссертации, является реализация шунтовой запитки одного из вариантов опорной стойки антенны СВЧ диапазона для использования стойки в качестве несимметричного вибратора, функционирующего в УКВ диапазоне; при этом ферритовое кольцо из феррита марки 20ВН толщиной 100 мм и высотой 127 мм используется в качестве материала заполнения четвертьволнового стакана, образованного нижней частью опорной стойки и внешнего стального кольца, установленного на опорную платформу, рис. 2.8. Высота опорной стойки с композитной капсулой на ее вершине – 772 мм, диаметр основания – 540 мм. Внешний диаметр кольца, являющегося внешней стенкой четвертьволнового стакана – 940 мм. Использование ферритового заполнения внутри

четвертьволнового стакана позволяет существенно сократить его глубину, и, следовательно – увеличить механическую прочность антенного устройства.

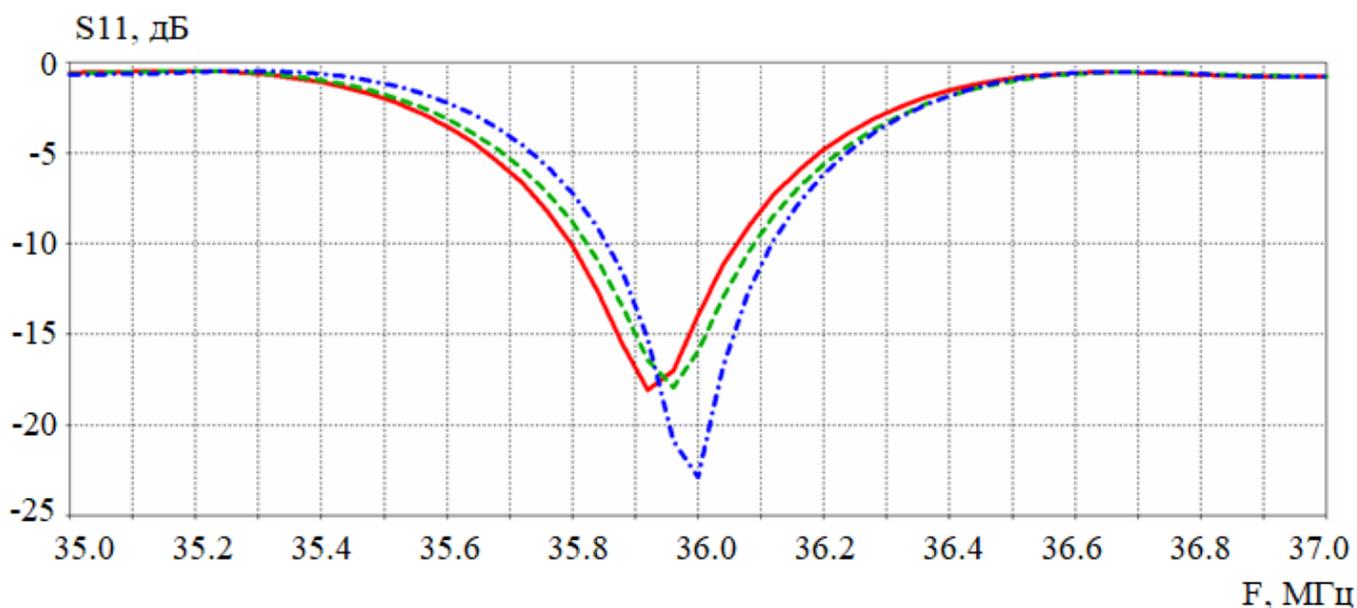


Рис. 2.7. Зависимости модулей коэффициента отражения от входа антенны от частоты для случаев: 1) - расположения опорной стойки на стальной платформе с размерами $10 \times 10 \text{ м}^2$, которая продолжается бесконечно проводящим материалом – сплошная линия; 2) – опорная стойка расположена непосредственно на грунте с параметрами $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 13$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.05 \text{ См/м}$ – штриховая линия; 3) – опорная стойка расположена непосредственно на грунте с параметрами $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$ – штрих-пунктирная линия

Входное сопротивление антенны – 50 Ом; частотная зависимость модуля коэффициента отражения от входа антенны приведена на рис. 2.9. Относительная ширина полосы частот, ограниченная значениями коэффициента отражения от ее входа не более -10 дБ, составляет около 3.6%. Диаграмма направленности антенны – квази- тороидная, имеет слабую зависимость от азимутальной координаты вследствие существенного электрического периметра заполнения четвертьволнового стакана, рис. 2.10; суммарные потери в антенне составляют около -11 дБ. Тем не менее, предложенная антенна почти в 3 раза ниже, чем четвертьволновый вибратор,

настроенный на частоту 33.2 МГц, что позволяет существенно снизить суммарную механическую нагрузку на антенну вследствие воздействия взрывной волны.

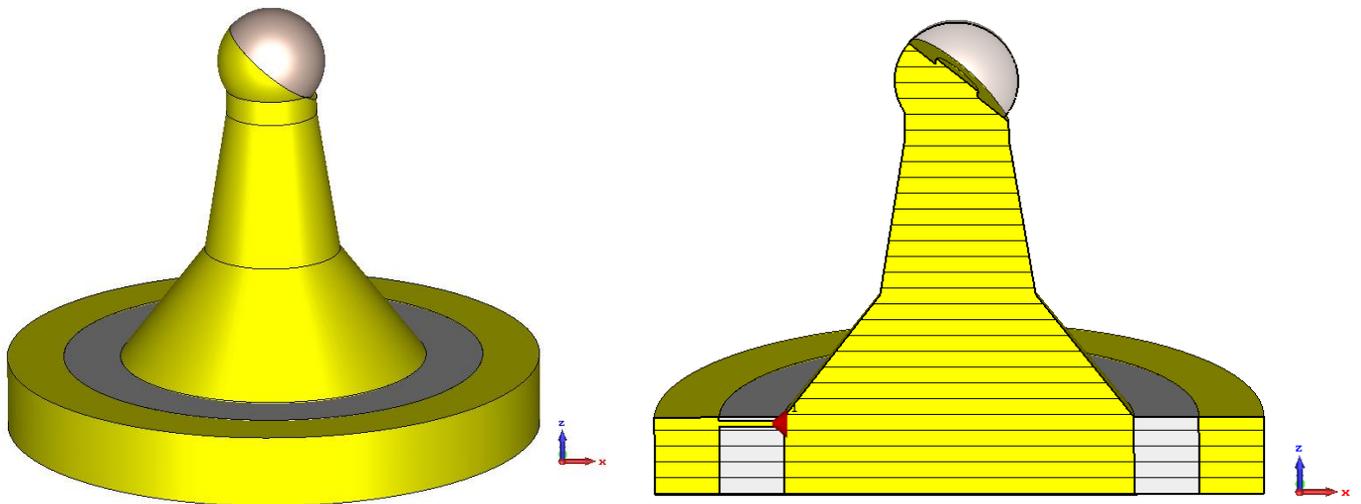


Рис. 2.8. Использование в качестве несимметричного вибратора УКВ диапазона волн опорной стойки СВЧ антенны. Четвертьволновой стакан заполнен ферритом марки 20ВН

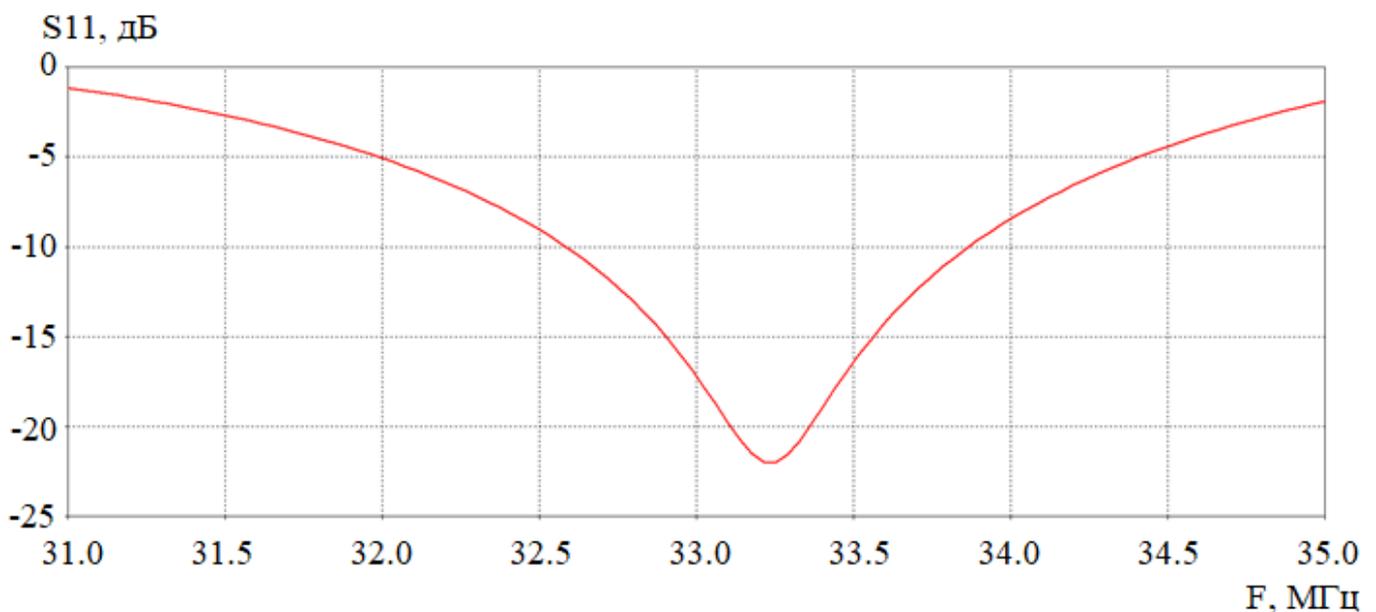


Рис. 2.9. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения от входа антенны, показанной на рис. 2.8, для случая идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

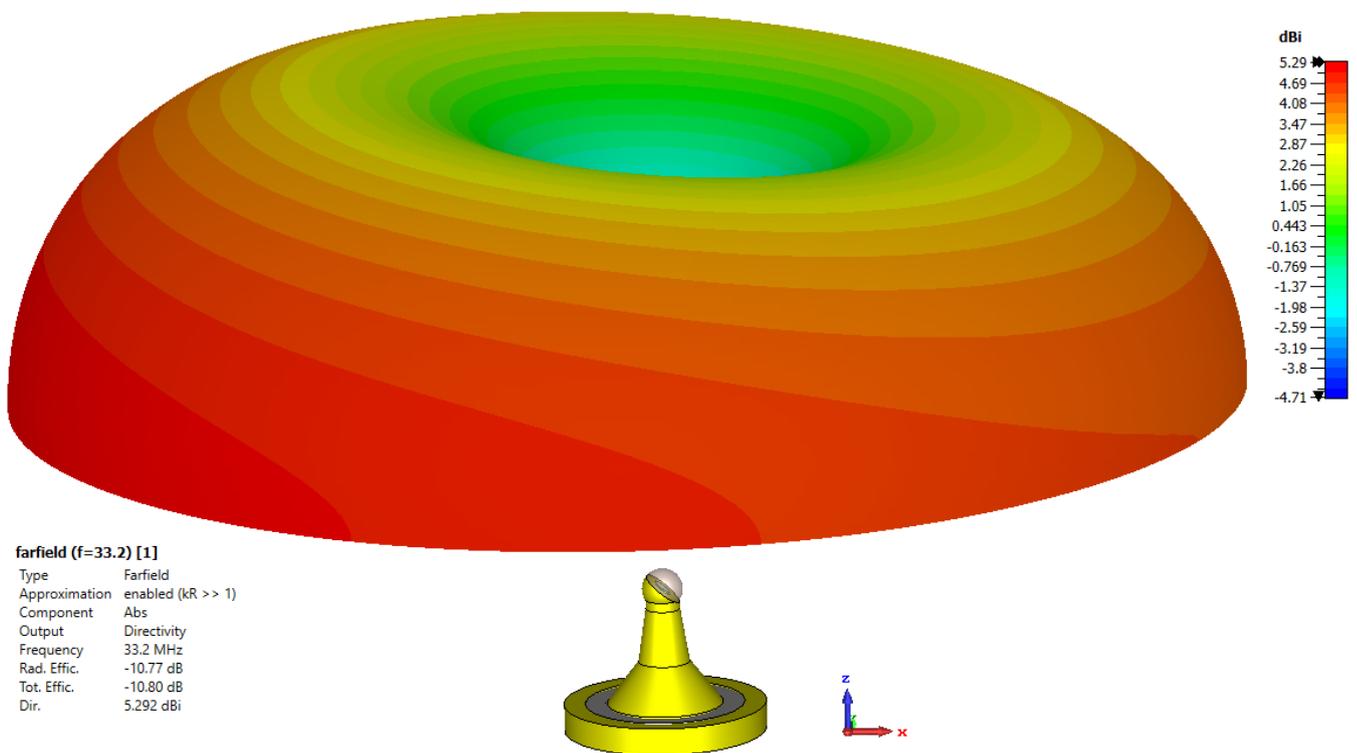


Рис. 2.10. Диаграмма направленности антенны, показанной на рис. 2.8, для случая идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности, на частоте 33.2 МГц

Таким образом, в настоящем подразделе показано, что использование импедансно-согласованных материалов является перспективным направлением для минимизации габаритных размеров антенн УКВ диапазона, причем в их качестве могут использоваться ферриты с близкими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Предложенный подход позволяет 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.

2.2. Методика проектирования монополей, внутренняя, или – внешняя мощная механическая опора которых соединена с металлической подстилающей поверхностью

Использование несимметричных электрических вибраторов, изолированных от подстилающей поверхности, в качестве антенных устройств длинноволновой области УКВ диапазона волн, которые должны сохранить свое функциональное назначение достаточно эффективного приема и излучения электромагнитных волн (критерием эффективности является допустимая величина проигрыша антенны, по коэффициенту усиления, не более, чем 10 дБ, несимметричному четвертьволновому электрическому вибратору, запитанному относительно железобетонной подстилающей поверхности) при мощных механических воздействиях, связано с рядом принципиальных трудностей:

- высокой вероятностью короткого замыкания плеча вибратора на подстилающую поверхность в результате воздействия взрывной волны, т.к. в существующих аналогах подобных антенн используется несколько десятков болтов, соединяющих в единое целое плечо вибратора, диэлектрическую пластину и подстилающую поверхность, в результате которого сопротивление излучения антенны резко уменьшится и значительно ухудшится качество согласования антенны с фидерным трактом;

- слабым местом подобной конструкции, с точки зрения механической прочности, являются диэлектрические втулки, изолирующие болты от плеча вибратора;

- шунтирование, по высокочастотным токам, плеча вибратора на подстилающую поверхность, создаваемое большим количеством болтовых соединений, приводящее к снижению входного сопротивления вибратора и падению его коэффициента полезного действия.

Перечисленные выше недостатки несимметричных электрических вибраторов, изолированных от подстилающей поверхности, делают актуальным разработку методики проектирования монополей, внутренняя, или – внешняя мощная механическая опора которых соединена с металлической подстилающей поверхностью.

Непосредственное крепление стальной опоры монополя к стальной плите, выполняющей функцию подстилающей поверхности, установленной на железобетонном основании, позволяет решить две важные задачи:

- существенно повысить механическую прочность конструкции антенны, которую можно наращивать, увеличивая диаметр опоры, если потребуется – до 1 метра и более;

- за счет шунтового способа запитки антенны реализуется ее защита от мощного электромагнитного импульса, а также – молниезащита.

При электродинамическом моделировании антенн использовался метод конечного интегрирования Вейланда [132-135]. Данный метод алгебраизации уравнений Максвелла выбран, как не имеющий ограничений по геометрии анализируемых антенн и материальным параметрам сред; метод интегральных уравнений Халлена и метод интегро-дифференциальных уравнений Покклингтона могут давать существенные погрешности при анализе вибраторов, значения периметра которых не являются существенно меньшими длины волны, поэтому, несмотря на их простоту, по сравнению с методом Вейланда, они не использовались, хотя с их помощью удобно анализировать характеристики тонких вибраторных антенн.

Рассмотрим модель монополя с шунтовым способом запитки с внутренней опорной стойкой, рис. 2.11, 2.12. Возможность обеспечения существенно большей механической прочности данной конструкции, по сравнению с несимметричным вибратором, изолированным от подстилающей поверхности по постоянному току, за счет неразрывности основания монополя и мощного внутреннего опорного стержня, а также – защищенность от воздействия мощного электромагнитного импульса, за счет короткого замыкания входа антенны по постоянному току, обуславливают перспективность использования подобного типа антенн в системах управления.

При моделировании в качестве металла была выбрана сталь, в качестве диэлектрика, заполняющего четвертьволновый стакан, – эпоксидная смола. Подстилающая поверхность считалась идеально проводящей и бесконечно протяженной.

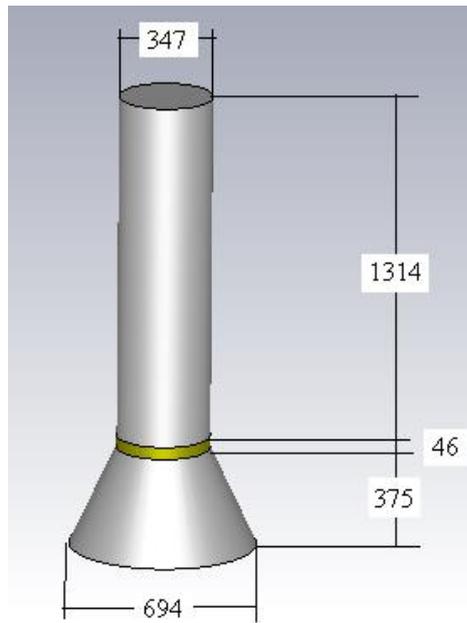


Рис. 2.11. Модель монополя с шунтовой запиткой для длинноволновой области УКВ диапазона волн

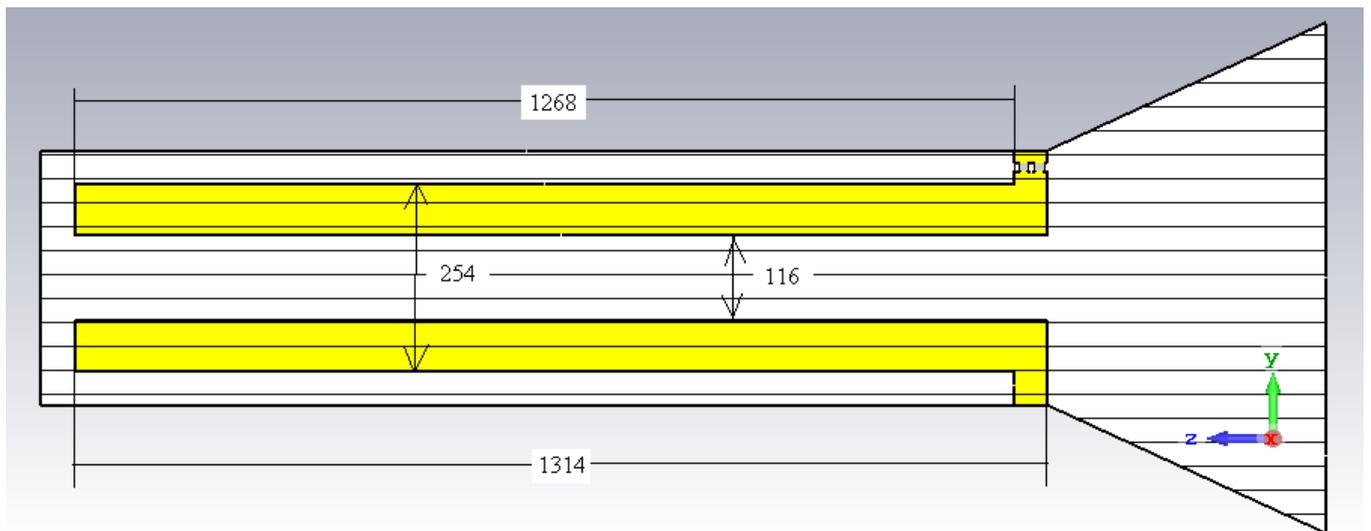


Рис. 2.12. Разрез монополя с шунтовой запиткой и внутренней опорной стойкой

Входные характеристики антенны приведены на рис. 2.13-2.15. Значение входного сопротивления антенны на частоте четвертьволнового резонанса монополя составляет около 12 Ом, что обуславливает возможность использования трансформатора с коэффициентом трансформации сопротивления 1:4 для запитки антенны. Для компенсации емкостной составляющей входного сопротивления антенны

использовалась последовательно включенная сосредоточенная индуктивность величиной около 0.04 мкГн.

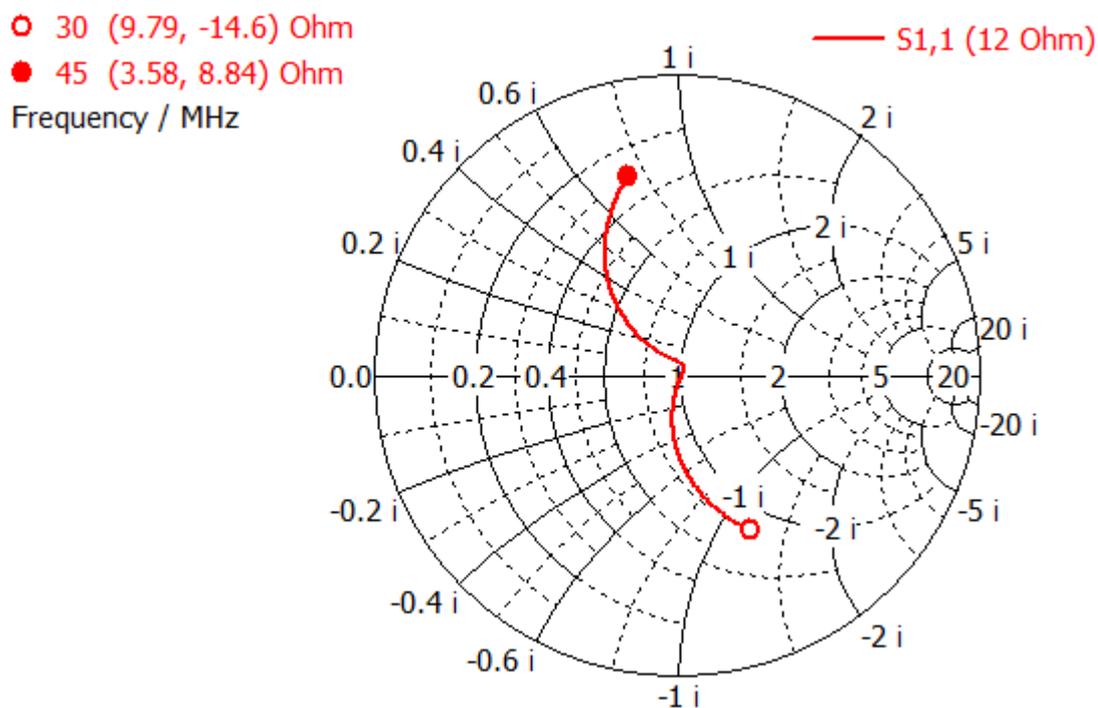


Рис. 2.13. Номограмма Вольперта-Смита монополя при волновом сопротивлении фидера 12 Ом

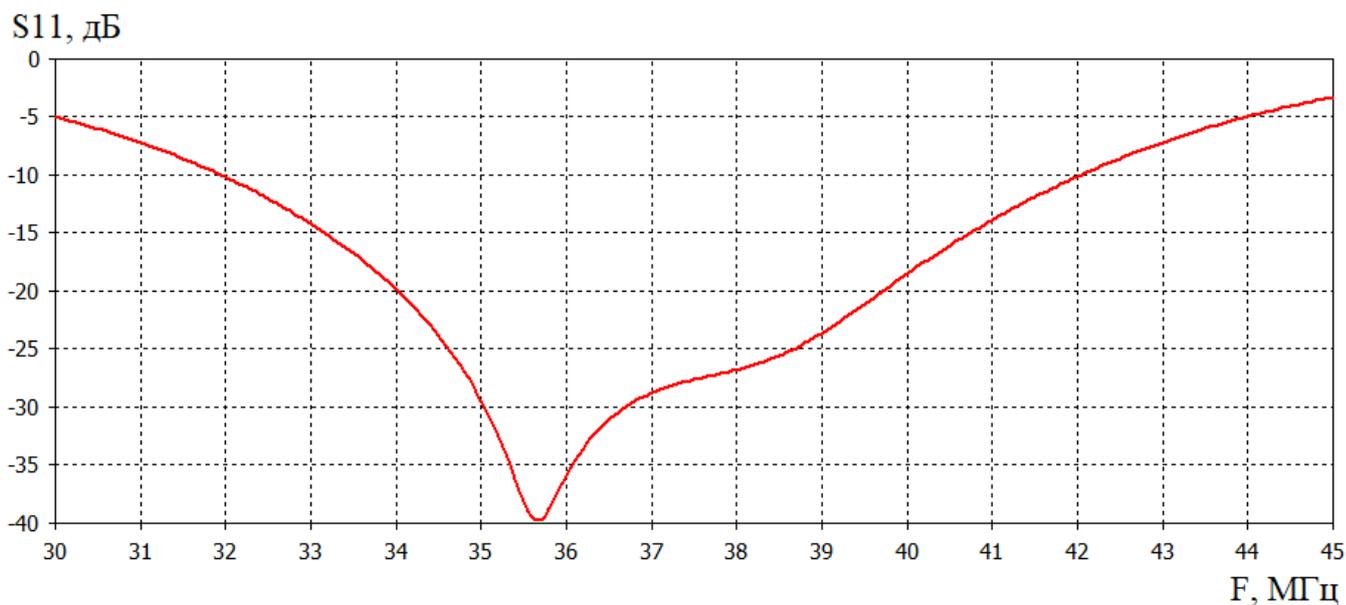


Рис. 2.14. Коэффициент отражения от входа антенны при волновом сопротивлении фидера 12 Ом

На рис. 2.16 показана частотная зависимость суммарного коэффициента полезного действия антенны, включающая потери в материалах антенны, а также – неидеальность ее согласования с фидерным трактом.

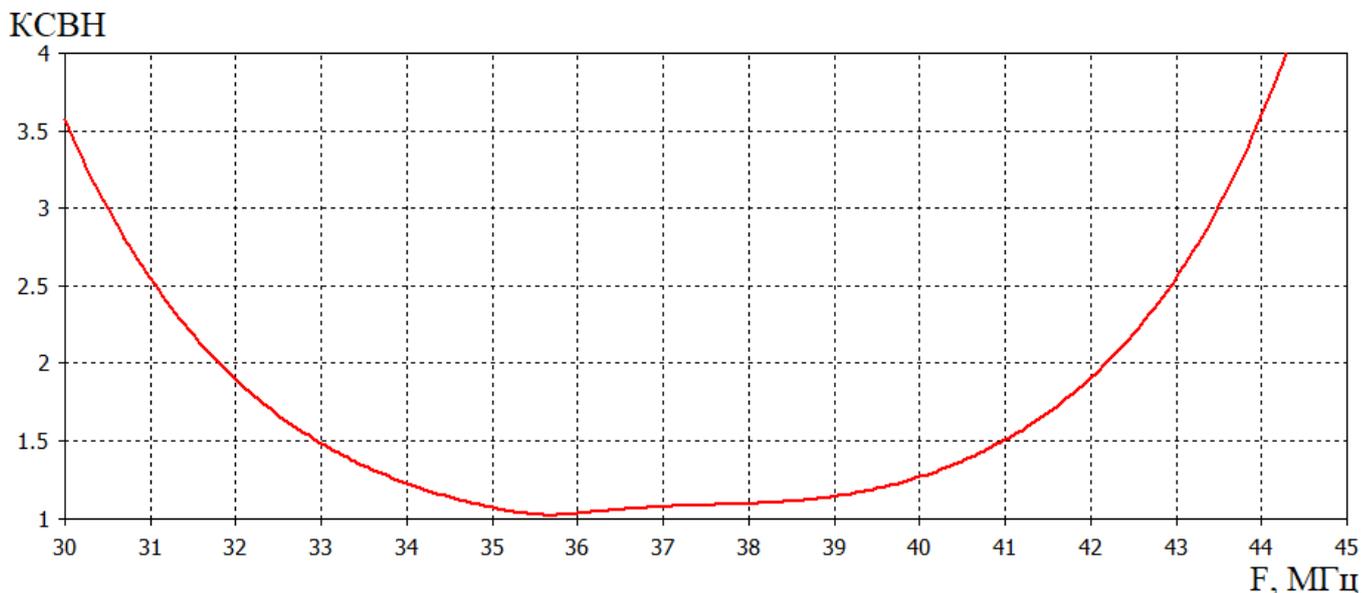


Рис. 2.15. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) при волновом сопротивлении фидера 12 Ом

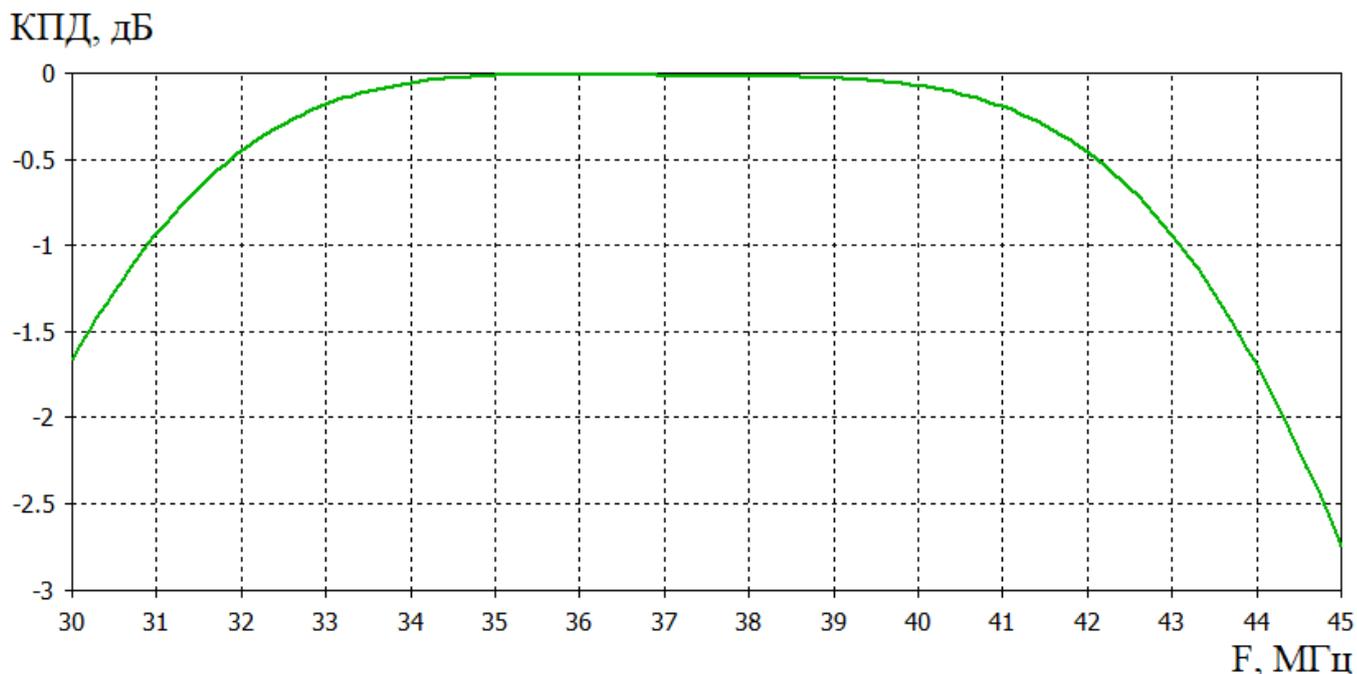


Рис. 2.16. Частотная зависимость коэффициента полезного действия монополя (идеально проводящая и бесконечно протяженная подстилающая поверхность)

Для минимизации затрат материалов при создании макета монополя с шунтовой запиткой и внутренней опорной стойкой в качестве внешней трубы была выбрана стандартная стальная труба внешним диаметром 108 мм и толщиной стенки 3 мм, а в качестве внутренней опоры - стандартная стальная труба с внешним диаметром 57 мм. В качестве диэлектрика использовалась эпоксидная смола марки ЭДП-20. Для компенсации емкостной составляющей входного сопротивления антенны использовалась последовательно включенная сосредоточенная индуктивность величиной около 0.066 мкГн.

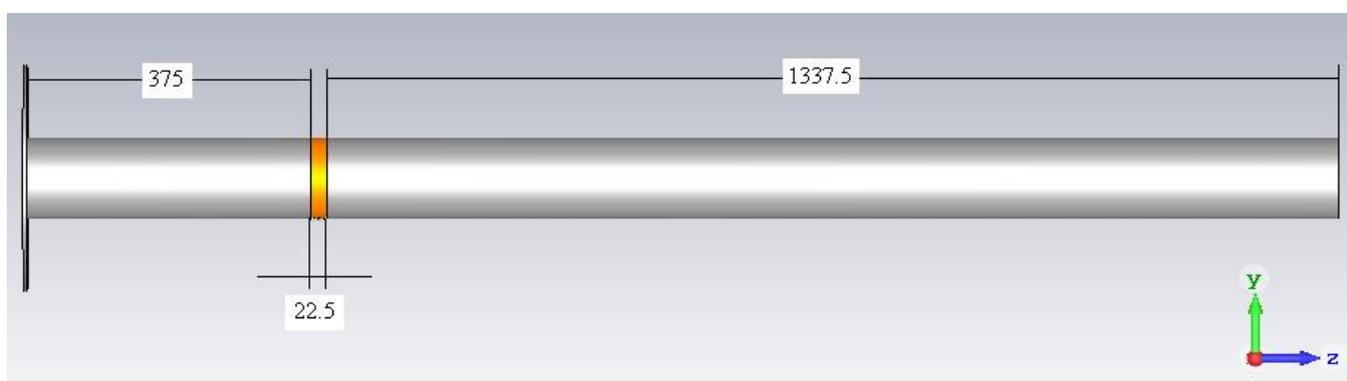


Рис. 2.17. Упрощенная модель монополя с шунтовой запиткой и внутренней опорной стойкой

На рис. 2.18-2.20 показаны входные характеристики тонкого монополя, а на рис. 2.21 - частотная зависимость суммарного коэффициента полезного действия.

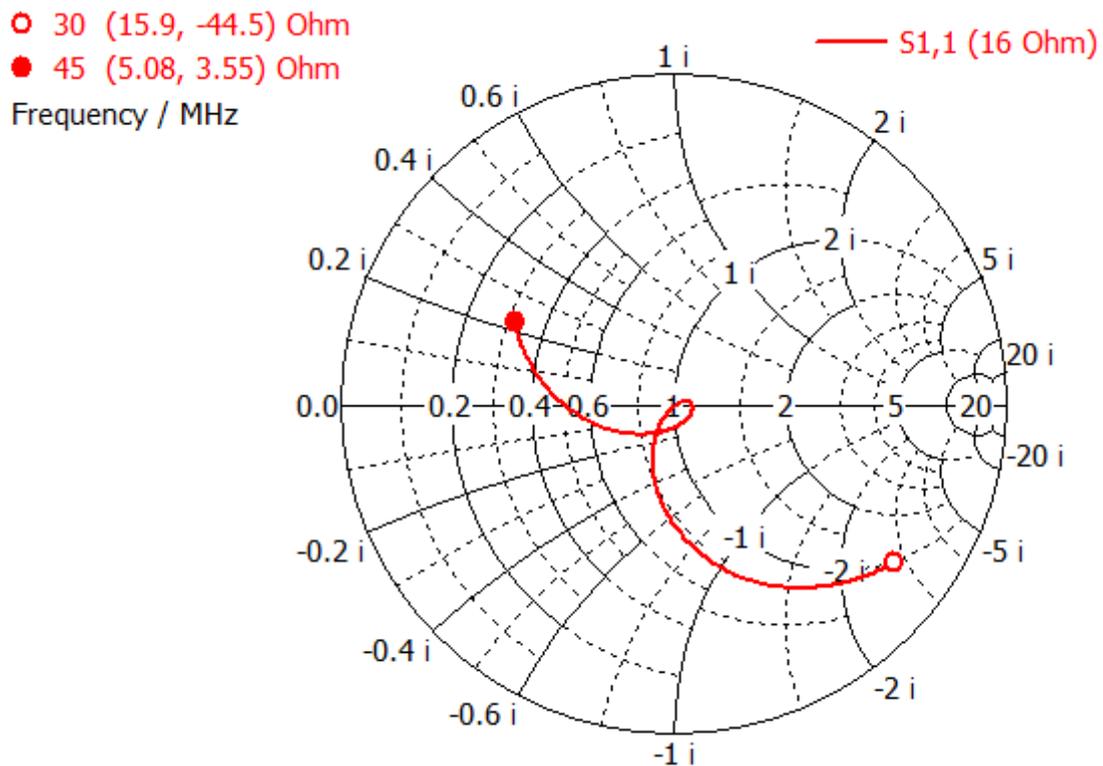


Рис. 2.18. Номограмма Вольперта-Смита тонкого монополя при волновом сопротивлении фидера 16 Ом

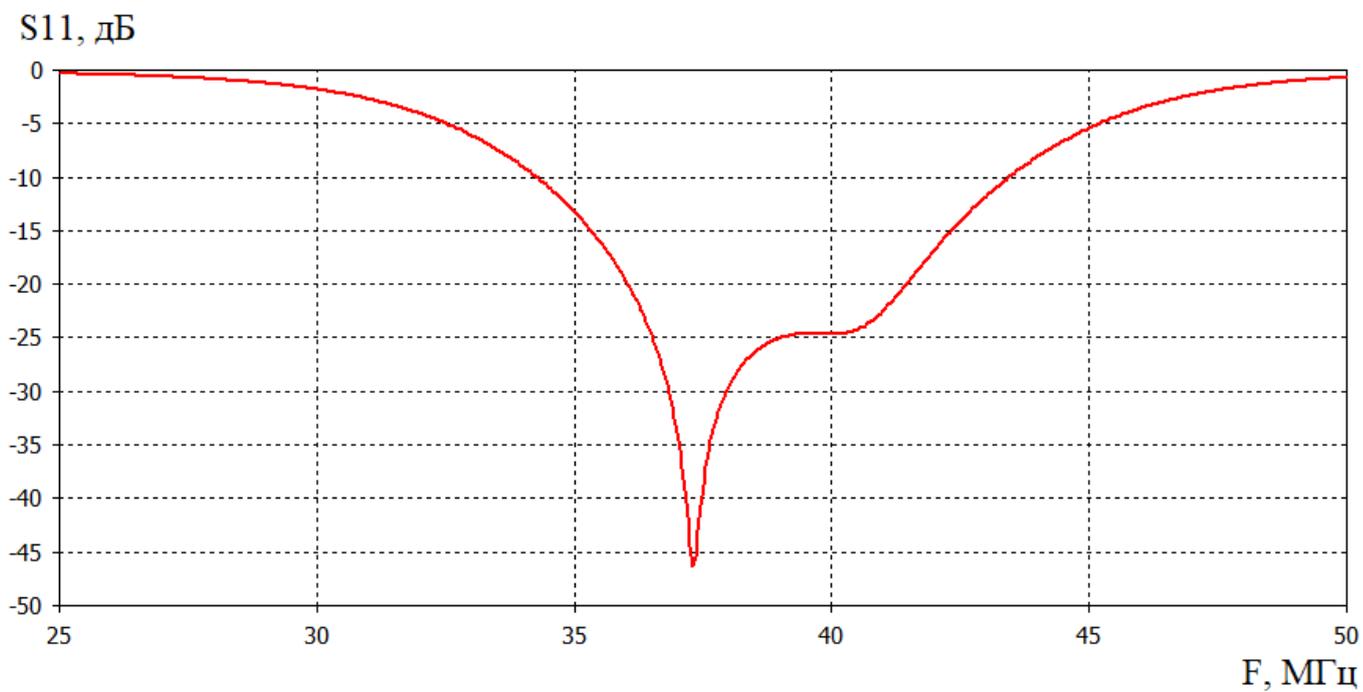


Рис. 2.19. Коэффициент отражения от входа тонкого монополя при волновом сопротивлении фидера 16 Ом

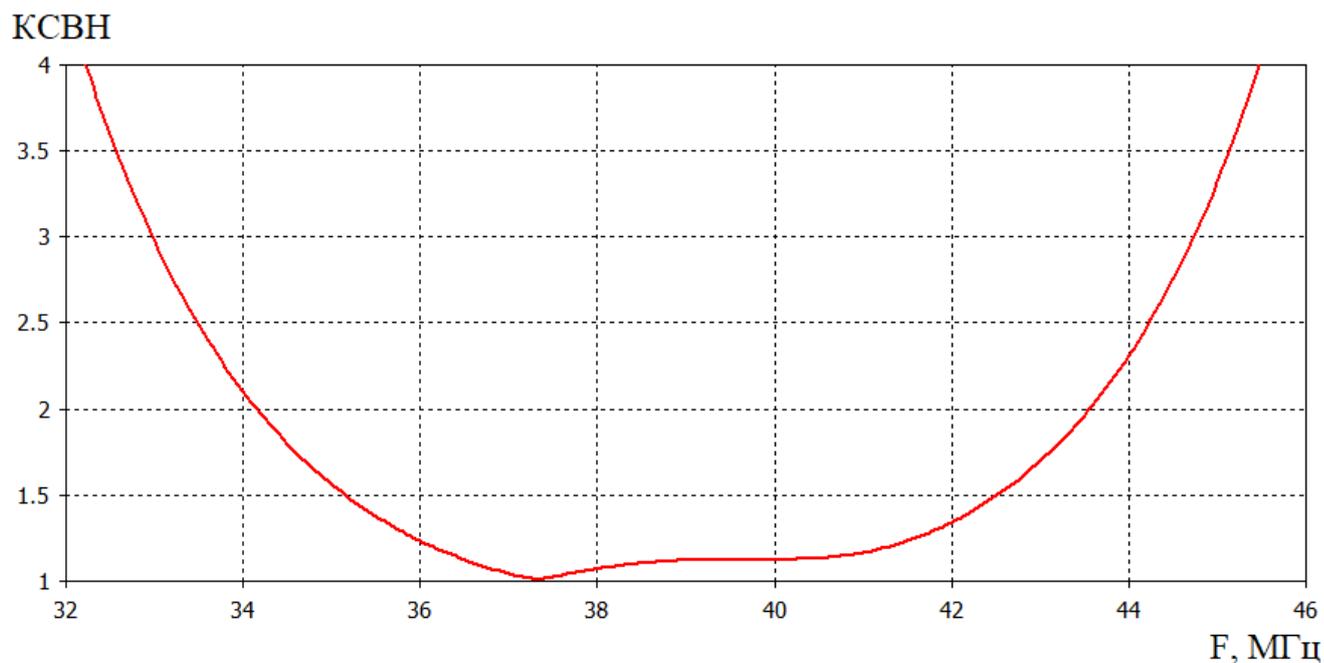


Рис. 2.20. Коэффициент стоячей волны по напряжению при волновом сопротивлении фидера 16 Ом

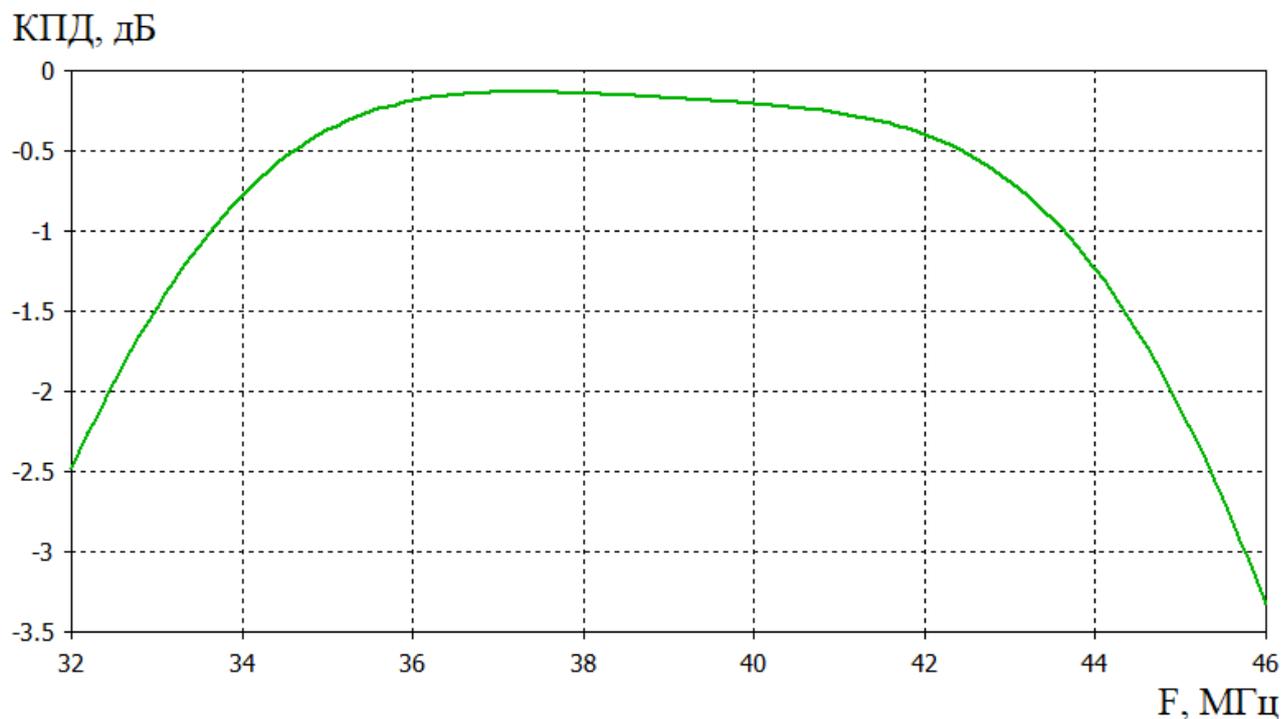


Рис. 2.21. Частотная зависимость коэффициента полезного действия тонкого монополя (идеально проводящая и бесконечно протяженная подстилающая поверхность)

На рис. 2.22 приведено фото изготовленного макета тонкого монополя с шунтовым способом питания и внутренней заземленной опорой.

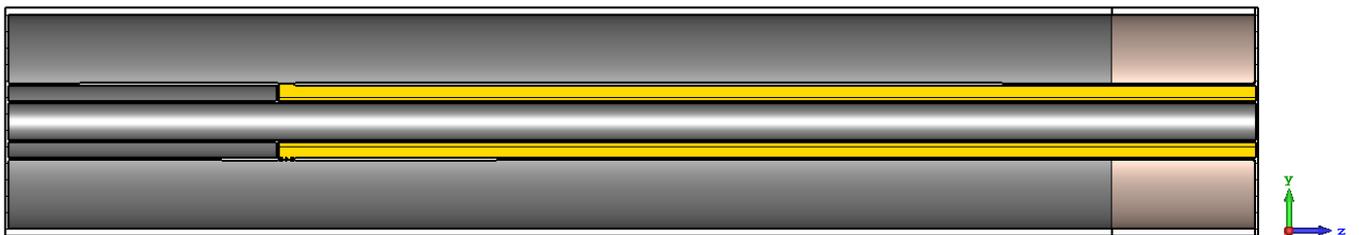


Рис. 2.22. Фото макета тонкого монополя с шунтовым способом питания

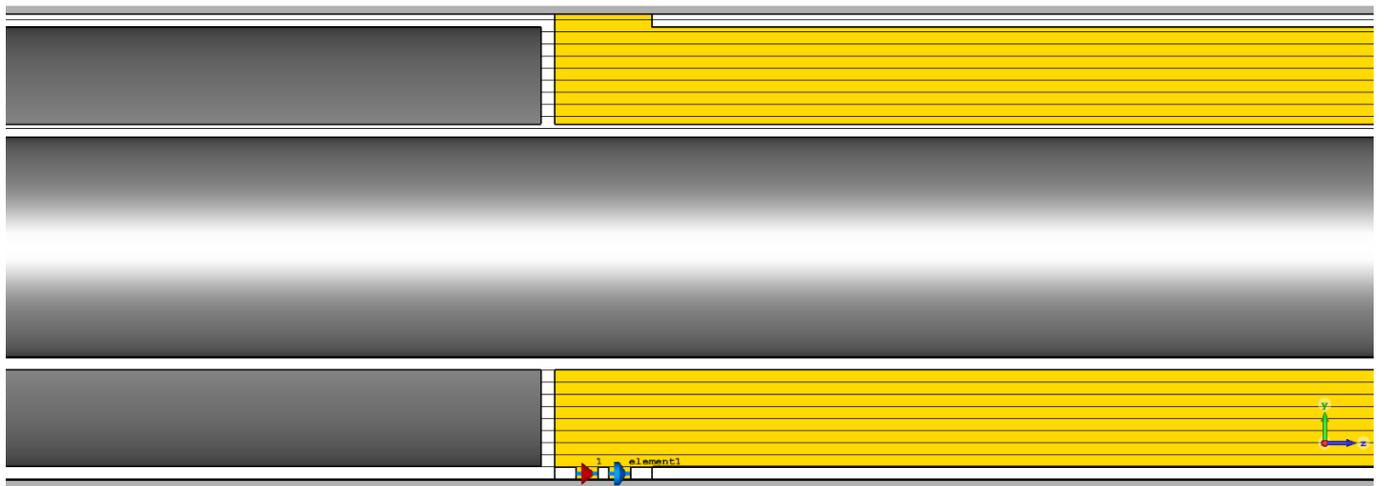
Для имитации железобетонного основания антенны на земле была расстелена металлическая сетка с размерами $3 \times 3 \text{ м}^2$. Размер ячейки сетки составлял $50 \times 50 \text{ мм}^2$. Поверх сетки были положены четыре противовеса длиной по 2 м каждый. После измерения уровня сигнала на выходе анализируемой антенны, на ту же самую подстилающую поверхность устанавливался четвертьволновый штырь с шунтовым способом запитки, используемый в качестве эталонной антенны, и измерения повторялись. Проведенные измерения показали, что в окрестности частоты резонанса исследуемая и эталонная антенны имеют близкие значения коэффициента усиления, различия между которыми не превышают 1 дБ.

Описанная выше конструкция антенны (рис. 2.17, 2.22) была взята за основу при разработке антенны с верхней запиткой и внешней заземленной опорой, рис. 2.23. Был добавлен внешний стальной цилиндр с высотой 1535 мм и внешним диаметром 320 мм. Монополь, показанный на рис. 2.17, 2.22, а также внешний стальной цилиндр соединены в точках опоры на подстилающую поверхность. К верхней поверхности внутреннего монополя присоединена стальная пластина в виде круга с диаметром 320 мм. Зазор между данной пластиной и внешним стальным цилиндром заполняется

диэлектриком. В ходе натурных экспериментов с облегченным макетом в качестве диэлектрика использовался фторопласт-4; в условиях реальной эксплуатации должен использоваться композитный материал, аттестованный для применения в антенных устройствах, которые сохраняют работоспособность при мощных механических воздействиях. Расчетные входные характеристики антенны для случая идеально проводящей и бесконечно протяженной земли приведены на рис. 2.24, 2.25; частотная зависимость коэффициента полезного действия приведена на рис. 2.26.



а)



б)

Рис. 2.23. Конструкция макета монополя с верхней запиткой и внешней заземленной опорой: а) – общий продольный разрез; б) – разрез в точках запитки внутреннего монополя, точки подключения трансформатора с коэффициентом трансформации сопротивления 1:16 и сосредоточенной индуктивности 0.066 мкГн

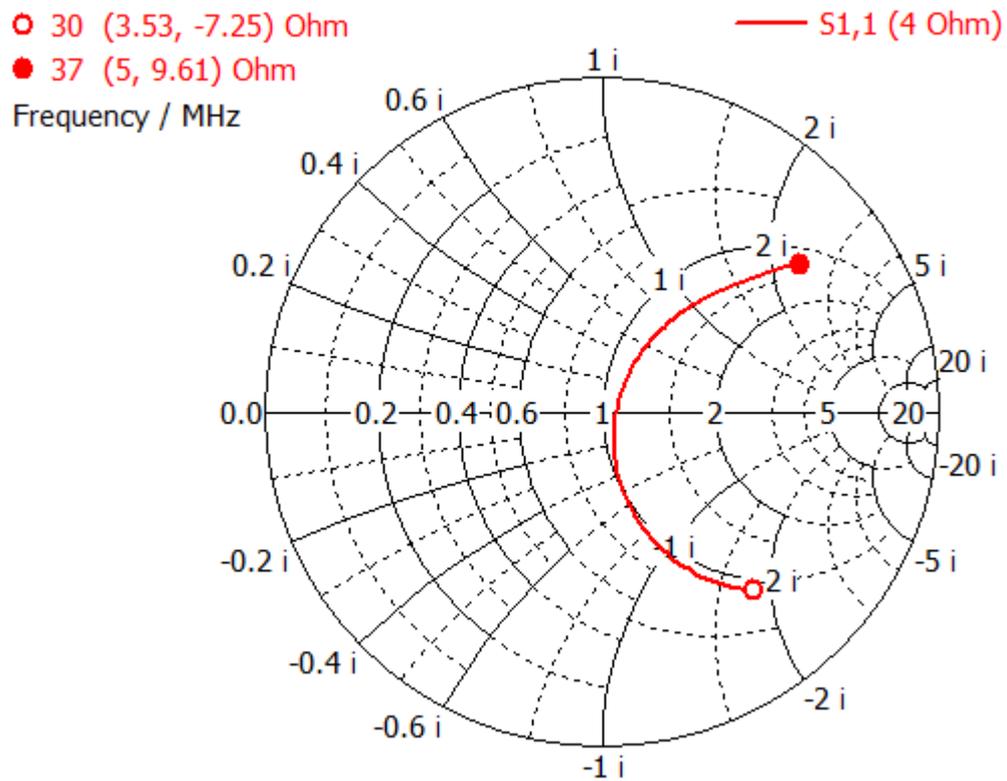


Рис. 2.24. Номограмма Вольперта-Смита монополя с верхней запиткой и внешней заземленной опорой при волновом сопротивлении фидера 4 Ом

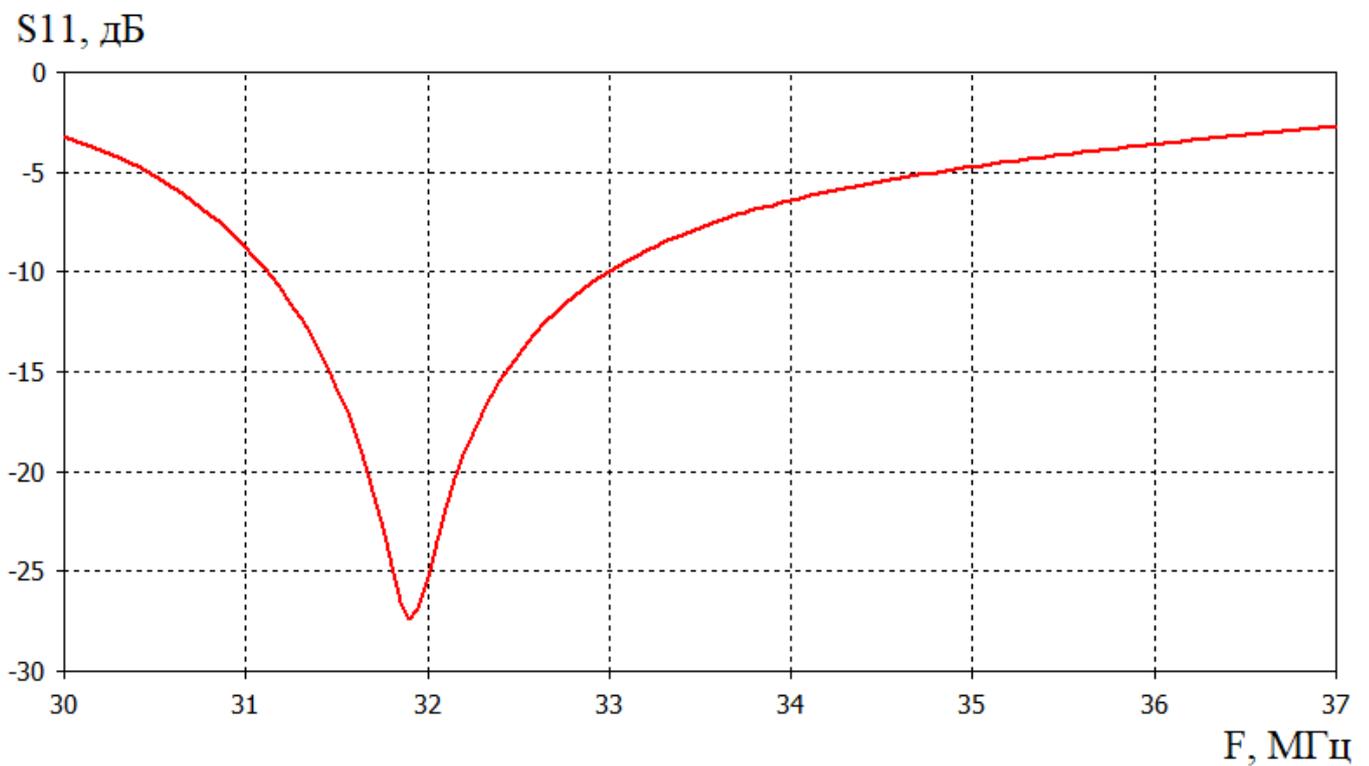


Рис. 2.25. Коэффициент отражения от входа монополя с верхней запиткой и внешней заземленной опорой при волновом сопротивлении фидера 4 Ом

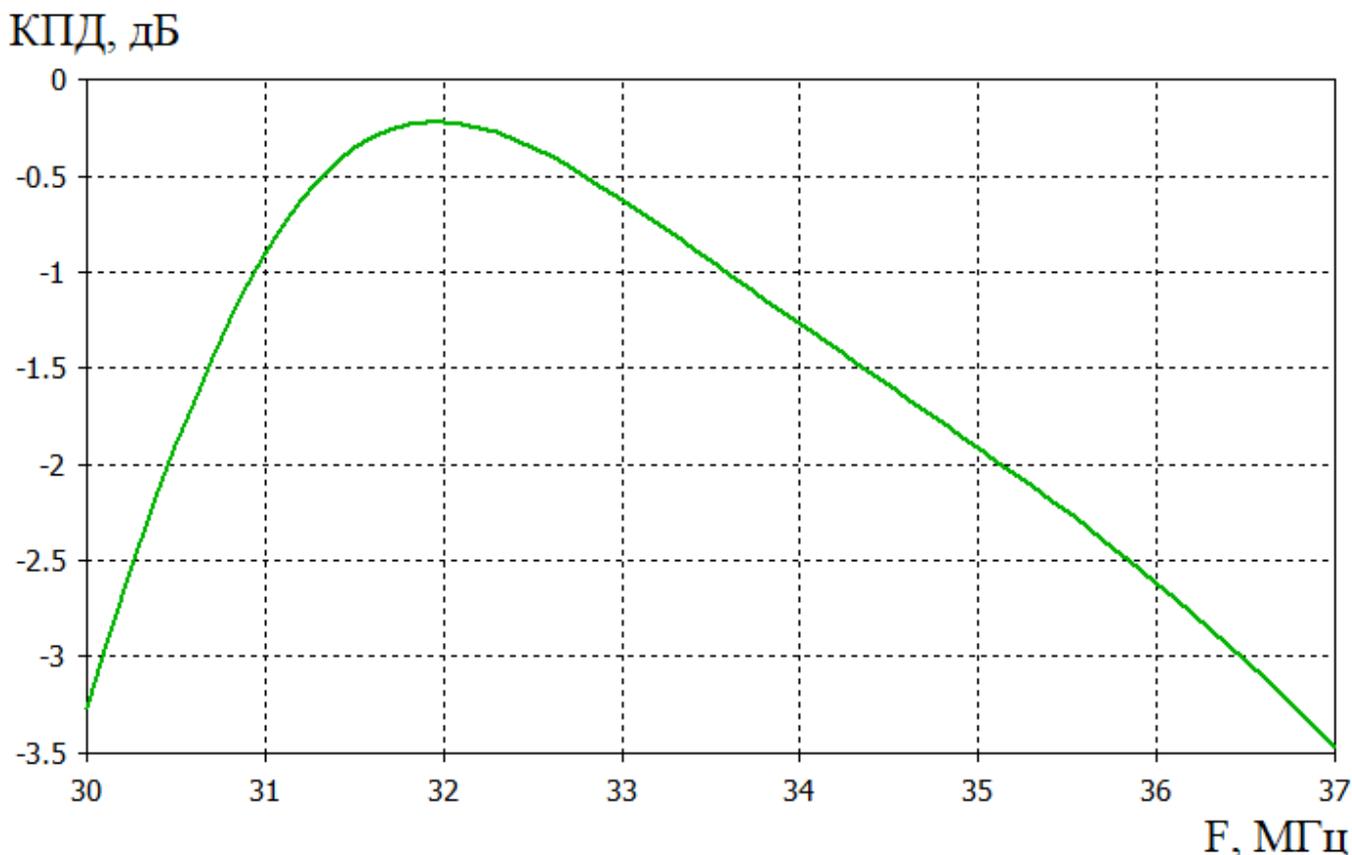


Рис. 2.26. Частотная зависимость коэффициента полезного действия монополя с верхней запиткой и внешней заземленной опорой (идеально проводящая и бесконечно протяженная подстилающая поверхность)

Были изготовлены макет монополя с верхней запиткой и внешней заземленной опорой (рис. 2.27), а также – четвертьволновый вибратор с шунтовой запиткой, настроенный на частоту 32 МГц. В качестве подстилающей поверхности использовалась металлическая сетка с размерами $3 \times 3 \text{ м}^2$ и размером ячейки $50 \times 50 \text{ мм}^2$. Поверх сетки были положены четыре противовеса длиной по 2 м каждый.

На рис. 2.28 показаны результаты натурных измерений антенны в полевых условиях, проводимых методом замещения антенны на четвертьволновый вибратор с шунтовой запиткой, в качестве подстилающей поверхности которого использовалась та же самая металлическая сетка и четыре проволочные противовеса, что и при измерении напряжения на выходе анализируемого антенного устройства.



Рис. 2.27. Макет монополя с верхней запиткой и внешней заземленной опорой

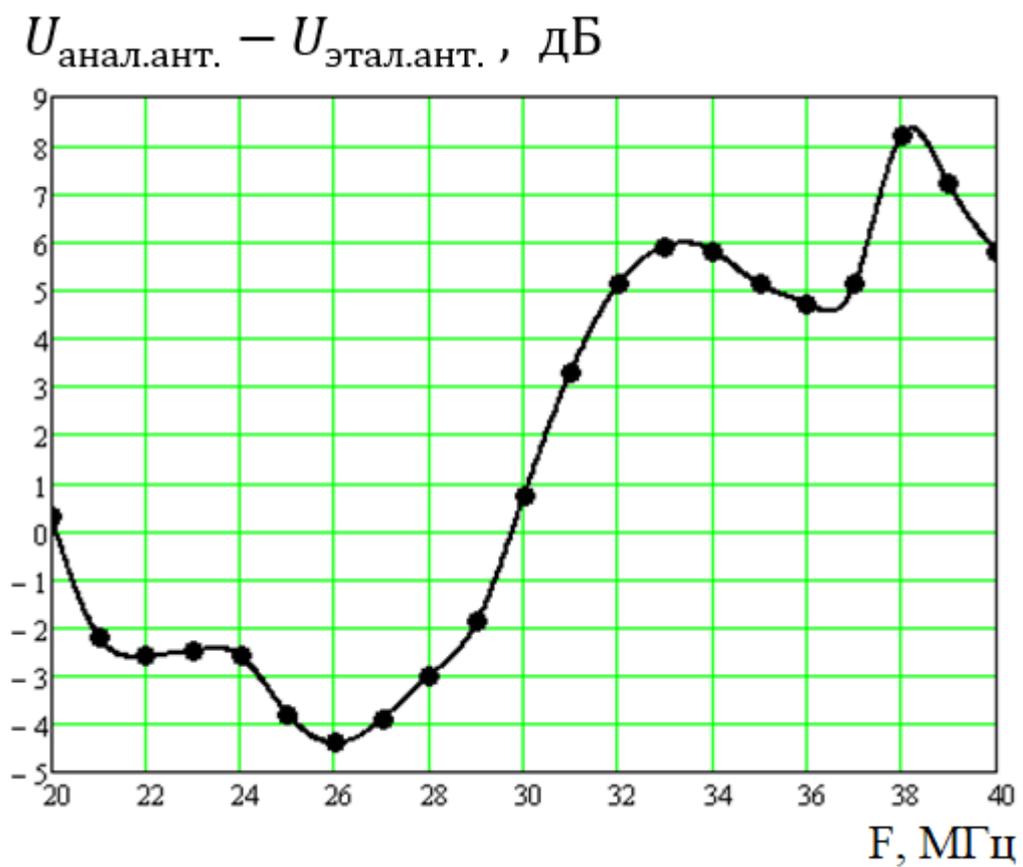


Рис. 2.28. Частотная зависимость разницы напряжений на выходах анализируемой антенны (рис. 2.27) и измерительной антенны (четвертьволнового вибратора, настроенного на частоту 32 МГц) при использовании одной и той же подстилающей поверхности

На частотах от 30 до 40 МГц монополь с верхней запиткой и внешней заземленной опорой существенно выигрывает по коэффициенту усиления у четвертьволнового вибратора с шунтовой запиткой, рис. 2.28. Данный результат согласуется с результатами исследований вибраторных антенн с верхними точками запитки, проводимыми еще Г.З. Айзенбергом и его коллегами [3, 4], и объясняется более равномерным распределением тока по плечу вибратора, чем у несимметричного вибратора с нижними точками запитки, а также – расположением области с максимальным значением напряженности электрического поля (зазора между верхней круглой пластиной и внешним цилиндром) дальше от грунта, чем у измерительной антенны с нижними точками запитки.

Показано, что монополь с верхними точками запитки особенно выгодно использовать, с точки зрения выигрыша в значениях коэффициента усиления, за счет увеличения значений коэффициента полезного действия (по сравнению с несимметричным вибратором с нижними точками запитки) при размерах подстилающей поверхности, меньших половины длины волны.

Сформулируем основные этапы методики 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:

1. Построение физической модели монополя, размещенного над бесконечно проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхностью.
2. Выбор оптимальных параметров сетки для численного анализа, проверка сходимости результатов анализа характеристик антенны при изменении числа ячеек.
3. Параметрический синтез антенного устройства для бесконечно проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности.
4. Исследование влияния погрешностей изготовления деталей антенны, а также – влияния вариации параметров диэлектриков, на ее характеристики с целью определения величины допусков.

5. Исследование влияния конечности сеточной подстилающей поверхности на основные характеристики антенны, выбор размеров металлической сетки, обеспечивающий допустимую чувствительность параметров антенны к изменению материальных параметров грунта.

6. Коррекция геометрии антенны с учетом конечных размеров металлической сетки и диапазона вариации проводимости и диэлектрической проницаемости грунта.

7. Изготовление и натурные испытания макета антенного устройства, при необходимости – верификация его физико-математической модели.

В заключение отметим, что в настоящем подразделе 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.

2.3. Методика проектирования электрически малых антенн УКВ диапазона в виде двухзаходной плоской Архимедовской спирали с плечами переменной ширины

Основополагающей идеей использования двухзаходной плоской Архимедовской спирали с плечами переменной ширины в качестве электрически малой антенны УКВ диапазона является гипотеза о перспективности сочетания нижеперечисленных свойств антенного устройства для уменьшения влияния материальных параметров грунта на его характеристики (минимизации изменения величины входного сопротивления и значения коэффициента полезного действия, стабильности формы и параметров диаграммы направленности):

1) – плечи спирали изолированы по постоянному току от стальной опорной стойки, что позволяет уменьшить величину токов, протекающих по опорной стойке, подстилающей поверхности, и в грунте, а, следовательно – уменьшить величину потерь мощности в грунте;

2) – значительная величина емкости между плечами спирали способствует концентрации силовых линий электрического поля в непосредственной близости от спирали, благодаря чему существенная доля энергии электрического поля, главным образом – реактивного поля, сосредоточена в окрестности излучателя, и является, как бы «отжатой» от подстилающей поверхности, что способствует уменьшению потерь в грунте;

3) – спиральная форма плеч вибратора создает соленоидальное магнитное поле, при этом отношение энергии электрической компоненты поля, запасенной в непосредственной близости излучателя, к энергии магнитной компоненты поля, уменьшается, что также благоприятствует снижению потерь в грунте, т.к. в подстилающей поверхности преобладают потери электрического характера.

На рис. 2.29 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 – такие же, как и в подразделе 2.1. Высота вибратора составляла 304 мм, период спирали – 23 мм, длина каждого из его плечей - 2610 мм.

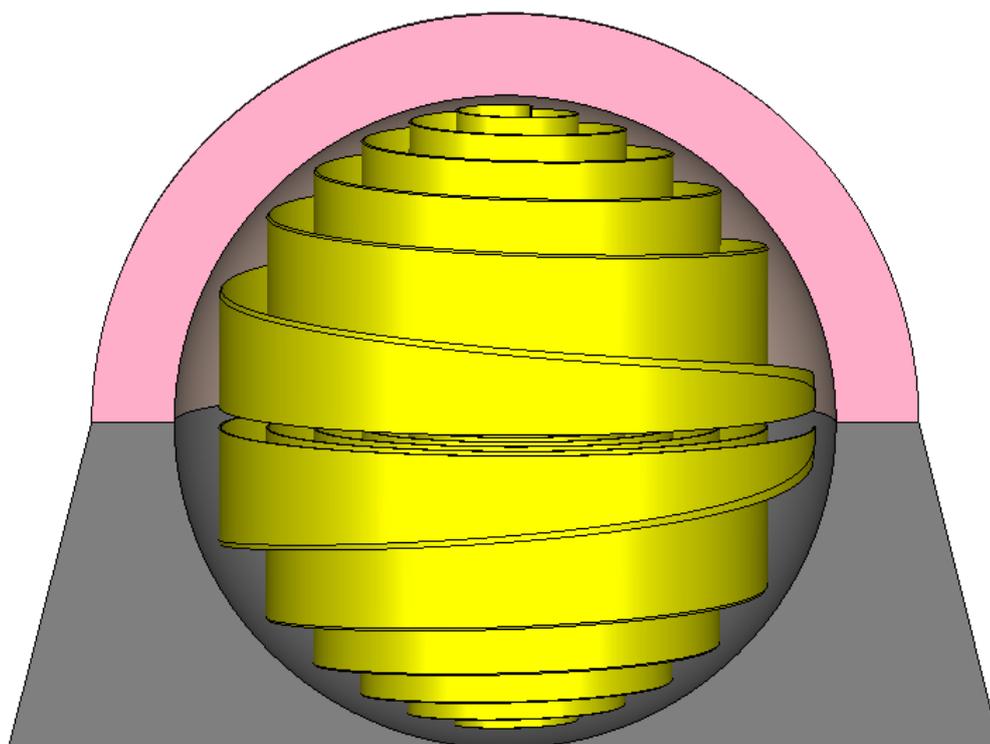


Рис. 2.29. Модель вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда

Проведенный численный анализ показал, что, в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности, центральная рабочая частота антенного устройства 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. Входные характеристики вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда приведены на рис. 2.30, 2.31. Расчетная величина суммарных потерь в антенне в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности составляет около 0.9 дБ, рис. 2.32.

При расположении конуса на стальном основании размерами $5 \times 5 \text{ м}^2$ и параметрах грунта $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$ значение КПД равно $\eta_{\Sigma} = -3.3 \text{ дБ}$, рис. 2.33. В случае, если конус установлен непосредственно на грунте, КПД антенны уменьшается до $\eta_{\Sigma} = -9.1 \text{ дБ}$, рис. 2.34.

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 $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ 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 вибратора изменяется приблизительно в 6 раз при засыпке его слоем грунта толщиной 0.8 м, что требует использования АСУ.

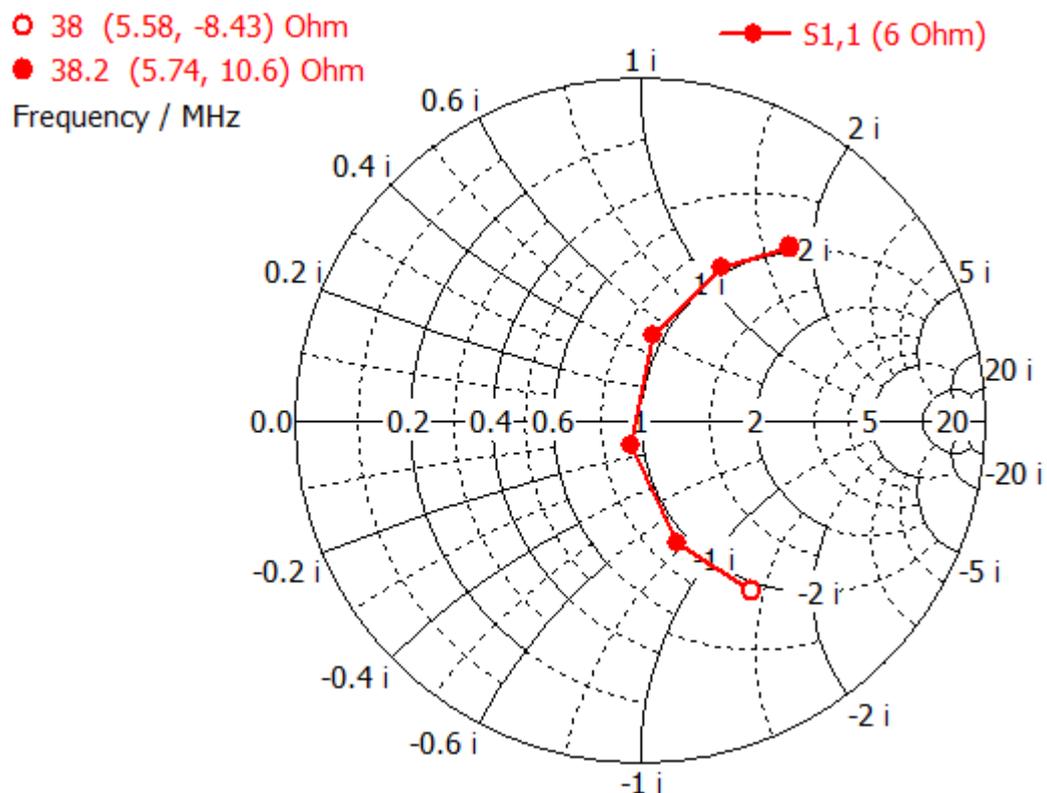


Рис. 2.30. Номограмма Вольперта-Смита вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности при волновом сопротивлении фидера 6 Ом

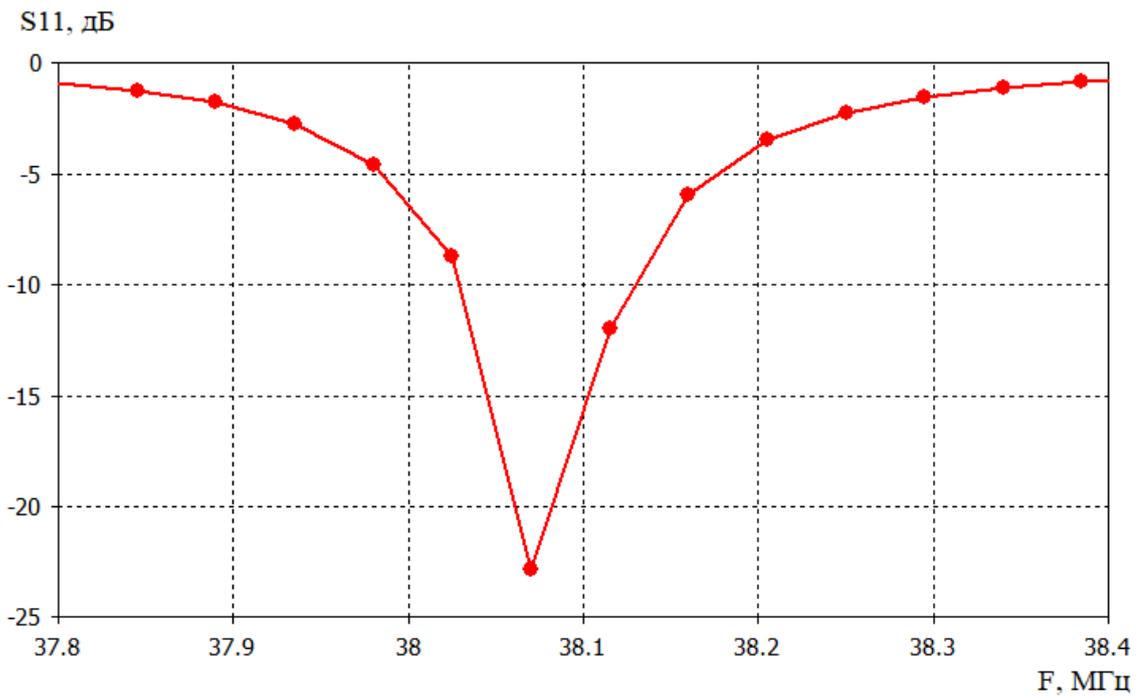


Рис. 2.31. Коэффициент отражения от входа вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности при волновом сопротивлении фидера 6 Ом

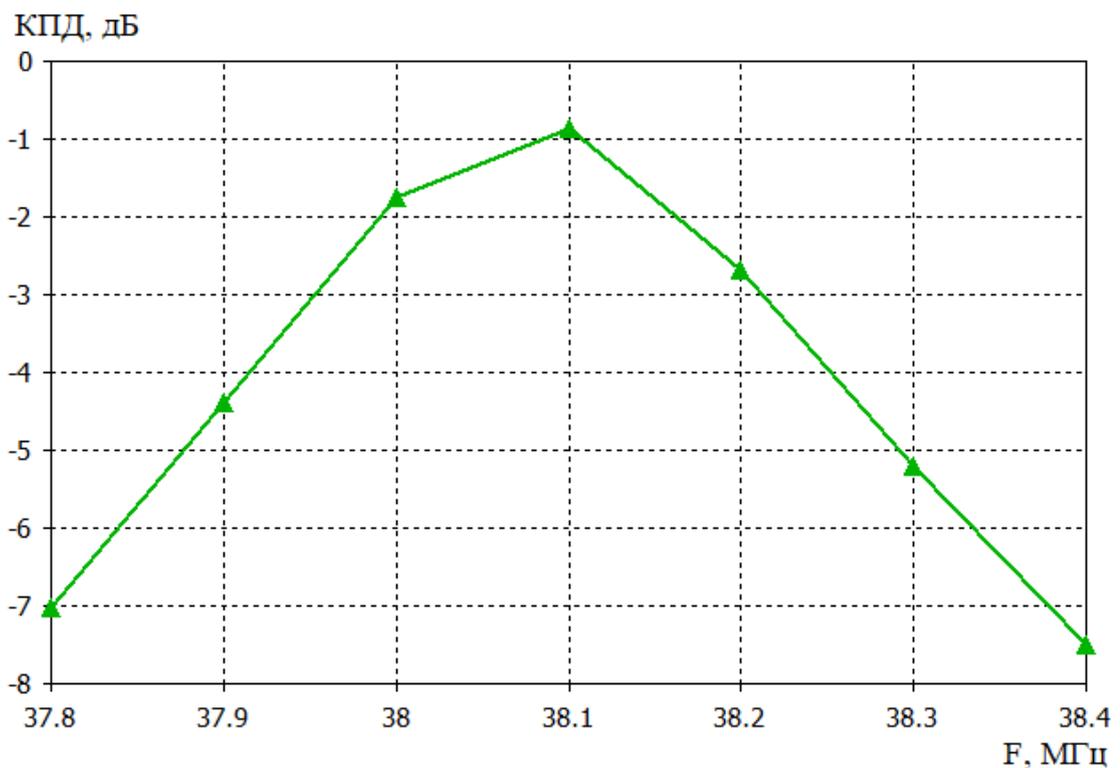


Рис. 2.32. Коэффициент полезного действия вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

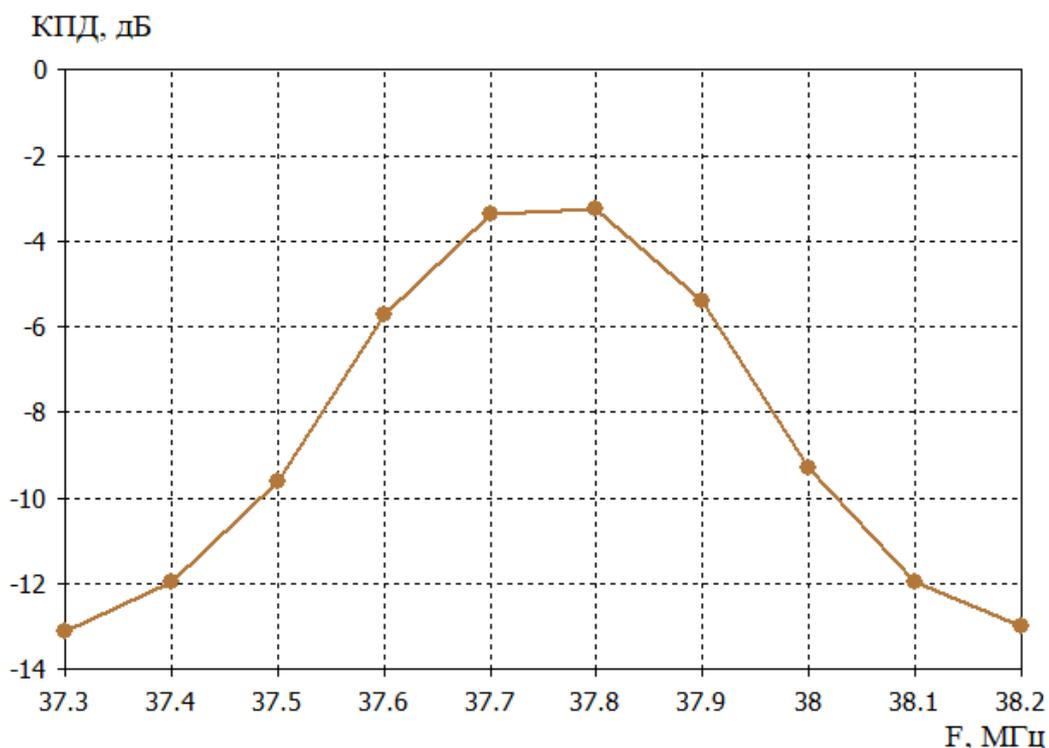


Рис. 2.33. Коэффициент полезного действия вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда в случае расположения конуса на стальном основании с размерами $5 \times 5 \text{ м}^2$ и параметрах грунта $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$

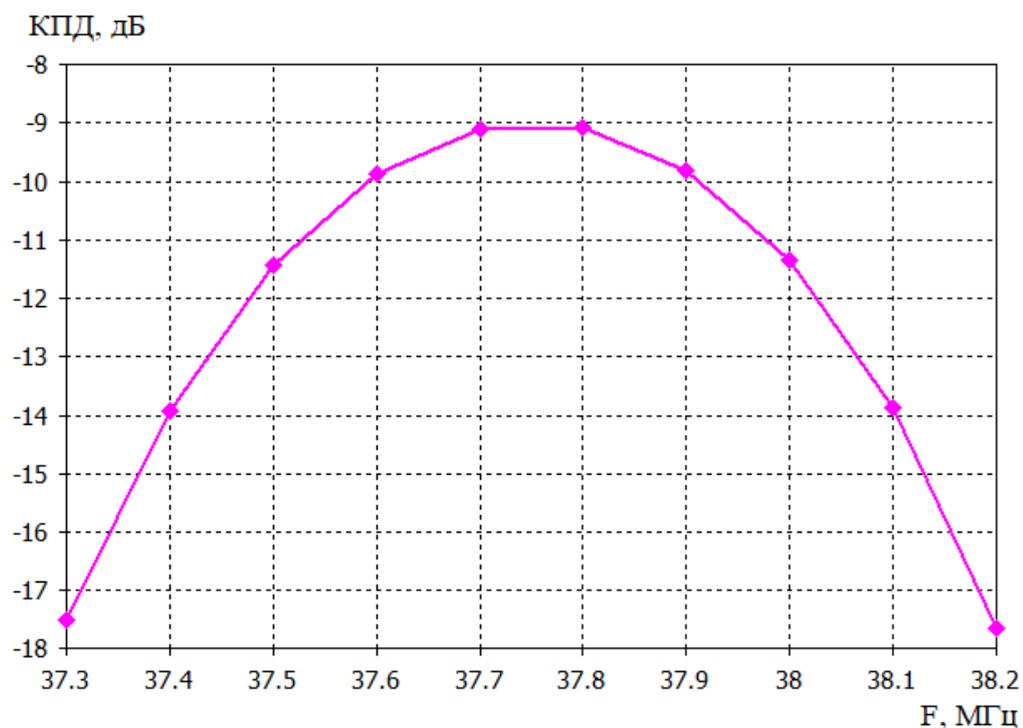


Рис. 2.34. Коэффициент полезного действия вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда в случае расположения конуса непосредственно на грунте с параметрами $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$

Была разработана эскизная конструкторская документация для изготовления макета вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда, установленного в полости на вершине усеченного металлического конуса. На рис. 2.35 показан каркас жесткости для размещения в нем спирали, изготовленный методом фрезировки из вспененного полистирола высокой плотности.

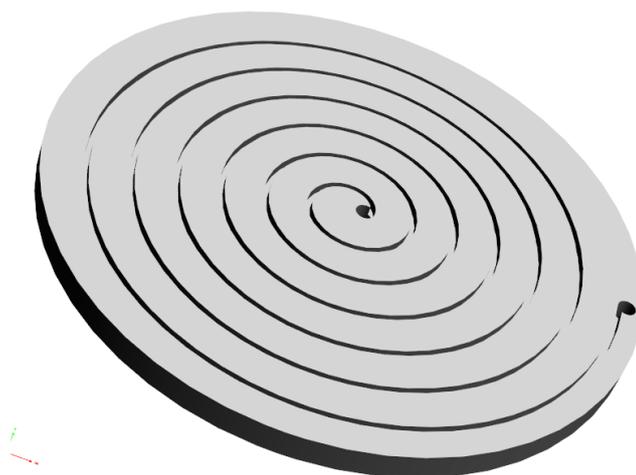


Рис. 2.35. Диэлектрический каркас для позиционирования плечей вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда

На рис. 2.36 показано фото вибратора, размещенного в диэлектрическом каркасе, и установленного в полусферической полости со стенками из медного листа. Макет антенны, размещенной под полистироловым обтекателем на вершине усеченного металлического конуса, показан на рис. 2.37.

Экспериментальные испытания макета антенны в полевых условиях показали, что частота резонанса вибратора составляет 32.6 МГц. При этом металлический конус был установлен на металлическую сетку с периодом 50 мм и размерами $3 \times 3 \text{ м}^2$.

При измерении коэффициента усиления антенны методом замещения, в качестве эталонной антенны использовался четвертьволновый несимметричный вибратор с шунтовым питанием, в качестве подстилающей поверхности которого использовалась та же самая металлическая сетка. Было установлено, что коэффициенты усиления эталонной и анализируемой антенн приблизительно одинаковы, находятся в пределах погрешности измерения порядка нескольких десятых долей децибела.

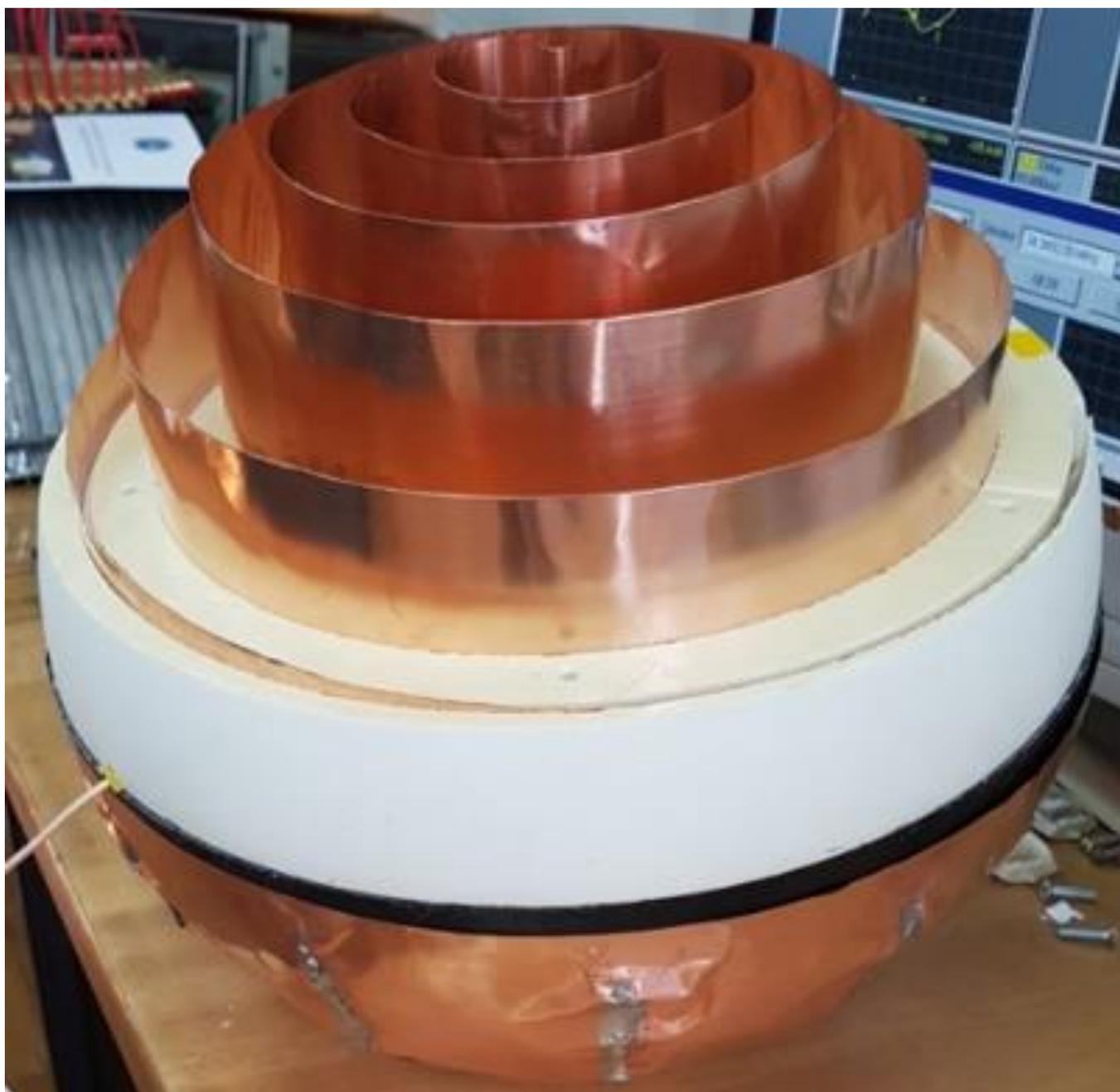


Рис. 2.36. Фото макета вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда

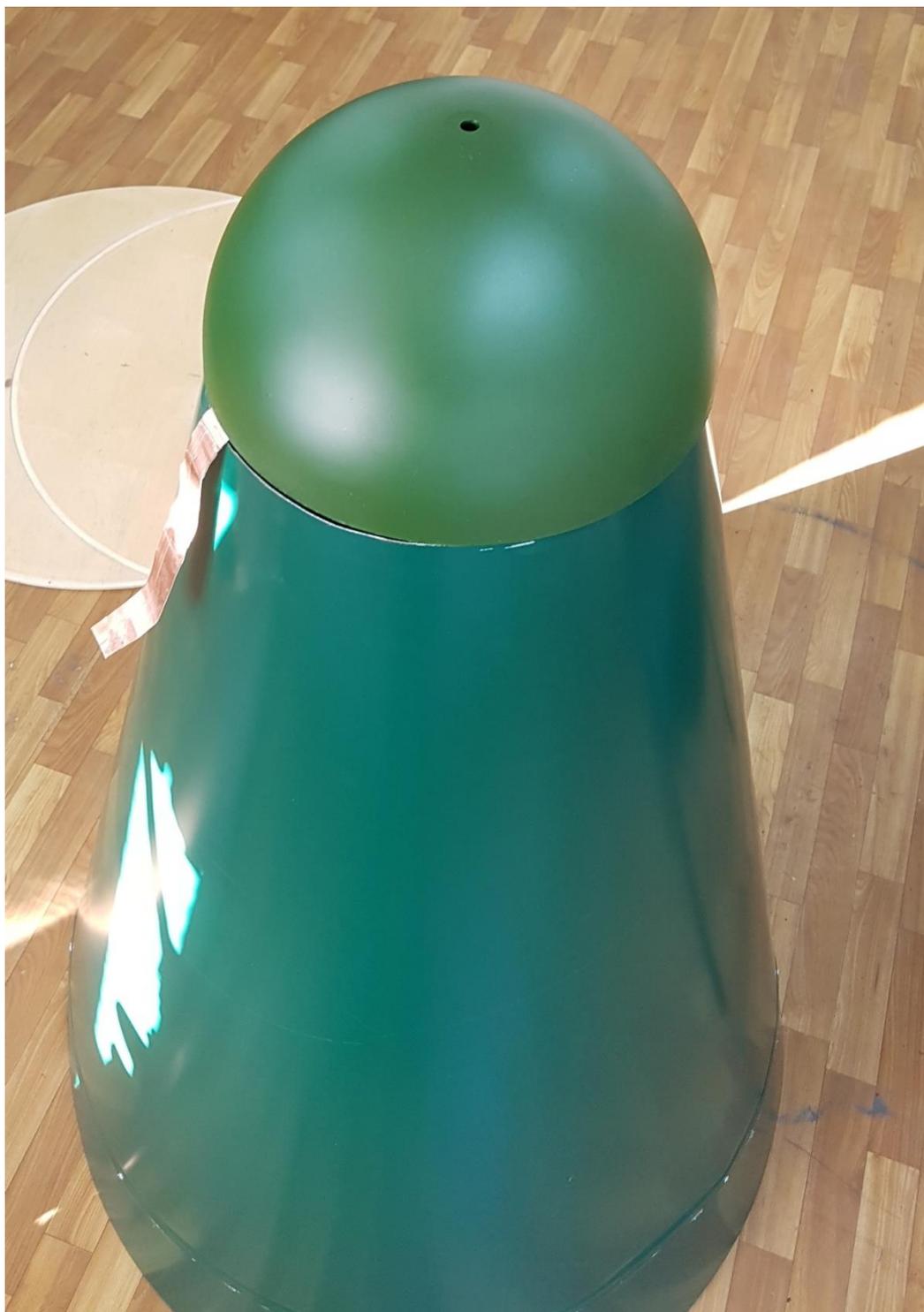


Рис. 2.37. Фото макета вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда, размещенного под полистироловым обтекателем на вершине усеченного металлического конуса

2.4. Методика проектирования модификации вибратора Пистолькорса в виде трехзаходной спирали, размещенной на боковой поверхности цилиндра

Принципы, положенные в основу построения электрически малой антенны в виде многозаходной (в частности – трехзаходной) спирали, плечи которой расположены на боковой поверхности цилиндра и замкнуты на кольца, лежащие по периметрам нижнего и верхнего оснований цилиндра, сходны с принципами построения вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда. Варианты данной антенны характеризуются коротким замыканием их входа по постоянному току и, по сути, являются разновидностью петлевого вибратора Пистолькорса [3, 4]. Их отличиями от классических вариантов вибратора Пистолькорса [3, 4] являются: спиральная форма плечей; количество плечей может быть большим двух; у вибратора имеется продольный магнитный момент, являющийся следствием протекания токов по его плечам в форме цилиндрической спирали; высокая добротность, обусловленная малыми электрическими размерами антенного устройства.

Отличиями описываемых ниже модифицированных вибраторов Пистолькорса от вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда, вызывающими существенное изменение входных характеристик антенны, являются следующие:

- тонкопроволочные плечи спирали характеризуются существенно более высокими значениями волнового сопротивления эквивалентной линии передачи, в результате чего сопротивление излучения и входное сопротивление антенны на частоте резонанса существенно выше, что упрощает методику проектирования согласующего устройства;

- более высокая концентрация реактивного магнитного поля вблизи антенны, и, следовательно, - меньшая относительная доля энергии реактивного электрического поля в непосредственно близости от излучателя приводит к снижению потерь мощности в грунте, т.к. в нем преобладают потери электрического характера;

- плечи вибратора в форме цилиндрических спиралей являются излучателями, преимущественно, электрического типа (т.к. сопротивление излучения электрически малой рамки является существенно меньшим сопротивлением излучения

электрического вибратора сравнимого геометрического размера), поэтому излучатель имеет емкостный характер входного сопротивления на частотах ниже полуволнового резонанса и индуктивный характер – на частотах выше резонансной, в то время как два петлевых шунта каждого неразрывного плеча, наоборот, характеризуются индуктивным характером входного сопротивления на частотах ниже резонансной, и емкостным – на частотах выше резонансной, как короткозамкнутые отрезки двухпроводной линии длиной большей четверти длины волны, но меньшей – половины длины волны, в результате чего имеет место компенсация суммарной реактивной компоненты входного сопротивления, и антенна характеризуется большей шириной полосы рабочих частот по заданному качеству согласования с фидерной линией.

Были исследованы два варианта конструкции модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей: с противоположными направлениями намотки ветвей спирали в плечах (рис. 2.38, а) и с одинаковыми направлениями намотки (рис. 2.38, б).

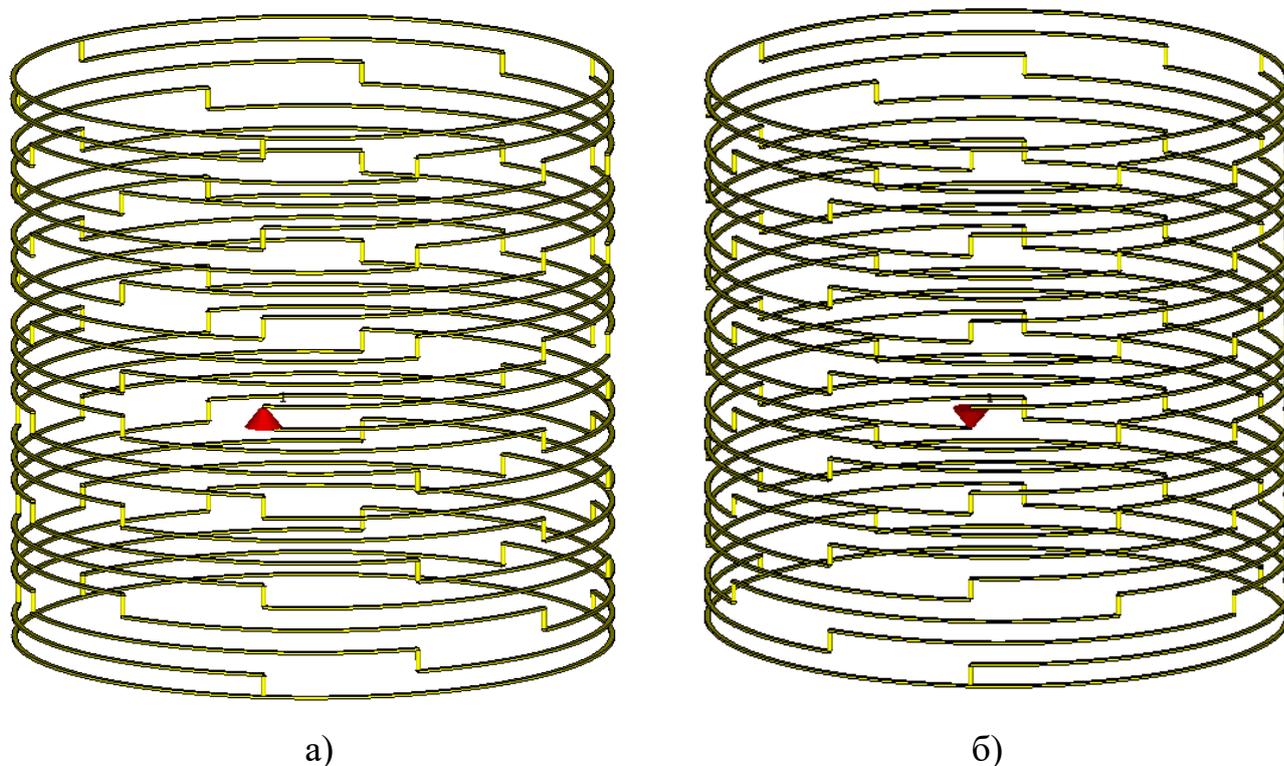


Рис. 2.38. Вибраторы Пистолькорса в виде трехзаходной спирали, размещенной на боковой поверхности цилиндра: а) - противоположные направления намотки ветвей спирали в плечах; б) - одинаковые направления намотки ветвей спирали в плечах

В ходе численного эксперимента было выяснено, что вариант с одинаковыми направлениями намотки ветвей спирали обладает существенно более широкой полосой рабочих частот по согласованию с фидерной линией; при этом величина входного сопротивления антенны примерно в 2 раза больше, чем в случае противоположных направлений намотки ветвей спирали. Нижние плечи вибратора располагались в полости, с глубиной 113 мм и диаметром 238 мм, внутри цилиндра с внешним диаметром 260 мм и высотой 1200 мм; полная высота вибратора составляла 297 мм, внешний диаметр вибратора – 216 мм; в идеальном случае поверхность считалась идеально проводящей и бесконечно протяженной, рис. 2.39. Входные характеристики антенны и частотная зависимость ее КПД показаны на рис. 2.40-2.42.

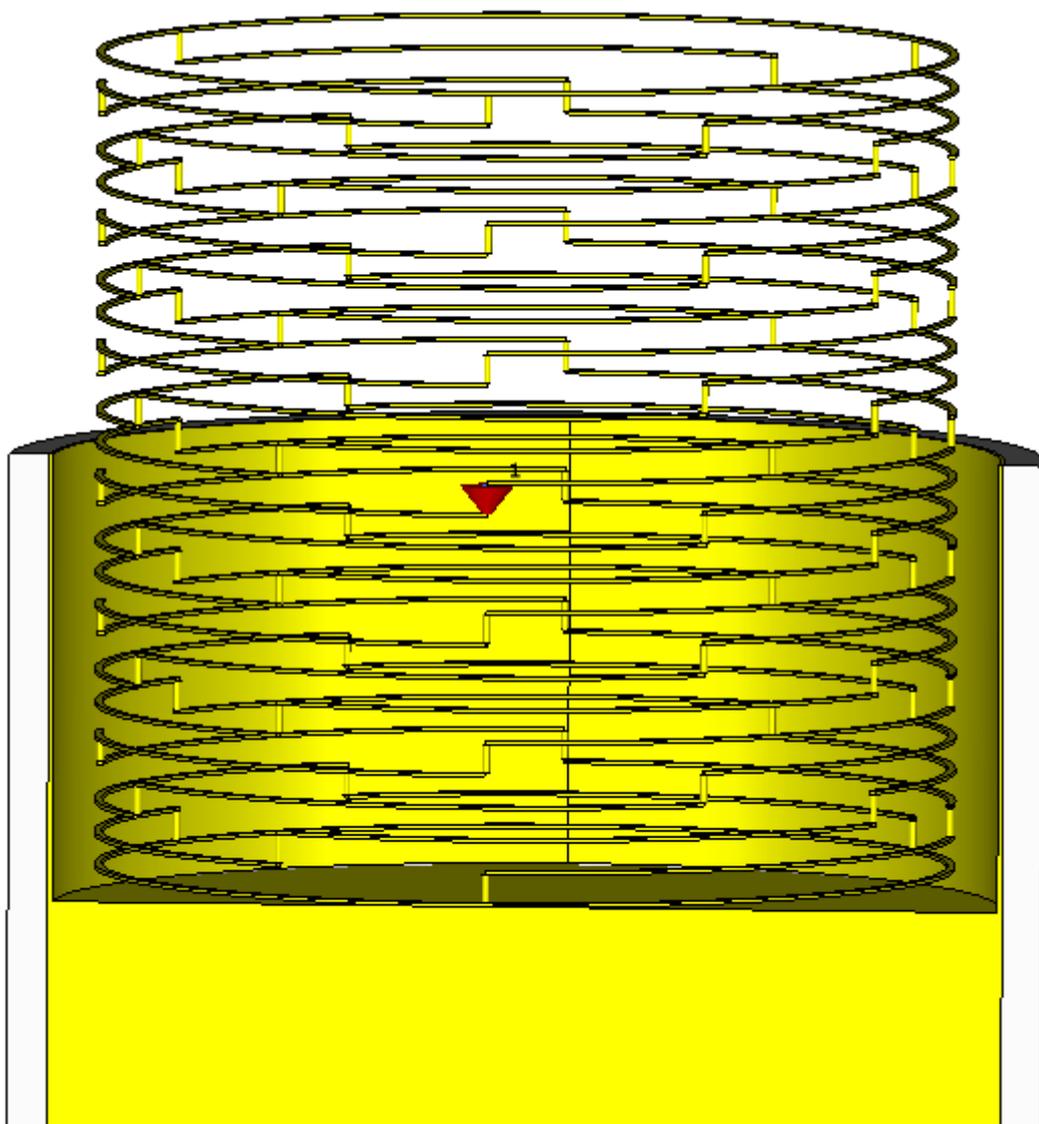


Рис. 2.39. Расположение вибратора в полости на вершине опорной стойки

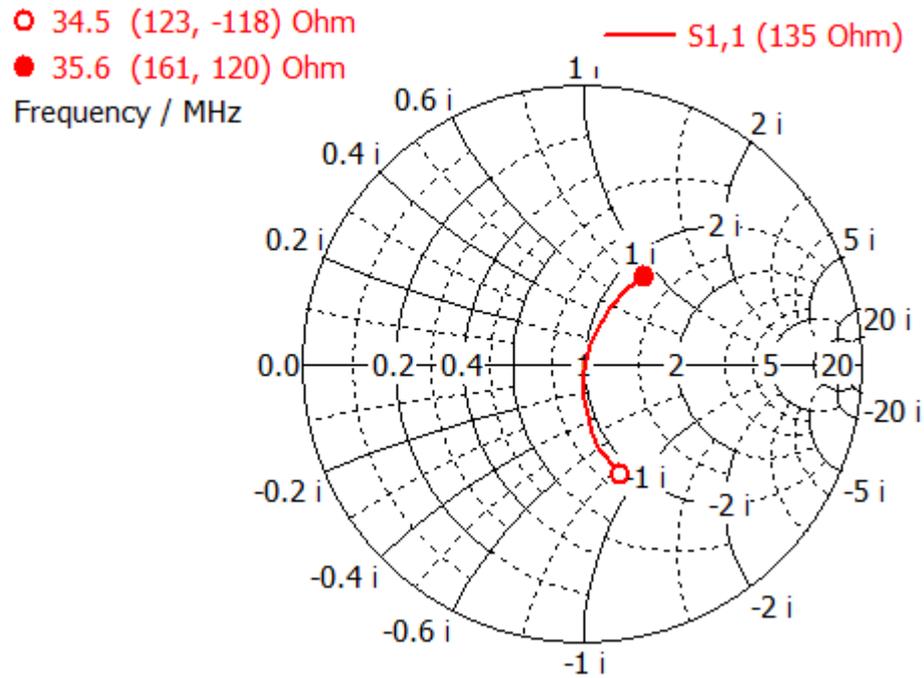


Рис. 2.40. Номограмма Вольперта-Смита модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

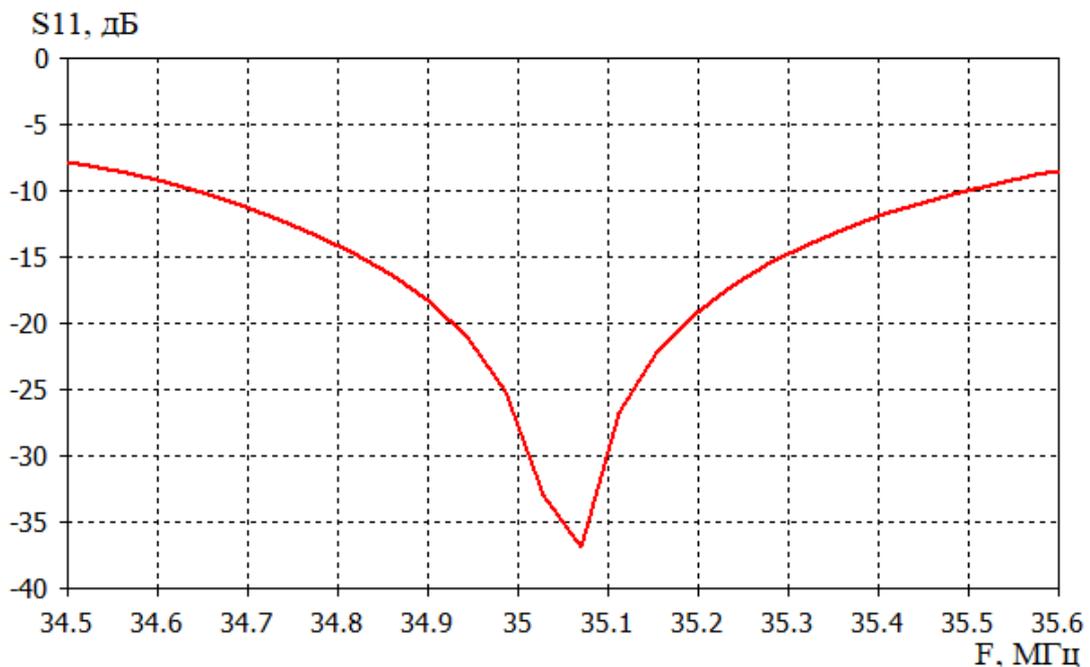


Рис. 2.41. Коэффициент отражения от входа модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

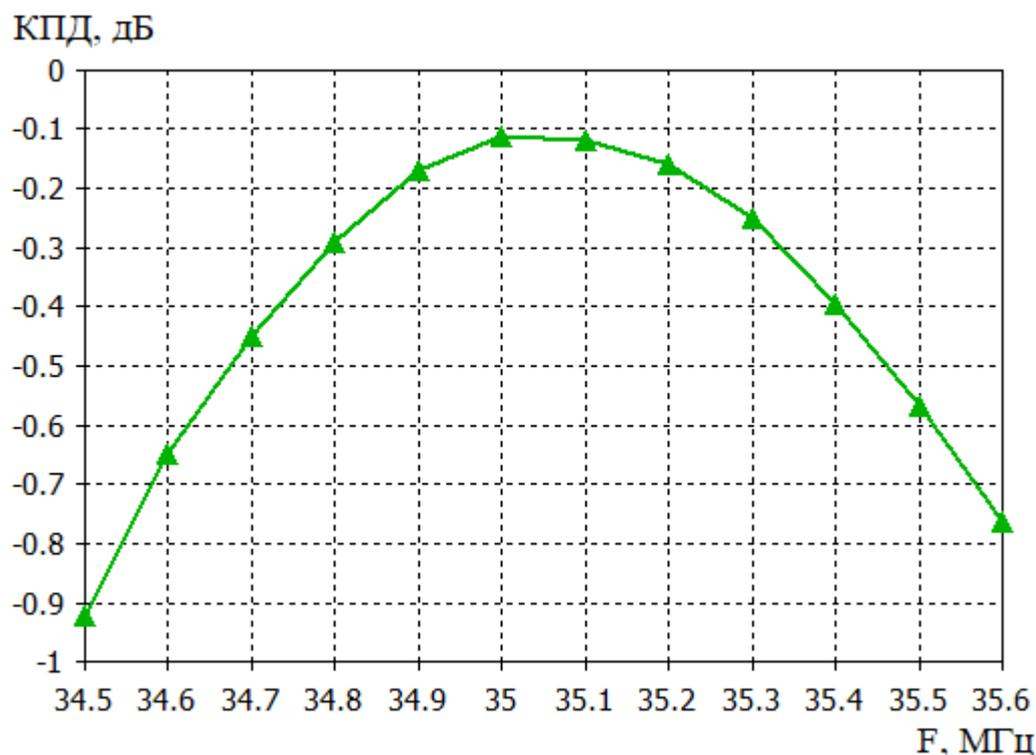


Рис. 2.42. Коэффициент полезного действия модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

Для оценки влияния конечности размеров хорошо проводящей подстилающей поверхности на характеристики антенны был проведен следующий численный эксперимент. Антенное устройство располагалось на стальном основании диаметром 3 м, установленном на грунте с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 5$ и проводимостью $\sigma = 0.005$ См/м, рис. 2.43. Входное сопротивление практически не изменилось (рис. 2.44, 2.45), а значение КПД уменьшилось на 5 дБ (рис. 2.46), по сравнению со случаем идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности.

Был изготовлен макет вибратора с плечами в виде трех цилиндрических спиралей, замкнутых на верхнее и нижнее основания, рис. 2.47.

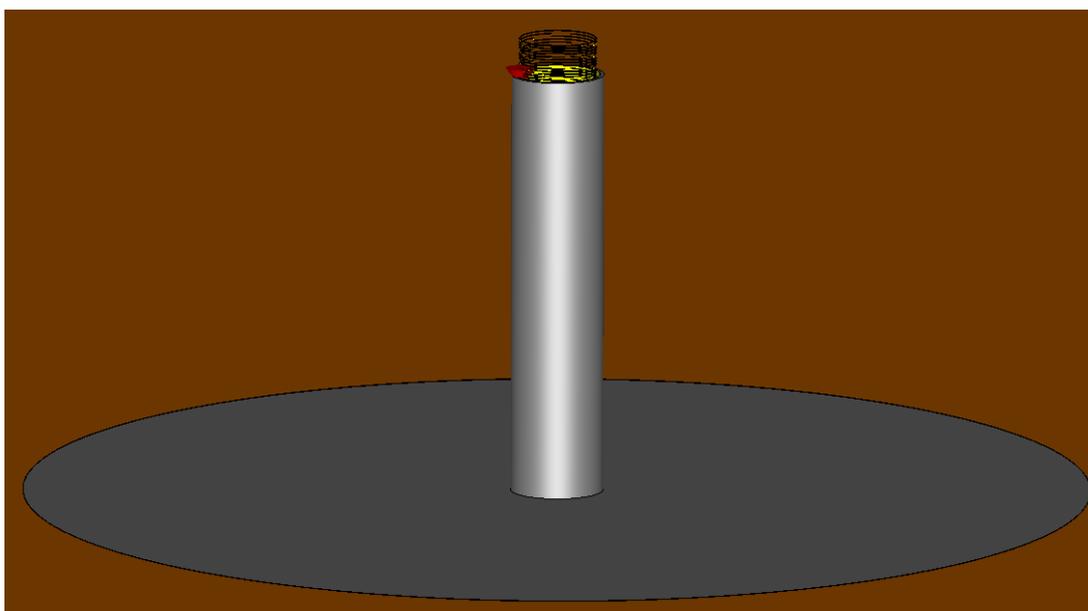


Рис. 2.43. Модель вибратора на стойке с конечной хорошо проводящей поверхностью, установленной на грунте с параметрами $\epsilon_r = 5$ и $\sigma = 0.005$ См/м

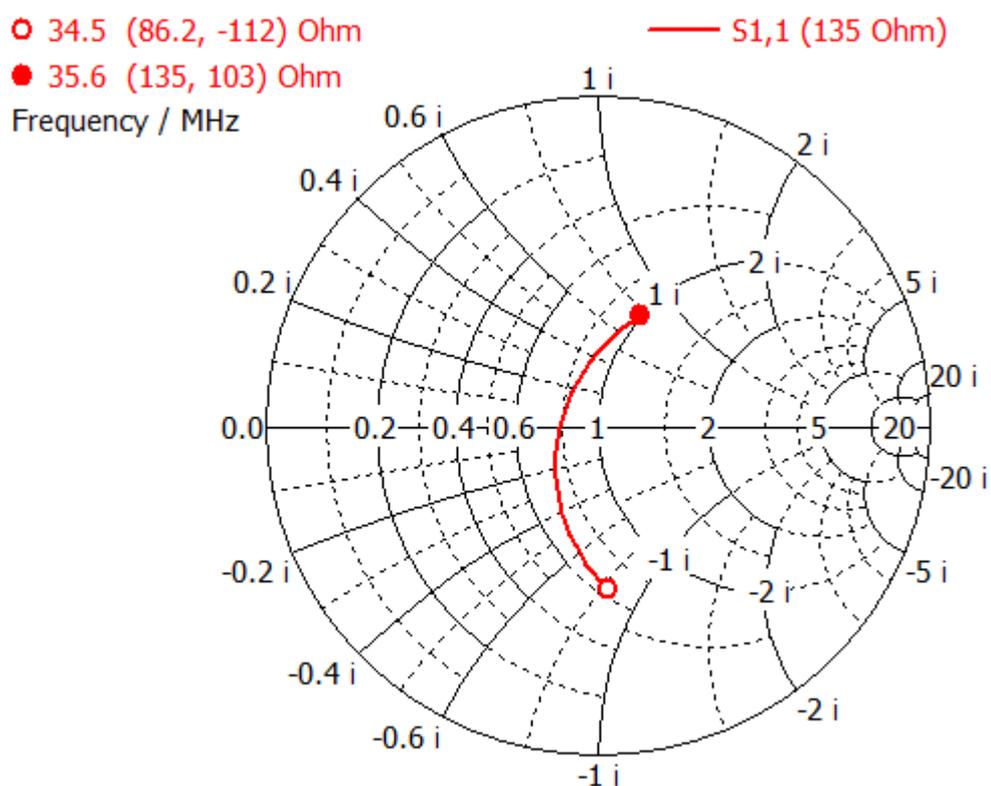


Рис. 2.44. Номограмма Вольперта-Смита модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Подстилающая поверхность – стальная плита диаметром 3 м и грунт с $\epsilon_r = 5$ и $\sigma = 0.005$ См/м

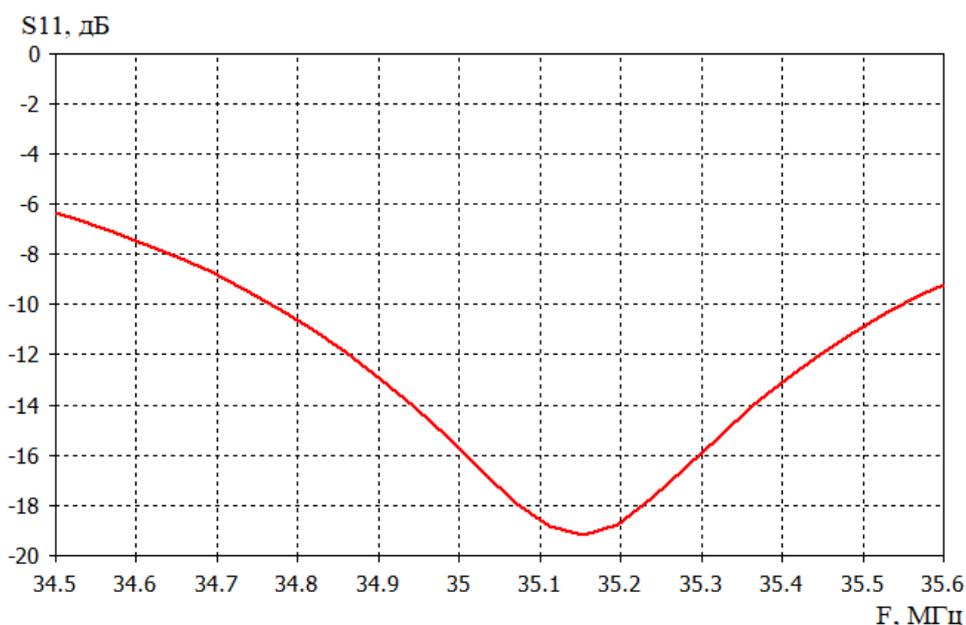


Рис. 2.45. Коэффициент отражения от входа модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Подстилающая поверхность – стальная плита диаметром 3 м и грунт с $\epsilon_r = 5$ и $\sigma = 0.005$ См/м

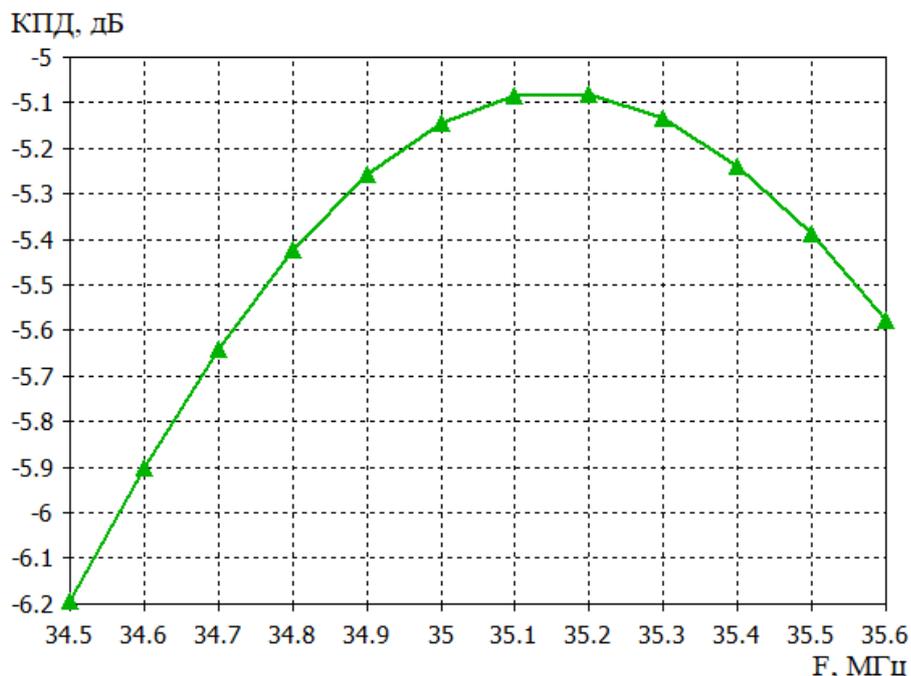


Рис. 2.46. Коэффициент полезного действия модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Подстилающая поверхность – стальная плита диаметром 3 м и грунт с $\epsilon_r = 5$ и $\sigma = 0.005$ См/м



а)



б)



в)

Рис. 2. 47. Макет вибратора Пистолькорса с цилиндрическими плечами: а) – нижняя половина вибратора помещена внутрь металлического цилиндра; б) – вибратор и цилиндр размещены на вершине металлического конуса высотой 1200 мм; в) – вибратор в кожухе из диэлектрика, установленный на подстилающую поверхность в виде стальной сетки, полная высота антенны – 700 мм относительно поверхности грунта

Исследования макета антенны показали, что использование каркаса из вспененного диэлектрика снижает значение резонансной частоты, относительно расчетного значения 35.1 МГц, приблизительно, до 27 МГц.

Измерение коэффициента усиления вибратора проводилось методом сравнения (методом замещения антенны) со стандартным четвертьволновым штырем, настроенным на частоту 27 МГц. В качестве передатчика использовался генератор с выходной мощностью 20 dBm, к выходу которого был подключен симметричный электрический вибратор. Для имитации железобетонного основания на земле была расстелена металлическая сетка с периодом 50 мм и размерами $3 \times 3 \text{ м}^2$.

Результаты измерений показали, что 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 той же металлической сетки, рис. 2.48.

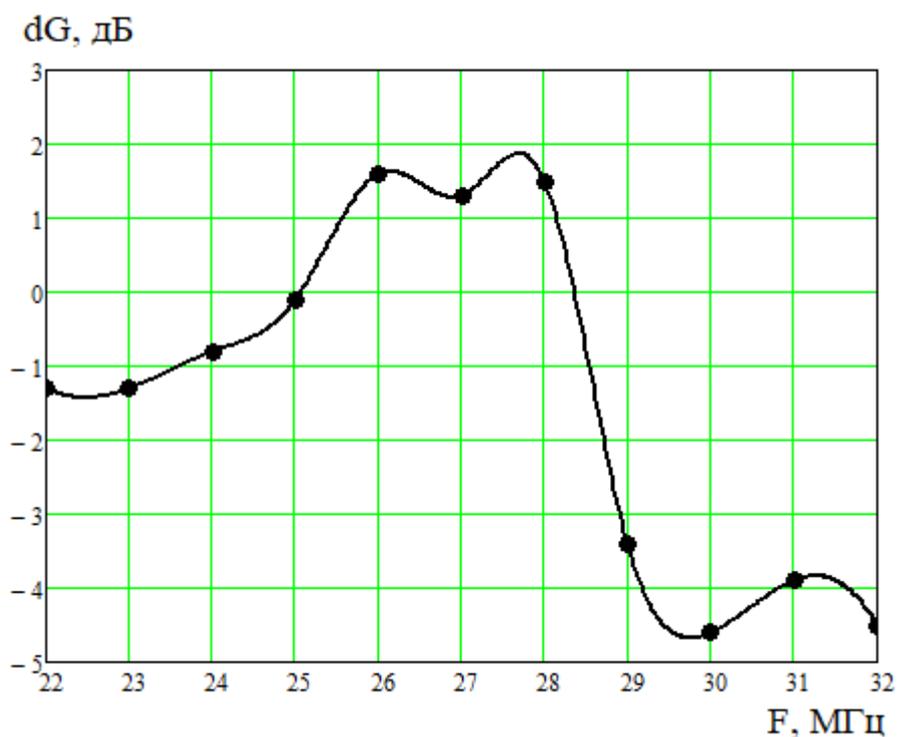


Рис. 2.48. Разница напряжений на выходе модифицированного вибратора Пистолькорса с тремя цилиндрическими спиральными плечами (рис. 2.47, в), и на выходе четвертьволнового штыря, настроенного на частоту 27 МГц

Перечислим основные этапы методики проектирования электрически малых антенн УКВ диапазона в виде двухзаходной плоской Архимедовской спирали с плечами переменной ширины, а также – многозаходных цилиндрических спиралей:

1. Построение физической модели спиральной антенны, размещенной над бесконечно проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхностью.

2. Выбор оптимальных параметров сетки для численного анализа, проводимого с использованием метода конечного интегрирования Вейланда, реализованного в пространственно-временной области, проверка сходимости результатов анализа характеристик антенны при изменении числа ячеек.

3. Расчет основных характеристик антенны с использованием метода конечного интегрирования Вейланда, реализованного в пространственно-частотной области; при необходимости – верификация сетки модели, построенной на решении системы уравнений Максвелла в пространственно-временной области.

4. Параметрический синтез антенны для случая бесконечно проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности.

5. Коррекция размеров спиральной антенны с учетом влияния диэлектрического обтекателя.

6. Исследование влияния погрешностей изготовления деталей антенны, а также – влияния вариации параметров диэлектриков, на ее характеристики с целью определения величины допусков.

7. Исследование влияния конечности сеточной подстилающей поверхности на основные характеристики антенны, выбор размеров металлической сетки, обеспечивающий допустимую чувствительность параметров антенны к изменению материальных параметров грунта.

8. Коррекция геометрии антенны с учетом конечных размеров металлической сетки и диапазона вариации проводимости и диэлектрической проницаемости грунта.

9. Изготовление и натурные испытания макета антенного устройства, при необходимости – верификация его физико-математической модели.

2.5. Методика проектирования многолучевых полноазимутальных антенн УКВ диапазона с диаграммообразующей системой на основе осесимметричной линзы из гранитного щебня

Для повышения энергетического потенциала систем управления, а также – для расширения их функциональных возможностей перспективным является применение в них многолучевых антенных систем с полноазимутальным диаграммоформированием. Данные антенные системы должны оставаться работоспособными при мощных механических воздействиях, что обуславливает соответствующие требования к их элементам, а также – к диаграммообразующей схеме.

Известно, что использование в подземных антенных системах гранитного щебня в качестве диэлектрика, изолирующего антенну от непосредственного соприкосновения с грунтом, с целью уменьшения потерь мощности в грунте, обусловлено рядом следующих преимуществе данного подхода:

- гранитный щебень незначительно впитывает влагу, вода проливается сквозь слой щебня, а затем отводится с помощью водоотводящих сооружений, чем обеспечивается относительная стабильность параметров диэлектрика, изолирующего антенную систему;

- при нахождении антенной системы вблизи источника мощного механического воздействия, использование гранитного щебня в качестве изолирующего материала позволяет существенно повысить ее устойчивость к сверхмощным механическим воздействиям, вследствие того, что частицы щебня взаимодействуют друг с другом, крошатся, поглощая при этом существенную долю энергии, что позволяет сохранить в целостности конструкцию антенной системы, состоящей из коаксиальных кабелей с оболочкой повышенной прочности;

- весьма полезным для ряда практических приложений являются свойства гранитного, а также – мраморного щебня, заключающиеся в значениях их эффективной относительной диэлектрической проницаемости, изменяющихся в пределах, приблизительно, от 2, до $3 \div 4$, в зависимости от объемного соотношения фракций.

Последнее свойство гранитного (а также - мраморного) щебня делает данный материал весьма удобным для его использования в качестве однородной линзы, которая может являться основой диаграммообразующей схемы многолучевой антенной системы полноазимутального диаграммообразования, в частности, в УКВ диапазоне частот. В качестве облучателей линзы могут использоваться антенные элементы с высокой механической прочностью, описанные в подразделах 2.1-2.4.

Таким образом, в настоящем подразделе предложена конструкция и разработана методика проектирования приземной многолучевой антенной решетки на основе линзы из гранитного щебня, позволяющая одновременно формировать до нескольких десятков лучей в длинноволновой области УКВ диапазона волн. В качестве облучателей используются монополи, расположенные на окружности по периметру линзы.

Модель многолучевой приземной антенной системы УКВ диапазона с диаграммообразующей схемой на основе линзы из гранитного щебня показана на рис. 2.49. Линза представляет собой усеченный конус с диаметром нижнего основания – 30 метров, диаметром верхнего основания – 26 метров и высотой 1.8 метра. Коническая форма линзы выбрана исходя из того, что вблизи периметра линзы будет иметь место осыпание щебня.

Сужение линзы, от ее нижнего основания к верхнему основанию, благоприятствует получению хорошего качества согласования входов антенной системы с фидерными линиями, вследствие уменьшения отражений от ее боковой поверхности, а также – уменьшению уровня боковых лепестков диаграммы направленности. В качестве подстилающей поверхности использовалась сталь, диаметр подстилающей поверхности – 40 м.

В качестве облучателей линзы использовались монополи высотой 1.7 метра, расположенные по периметру конуса. Диаметры всех монополей – 50 мм. Всего использовалось 36 облучателей. Предлагаемая многолучевая антенна способна одновременно, или поочередно, формировать 36 лучей в азимутальной плоскости в секторе от 0 до 360 градусов.

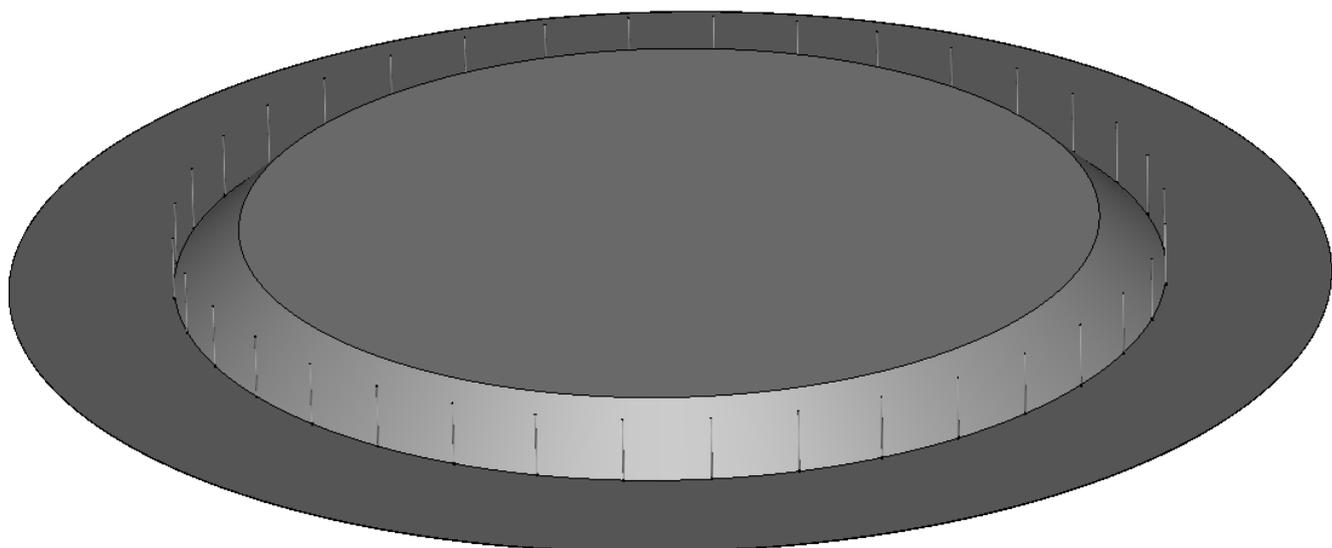


Рис. 2.49. Модель многолучевой антенной системы на основе линзы из гранитного щебня с подстилающей поверхностью из стали, облучаемой монополями

Для определения эффективной комплексной диэлектрической проницаемости щебня использовалась формула Лихтенекера [141] для мелкодисперсной смеси двух диэлектриков – частиц гранитного щебня и воздуха:

$$\ln(\varepsilon_{\text{эфф}}) = x_1 \cdot \ln(\varepsilon_1) + (1 - x_1) \cdot \ln(\varepsilon_2), \quad (2.1)$$

где x_1 и $x_2 = (1 - x_1)$ – относительные объемные концентрации двух компонентов смеси; ε_1 и ε_2 – относительные диэлектрические проницаемости двух компонентов смеси.

Эффективная диэлектрическая проницаемость щебня была принята равной $\varepsilon_{\text{эфф}} = 3$, а значение тангенса угла диэлектрических потерь на низких частотах УКВ диапазона – $\text{tg}(\delta_d) = 0.02$.

Предложенная конструкция линзовой многолучевой антенны УКВ диапазона волн (рис. 2.49) является замедляющей структурой с ТМ- волной. Для вычисления эффективной относительной диэлектрической проницаемости диэлектрического волновода с металлическим экраном для случая распространения в нем основной ТМ-

волны, использовалась методика, изложенная в монографии [142]. Результаты расчетов приведены на рис. 2.50.

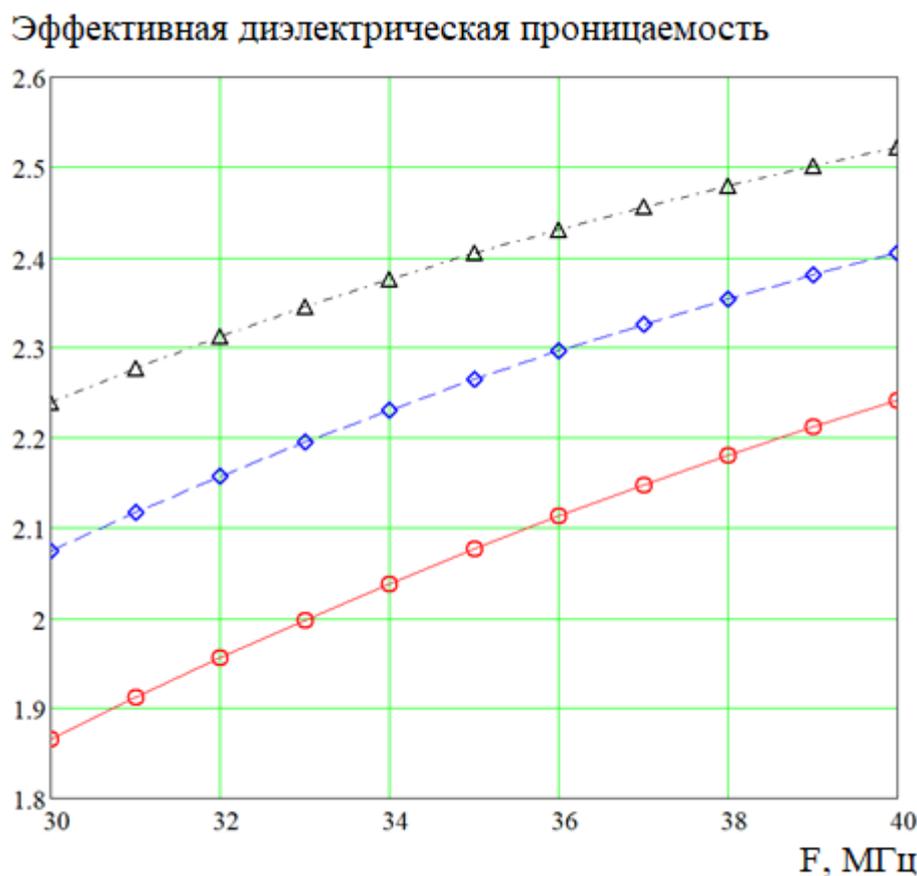


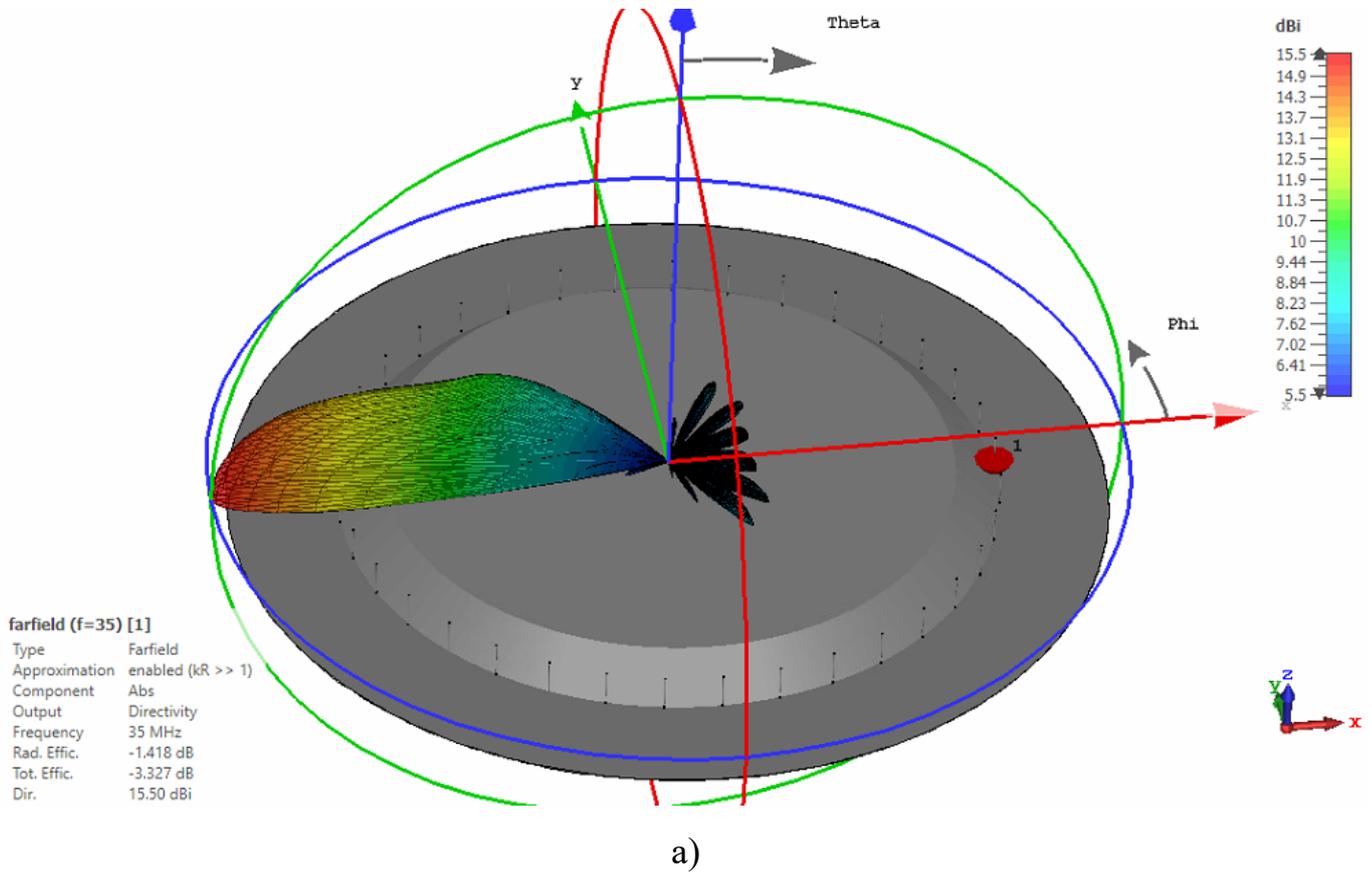
Рис. 2.50. Частотные зависимости эффективной относительной диэлектрической проницаемости замедляющей структуры в виде слоя гранитного щебня над металлом для волны TM_0 для следующих значений толщины слоя щебня: 1.8 метра (линия с кружками); 2.1 метра (линия с ромбами); 2.4 метра (линия с треугольниками)

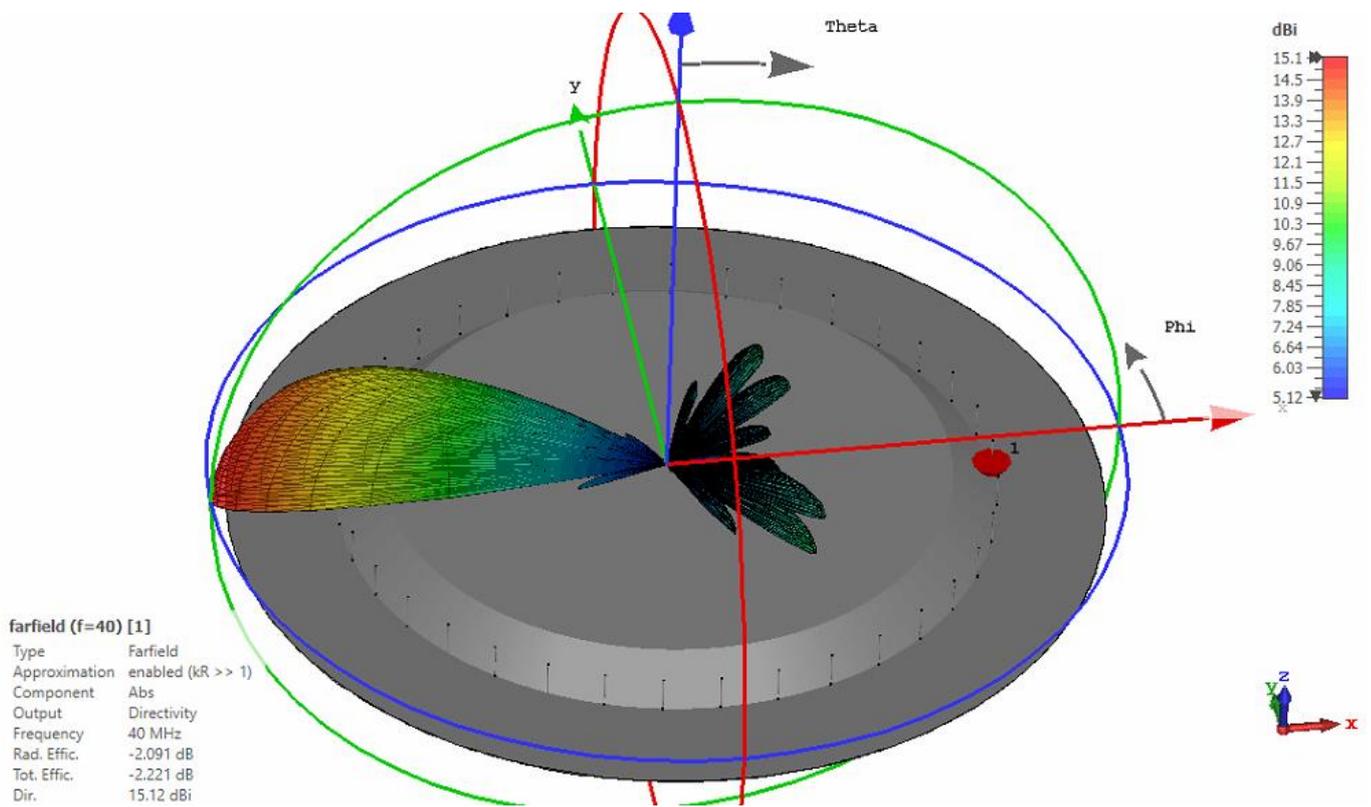
Как видно из рис. 2.50, при высоте слоя гранитного щебня 1.8 метра, на частоте 36 МГц значение эффективной диэлектрической проницаемости зеркального диэлектрического волновода приблизительно равно 2.1, что соответствует значению диэлектрической проницаемости такого материала, как фторопласт-4, используемого для реализации сферических линзовых антенн в СВЧ и КВЧ диапазонах волн.

Численный электродинамический анализ антенной системы на основе линзы из гранитного щебня с подстилающей поверхностью из стали, облучаемой монополями, проводился с использованием метода конечного интегрирования Вейланда

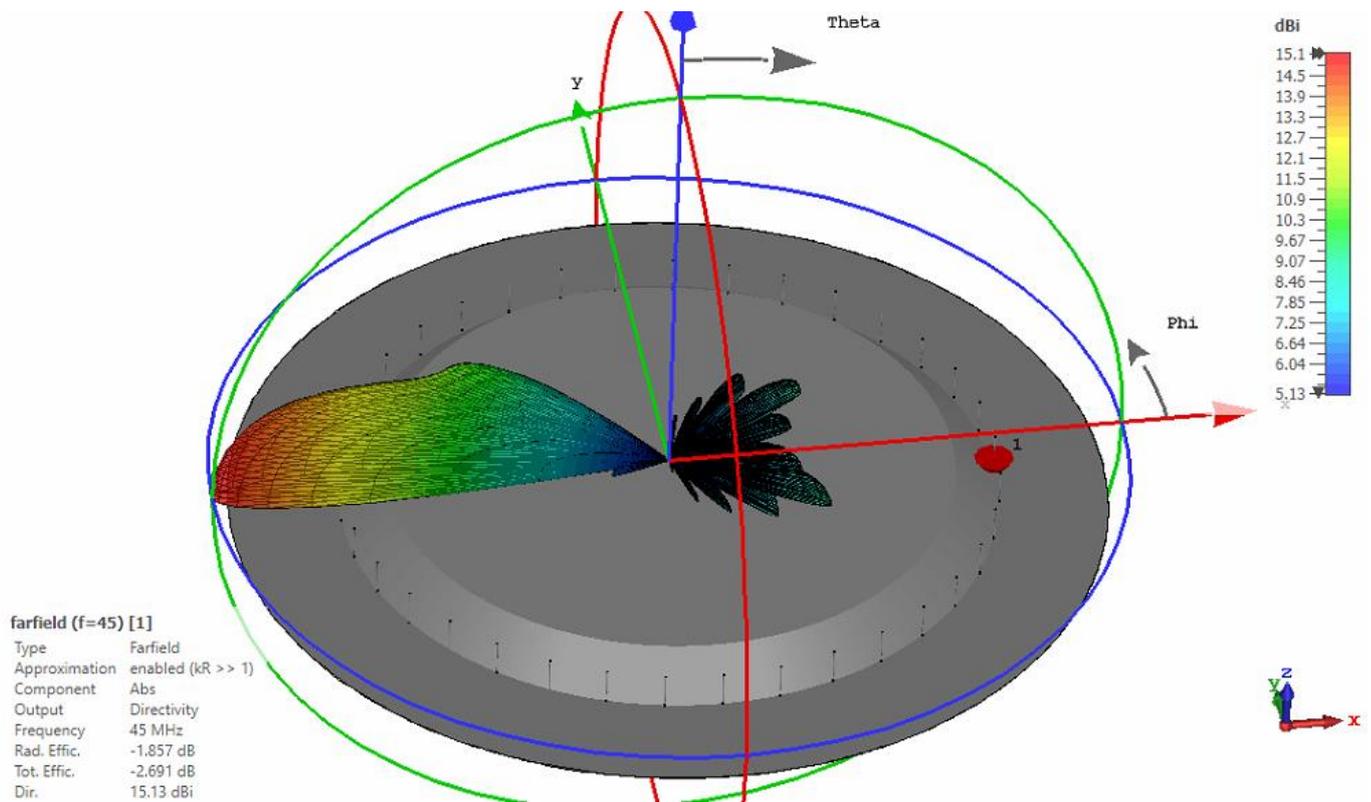
[132-135], реализованного в пакете программ численного электродинамического моделирования Microwave Studio CST.

Диаграммы направленности для одного из 36 лучей антенной системы (рис. 2.49) на частотах 35, 40 и 45 МГц приведены на рис. 2.51-2.52.



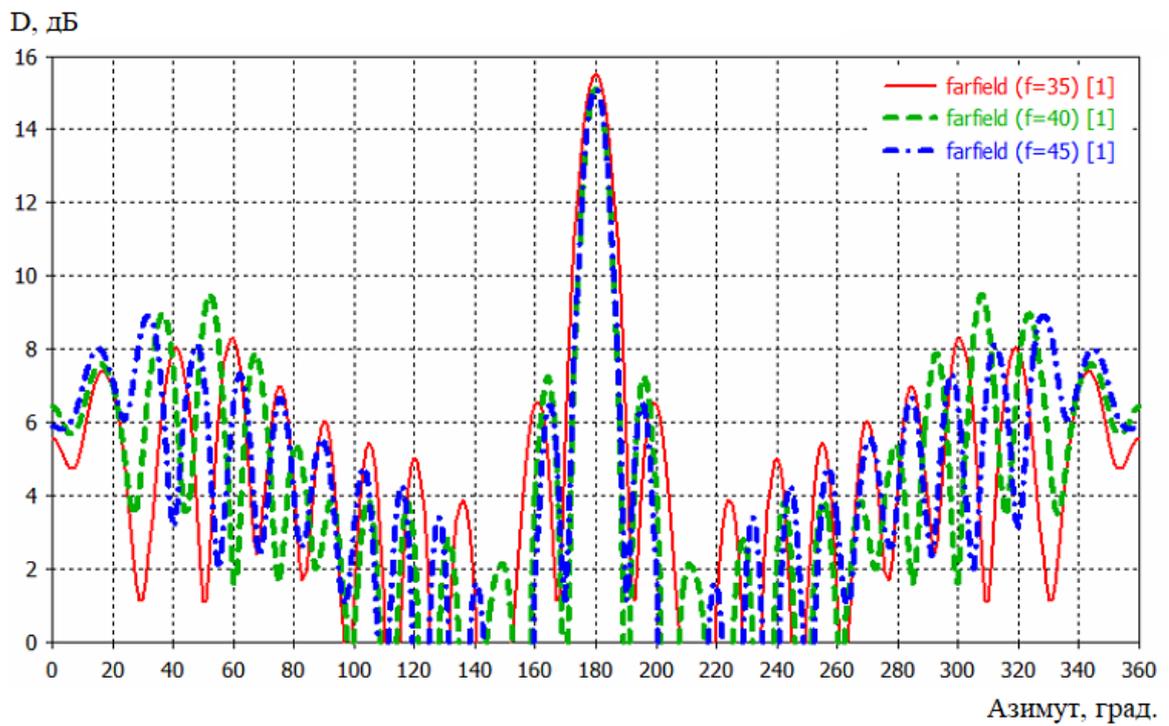


б)

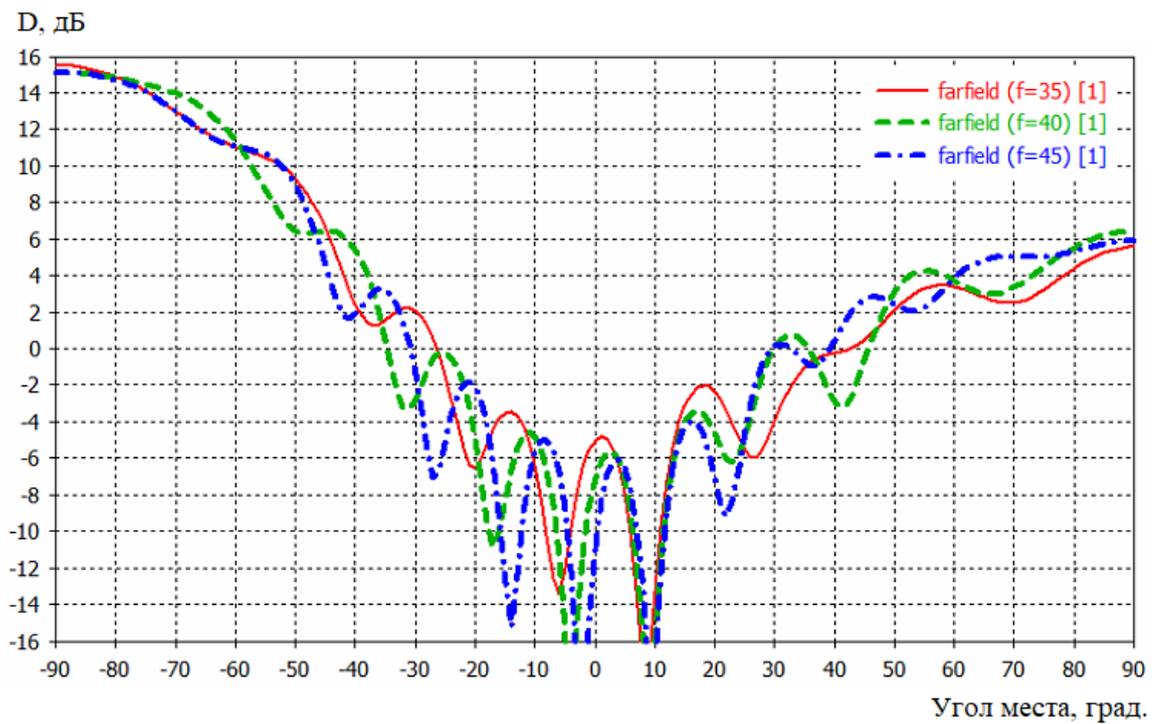


в)

Рис. 2.51. Объемные диаграммы направленности антенной системы (рис. 2.49) на частотах 35 МГц (а), 40 МГц (б) и 45 МГц (в) для одного из ее 36 лепестков. Случай идеально проводящей продолжающейся подстилающей поверхности



а)



б)

Рис. 2.52. Диаграммы направленности антенной системы (рис. 2.49) на частотах 35, 40 и 45 МГц для одного из ее 36 лепестков, в азимутальной плоскости (а) и в угломестной плоскости (б). Случай идеально проводящей продолжающейся подстилающей поверхности

Частотная зависимость суммарного коэффициента полезного действия антенной системы (рис. 2.49), включающего в себя потери в материалах, потери из-за расогласования антенных элементов, при подключении фидерной линии к одному из облучателей линзы (при этом все остальные облучатели находятся в состоянии холостого хода), показана на рис. 2.53.

При одновременном подключении приемо-передающих средств ко всем 36 облучателям многолучевой антенной системы, ее КПД падает, в среднем на 2 дБ, для каждого из ее диаграммообразующих входов, рис. 2.54.

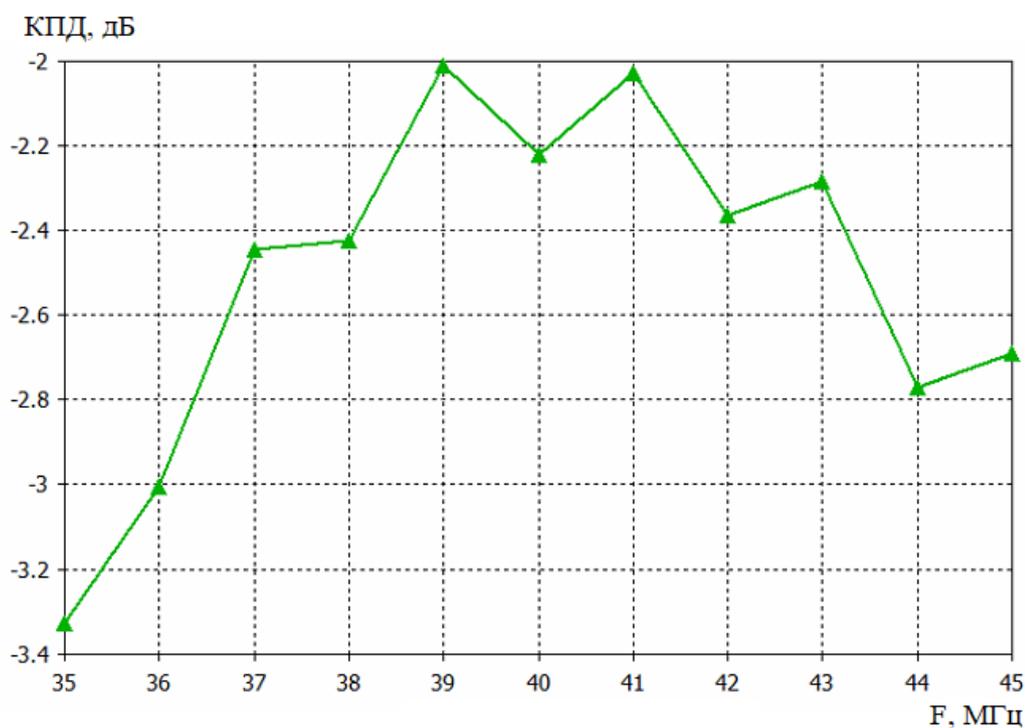


Рис. 2.53. Частотная зависимость суммарного коэффициента полезного действия антенной системы (рис. 2.49) при подключении приемо-передающего средства только к одному из ее 36 входов

В заключение отметим, что в настоящем подразделе разработана методика проектирования многолучевой полноазимутальной антенной системы в виде линзы в форме усеченного конуса, материалом которой является мраморный или гранитный щебень, основанная на:

- оценке эффективной комплексной диэлектрической проницаемости щебня с помощью формулы Лихтенекера для мелкодисперсных смесей (на данном этапе материальные параметры щебня оценивались для объема пространства, расположенного внутри среды, бесконечно протяженной во всех направлениях);

- вычислении эффективной относительной диэлектрической проницаемости диэлектрического волновода с металлическим экраном (по сути - зеркального диэлектрического волновода) для случая распространения в нем основной ТМ- волны;

- проведении численного электродинамического анализа антенной системы на основе линзы из гранитного щебня с подстилающей поверхностью из стали, облучаемой монополями, с использованием метода Вейланда, реализованного в пространственно-временной области.

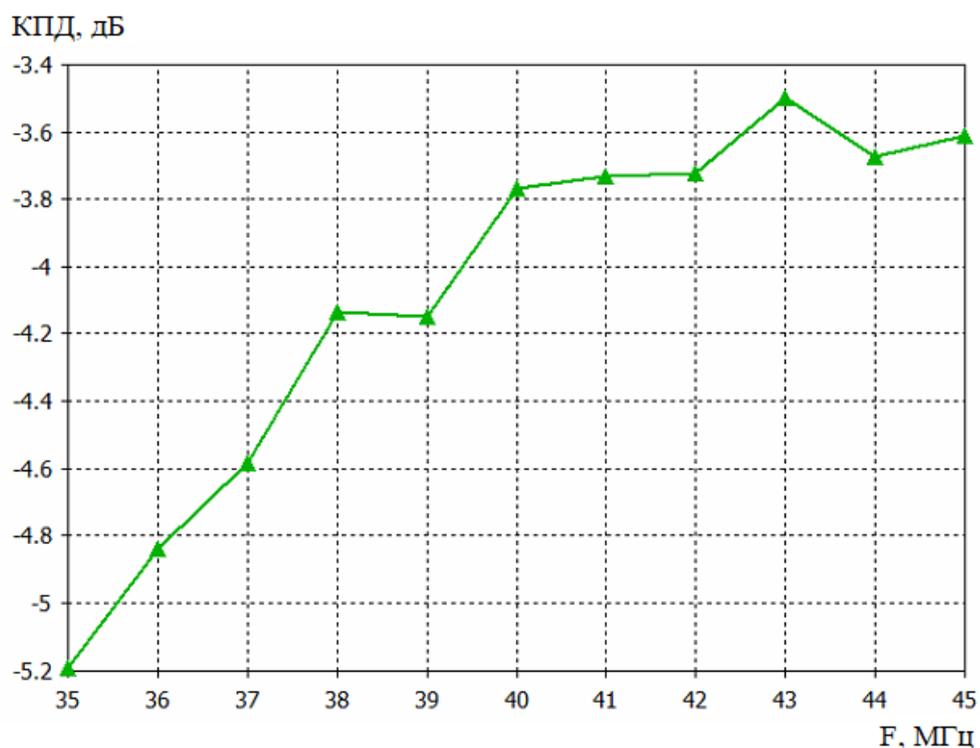


Рис. 2.54. Частотная зависимость суммарного коэффициента полезного действия антенной системы (рис. 2.49) при подключении приемо-передающих средств ко всем ее 36 входам одновременно (приведена зависимость для одного их входов)

Расчеты показали, что при высоте линзы $0.27\lambda_{max}$ и диаметре основания $4.5\lambda_{max}$, многолучевая антенная система, построенная на ее основе, характеризуется

коэффициентом направленного действия до 15.5 дБ в полосе частот с относительной шириной 25.2 %, лежащей в УКВ диапазоне волн, при этом суммарные потери, включающие потери в щебне и стальной подстилающей поверхности, не превышают $2 \div 3.4$ дБ, в случае подключения к приемо-передающему средству только одного из ее 36 входов; при одновременном подключении приемо-передающих средств ко всем 36 входам значение КПД, для каждого входа, изменяется от -3.5 дБ до -5.2 дБ.

Применение разработанной методики проектирования многолучевых антенных систем УКВ диапазона, сохраняющих работоспособность даже при их нахождении вблизи источника мощного механического воздействия, позволит повысить энергетический потенциал систем управления, а также – расширить их функциональные возможности, за счет одновременной организации, до нескольких десятков пространственных каналов связи в полноазимутальном пространстве.

2.6. Выводы по второй главе

Подводя итоги исследований, проведенных во второй главе диссертации, перечислим следующие полученные в ней результаты.

1. 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.

2. 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. Выяснено, что 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

3. 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.

4. 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. Выяснено, что многолучевая полноазимутальная антенная система в виде линзы в форме усеченного конуса, материалом которой является 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.

3. Методология проектирования подземных антенн УКВ диапазона волн на основе резонаторно-щелевых структур и патч-излучателей

Исследования зависимости основных характеристик подземных антенн УКВ диапазона от времени их эксплуатации, показали, что использование в качестве диэлектрической подложки полимербетона приводит к накоплению влаги и существенному падению коэффициента полезного действия антенных устройств уже через 10-15 лет их эксплуатации.

Известно также, что обеспечение надежной гидроизоляции подземных антенн тем сложнее, чем больше их габаритные размеры. Поэтому важной научно-технической задачей является разработка методологии проектирования подземных антенн УКВ диапазона уменьшенных габаритных размеров, позволяющих осуществить сборку антенной системы в заводских условиях и существенно упростить процесс ее доставки на место эксплуатации и процедуру ее монтажа. Кроме того, в относительно малогабаритных подземных антеннах УКВ диапазона можно использовать более надежные (в смысле обеспечения гидроизоляции), чем полимербетон, диэлектрические материалы.

Целью настоящей главы являлась разработка методологии проектирования подземных антенн резонансного типа, позволяющей существенно уменьшить габаритные размеры излучателей за счет использования диэлектрической подложки, либо – метаповерхности, элементы которой характеризуются накоплением, как энергии электрической компоненты электромагнитного поля, так – и энергии его магнитной компоненты, за счет чего метаповерхность, в общем случае, обладает свойствами магнитодиэлектриков, и может быть использована для существенного уменьшения габаритных размеров антенных устройств, создаваемых на ее основе.

Для уменьшения размеров резонансно-щелевых излучателей продуктивным подходом является использование щелей нелинейной формы – в виде синусоиды или меандра; в настоящей работе были использованы щели «Г»-образной формы, как компромиссное решение между уменьшением длины щели (измеряемой по прямой линии между ее началом и концом) и увеличением добротности излучателя.

Математической основой методологии проектирования подземных антенн УКВ диапазона резонансного типа является использование эволюционных методов поиска глобальных минимумов целевой функции большого числа независимых переменных, а также – методов локализации найденного глобального минимума, реализованных в пакете программ численного электродинамического моделирования Microwave Studio CST; при этом вычисление значения целевой функции на всех этапах проводилось с использованием метода конечного интегрирования Вейланда [132-135], реализованного в пространственно-временной области.

Главной целью оптимизации является обеспечение требуемых характеристик согласования антенны с фидерной линией, а также – типа диаграммы направленности и ее численных параметров (ширины главного лепестка диаграммы направленности в двух взаимно-ортогональных вертикальных плоскостях и его пространственной ориентации) в полосе рабочих частот. Другие цели оптимизации: минимизация потерь мощности при заданных значениях максимальных габаритных размеров антенного устройства и бассейна с гранитным щебнем, в котором оно размещается; минимизация габаритных размеров антенны при заданном значении диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материала подложки; минимизация вариации входных характеристик антенны при изменении материальных параметров грунта.

В подразделе 3.1 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.

В подразделе 3.2 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.

3.1. Методика проектирования подземной антенны УКВ диапазона волн на основе патч- структуры с метаматериальной подложкой

В последнее время метаматериалы – искусственные материалы, частицы которых могут иметь размеры, как много меньшие длины волны, так и – сравнимые с половиной длиной волны, находят все более широкое использование в различных областях техники – оптике, радиотехнике, акустике и других областях.

Неоценимый вклад в теорию и технологию создания метаматериалов внесли великий российский ученый Виктор Георгиевич Веселаго [143-145] и его ученики и коллеги. Англичанин Джон Брайан Пендри [146, 147] вместе со своими учениками и коллегами развил многие идеи, первоначально выдвинутые В.Г. Веселаго, в частности – касающиеся линзы Веселаго.

В настоящее время известно значительное число работ, посвященных использованию метаматериалов в антеннах и СВЧ устройствах [104, 117, 148-160]. Особенно хотелось бы отметить работы проф. С.Е. Банкова, посвященные электромагнитным кристаллам – метаматериалам, у которых период расположения и размеры искусственных частиц могут быть сравнимыми с половиной длины волны, в которых, наряду с резонансными свойствами частиц имеют место различные структурные эффекты, в частности, – имеется полоса запираания (electromagnetic bandgap (EBG) – электромагнитные кристаллы с полосой запираания) [160].

Перспективность использования метаматериалов в подземных антеннах связана с возможностью существенного уменьшения габаритных размеров излучателей за счет реализации магнитодиэлектрической подложки с близкими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

В настоящем подразделе разработана методика проектирования подземной антенны УКВ диапазона волн на основе патч- структуры с метаматериальной подложкой (рис. 3.1), реализованной в виде «грибков» - металлических пластин квадратной

формы (отметим, что форма пластин не является принципиально важной, и может быть также круглой, треугольной, шестиугольной и т.д.), замкнутых на металлическую подложку основного полоска патч-излучателя; «грибки» образуют двумерно-периодическую решетку, при этом значение периода является существенно меньшим половины длины волны, поэтому данную структуру следует считать не электромагнитным кристаллом, а метаматериалом с молекулами, намного меньшими длины волны (электромагнитным кристаллом данная структура будет являться на более высоких частотах, при периоде расположения «грибков» около половины длины волны).

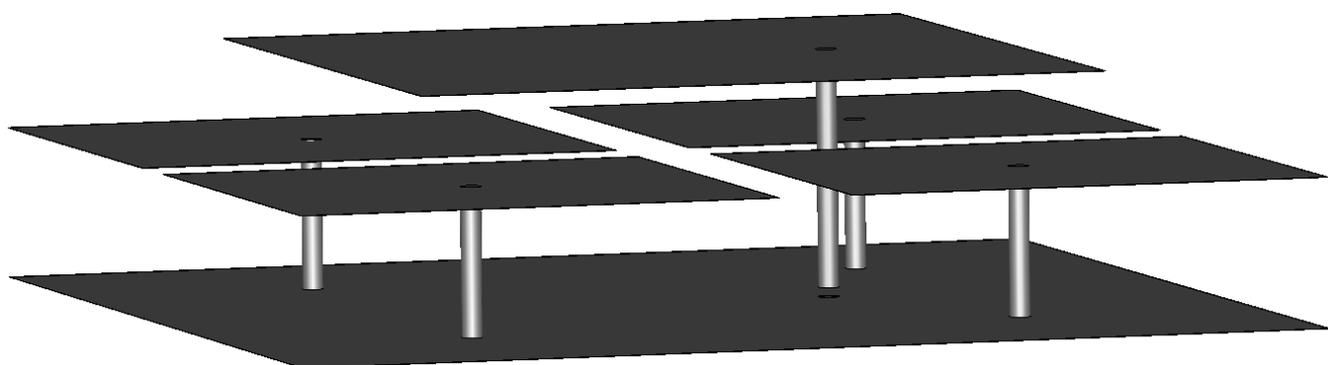


Рис. 3.1. Модель патч-антенны с метаматериальной подложкой (на рисунке, для большей наглядности, не показаны диэлектрические пластины, являющиеся несущими элементами конструкции антенны)

В работах [149, 151] приведены выражения для номиналов сосредоточенных емкости C и индуктивности L эквивалентной схемы метаповерхности с высоким поверхностным импедансом (high impedance surface (HIS)), представляющей собой линию передачи с периодически подключенными к ней параллельными колебательными контурами:

$$C = \frac{W \cdot (\varepsilon_{a1} + \varepsilon_{a2})}{\pi} \cdot \operatorname{acosh} \left(\frac{2 \cdot W}{g} + 1 \right), \quad (3.1)$$

где

W – ширина шляпок «грибков»;

ε_{a1} – абсолютная диэлектрическая проницаемость подложки «грибков»;

ε_{a2} – абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрической пластины над «грибками»;

g – ширина щели между соседними шляпками «грибков»;

$$L = \frac{\mu_0 \cdot t}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{4 \cdot t}{d} \right) - 1 + \frac{\zeta}{4} \right), \quad (3.2)$$

$$\zeta = \frac{1}{x} - \frac{3}{64 \cdot x^3},$$

$$x = \frac{k \cdot r}{\sqrt{8}},$$

где

μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;

t – высота ножки «грибка»;

d – диаметр ножки «грибка»;

k – волновое число;

r – радиус ножки «грибка».

Параметры «грибков» выбираются таким образом, чтобы частота резонанса контура, образованного емкостью C и индуктивностью L соответствовала резонансной частоте патч-антенны с метаматериальной подложкой.

Для изготовления макета патч-антенны с метаматериальной подложкой, функционирующего на частоте 40 МГц, была проведена процедура параметрического синтеза, в ходе которой анализ ее характеристик проводился с использованием метода конечного интегрирования Вейланда, реализованного в пакете программ численного электродинамического моделирования Microwave Studio CST.

В результате были получены следующие значения параметров антенны:

$W = 850$ мм; $g = 130$ мм; $t = 100$ мм; $d = 1$ мм; $a = 1200$ мм (размеры сторон квадратного полоска патч-антенны); $L = 1830$ мм (размеры сторон квадратной подстилающей поверхности патч-антенны); $h = 201$ мм (зазор между полоском патч-антенны и ее подстилающей поверхностью); $D = 36$ мм (диаметр металлической трубы,

подводящей питание к квадратному полюску патч- антенны); $s = 294$ мм (смещение точки запитки квадратного полюска относительно его центра).

В качестве материала шляпок «грибков», полюска патча, а также – его подстилающей поверхности использовалась оцинкованная сталь толщиной 1 мм; в качестве материала диэлектрических подложек был выбран вспененный диэлектрик – материал пеноплэкс (подобный выбор конструктивного материала обусловлен стремлением снизить стоимость макета и уменьшить его массу; удельный объем содержания полистирола составляет около 2%, при этом, в соответствии с формулой Лихтенекера (2.1) значение относительной диэлектрической проницаемости пенодиэлектрика составляет около 1.02). В процессе синтеза антенное устройство располагалось на идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности.

Входные характеристики патч- антенны показаны на рис. 3.2, 3.3; частотная зависимость КПД антенны показана на рис. 3.4. Диаграмма направленности антенны иллюстрируется рис. 3.5-3.7.

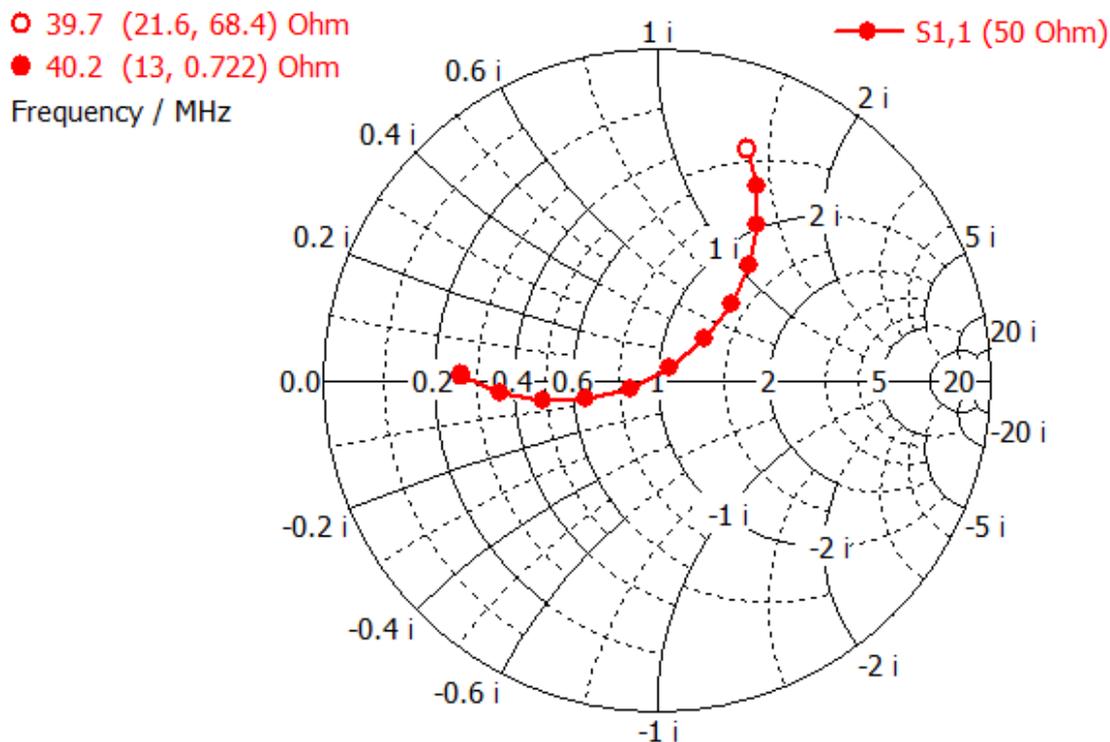


Рис. 3.2. Номограмма Вольперта-Смита патч- антенны с метаматериальной подложкой на основе из вспененного диэлектрика. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

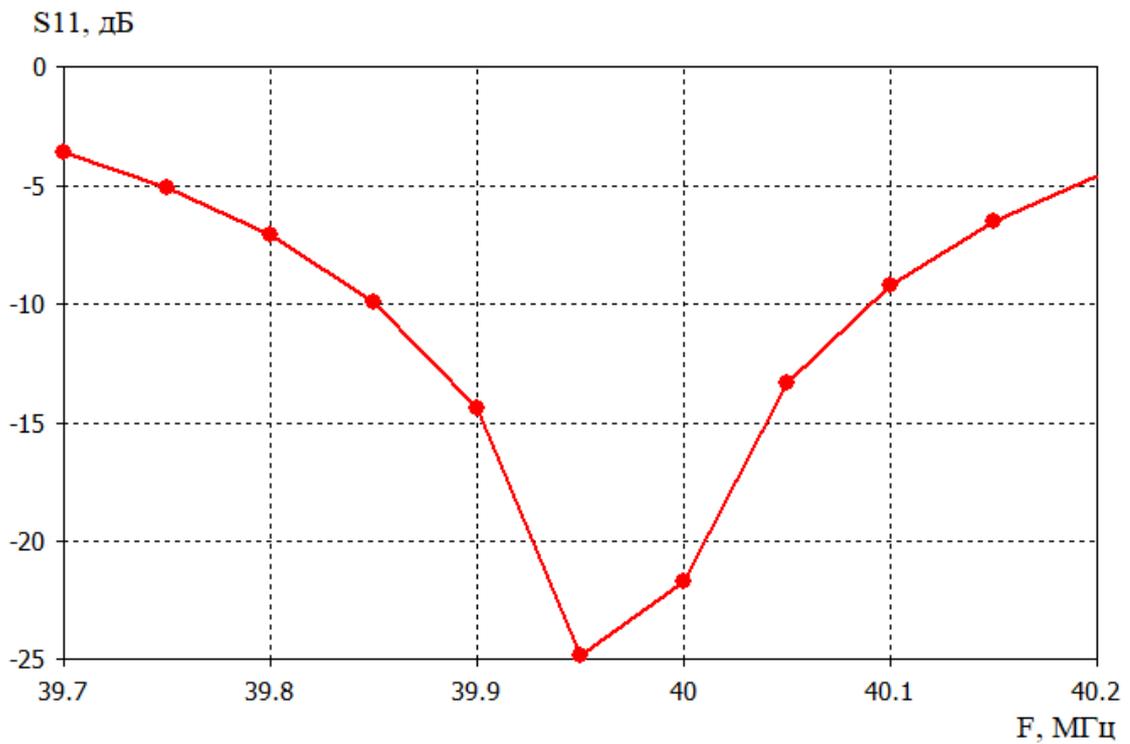


Рис. 3.3. Коэффициент отражения от входа патч- антенны с метаматериальной подложкой на основе из вспененного диэлектрика. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

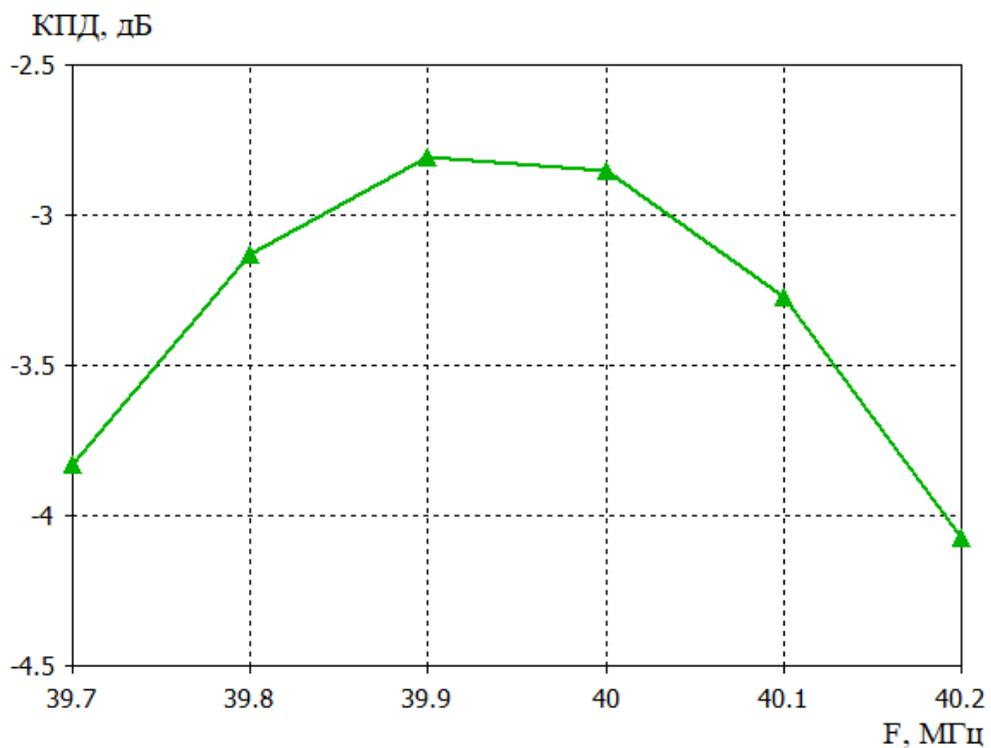


Рис. 3.4. КПД патч- антенны с метаматериальной подложкой на основе из вспененного диэлектрика. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

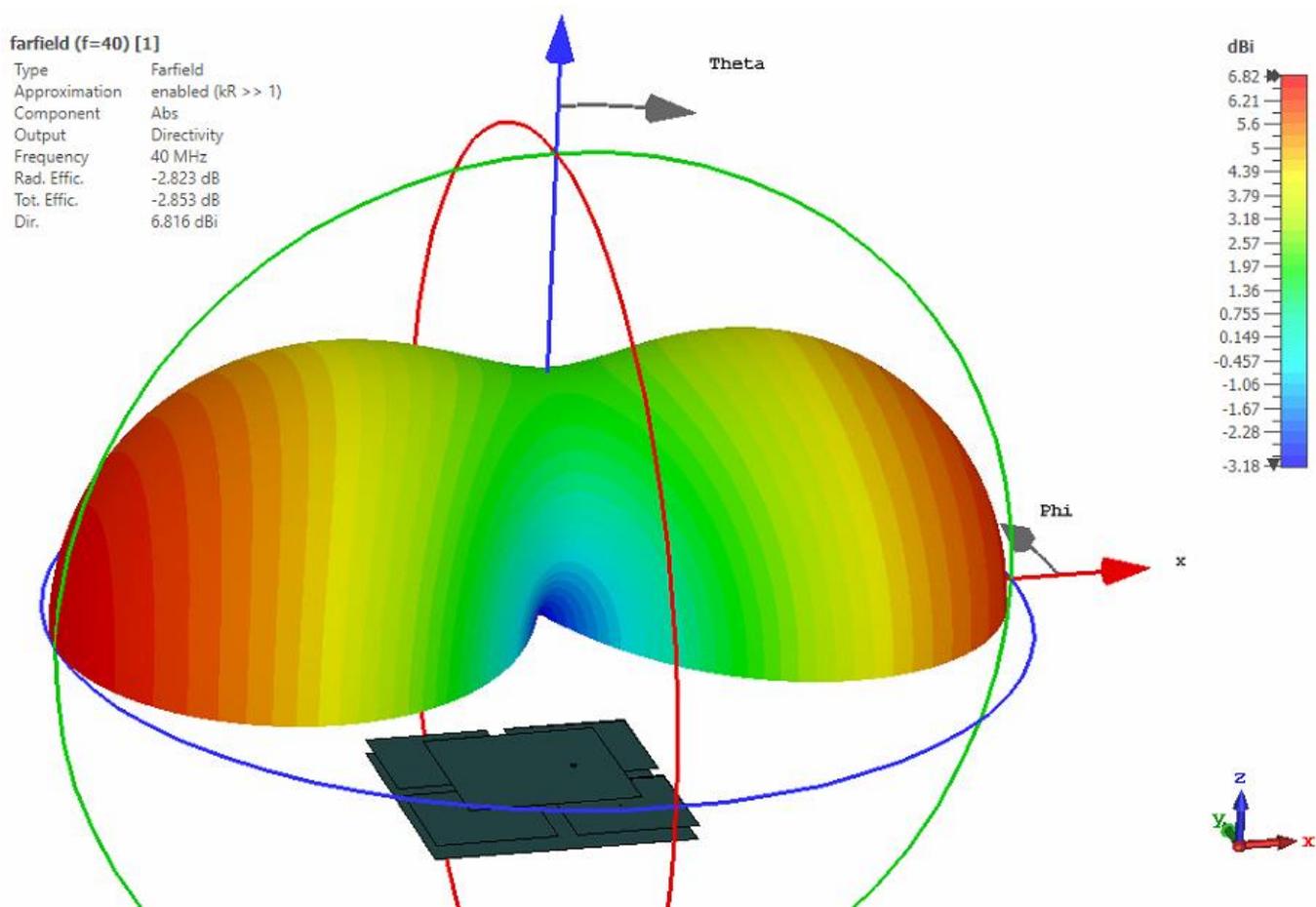
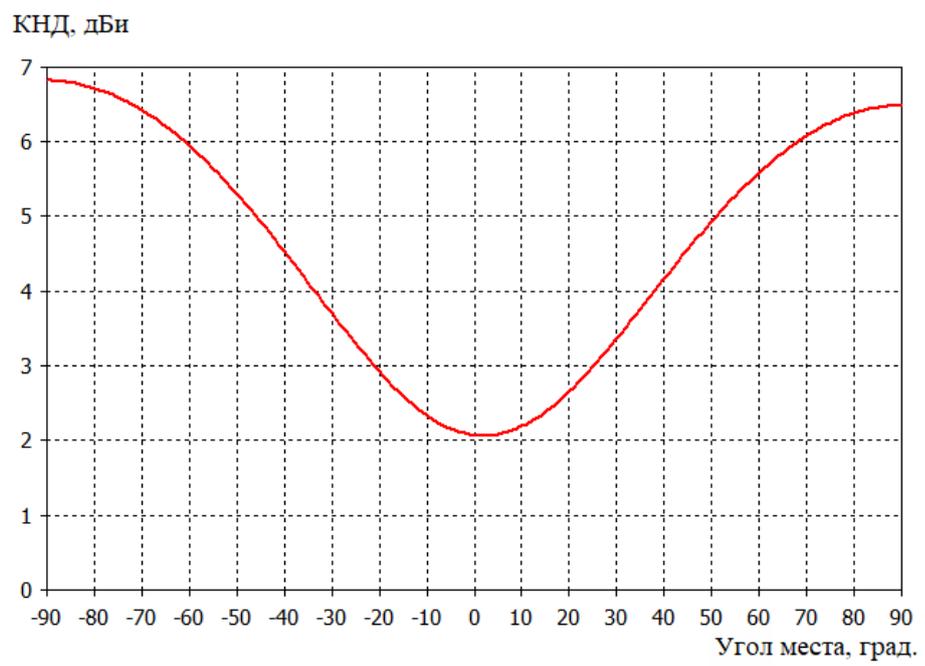
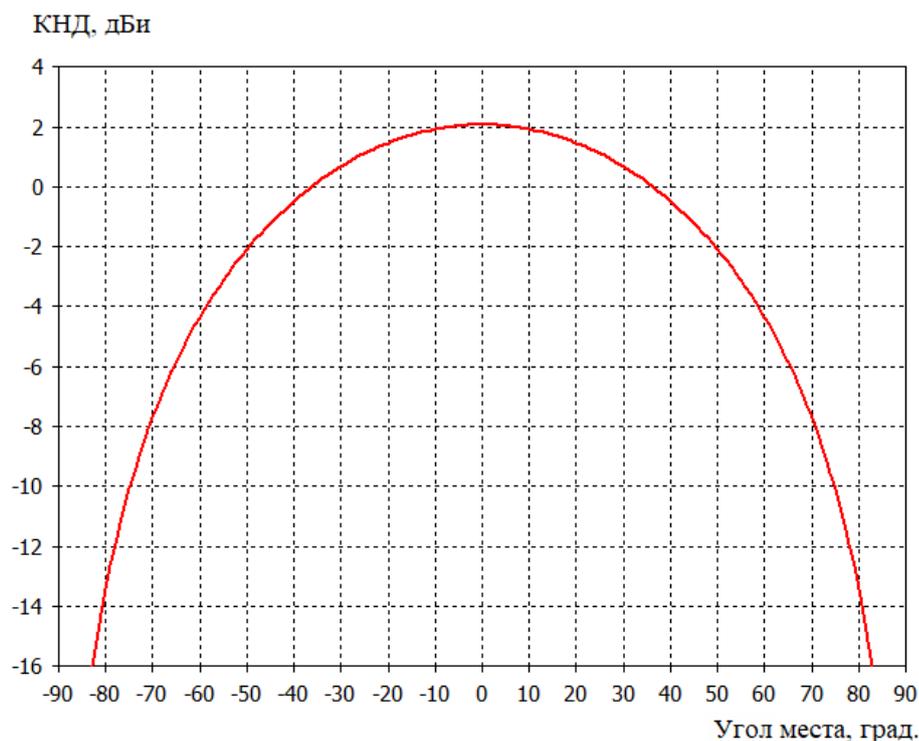


Рис. 3.5. Объемная диаграмма направленности патч- антенны с метаматериальной подложкой на основе из вспененного диэлектрика. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности





б)

Рис. 3.6. Диаграмма направленности патч- антенны с метаматериальной подложкой на основе из вспененного диэлектрика в угло-местной плоскости: а) - $\varphi = 0^\circ$; б) - $\varphi = 90^\circ$. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

В случае вспененного диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью, близкой 1, ширина и длина полоска патч- антенны приблизительно равна половине длины волны; в частности, размеры полоска патч- антенны с воздушным заполнением, настроенной на частоту 40 МГц (длина волны в воздухе – 7.5 метров), составляет около 3.75 м на 3.75 м. Использование метаматериальной структуры, расположенной между полоском и подстилающей поверхностью, позволило уменьшить размеры полоска до 1.2 м на 1.2 м, что дало возможность существенно уменьшить габаритные размеры антенного устройства. Эффективный коэффициент преломления метаматериальной структуры составляет около 3, что соответствует случаю применению подложки с диэлектрической проницаемостью 9.

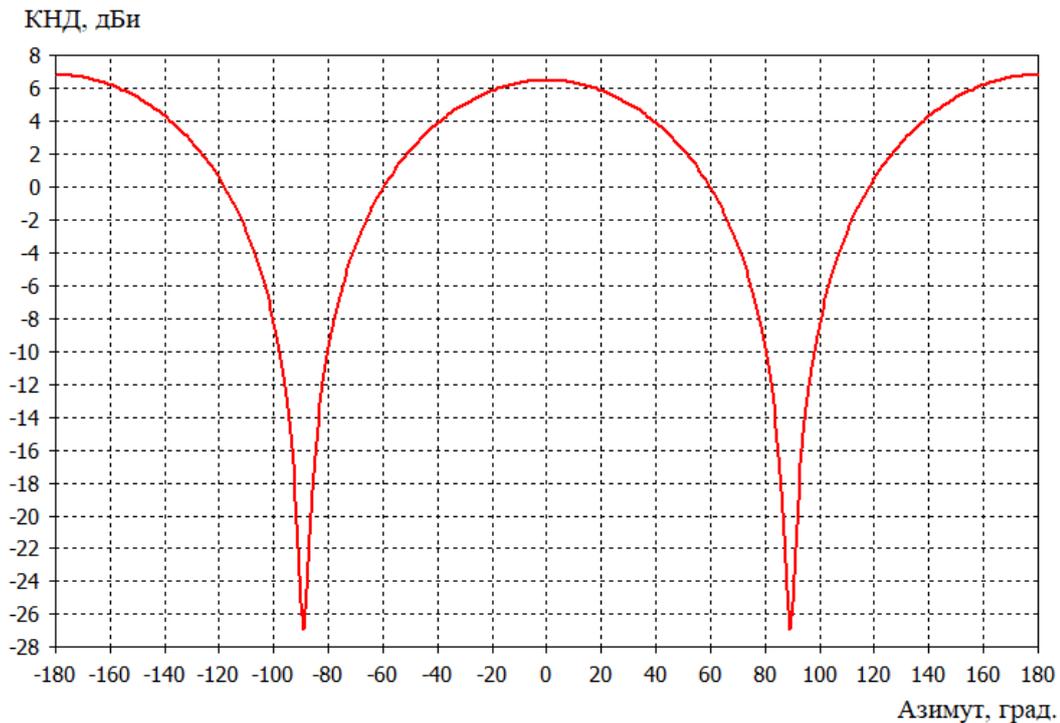


Рис. 3.7. Диаграмма направленности патч- антенны с метаматериальной подложкой на основе из вспененного диэлектрика в азимутальной плоскости. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

При использовании в качестве основы диэлектрика FR-4 (стеклотекстолит, $\epsilon_r = 4.3$; $tg(\delta_3) = 0.025$), использовании дополнительной металлической подстилающей поверхности с размерами $2.5 \times 2.5 \text{ м}^2$, размещении антенны в центре бассейна с гранитным щебнем ($\epsilon_{r \text{эфф.}} = 3$; $tg(\delta_3) = 0.03$) с размерами $3.2 \times 3.2 \times 2.1 \text{ м}^3$, размеры антенны, настроенной на частоту 48.75 МГц, составляют $1.19 \times 1.19 \times 0.13 \text{ м}^3$; размеры полоска патча – $0.78 \times 0.78 \text{ м}^2$, рис. 3.8.

В данной модели антенна окружена грунтом с параметрами ($\epsilon_{r \text{эфф.}} = 8$; $\sigma = 0.005 \text{ См/м}$); рассмотрены случаи навала земли с толщиной слоя 0.5 м над антенной (над верхом бассейна с гранитным щебнем), а также – отсутствия навала земли сверху антенны. Входные характеристики патч- антенны показаны на рис. 3.8, 3.9; частотная зависимость КПД антенны показана на рис. 3.10. Диаграмма направленности антенны в угло-местной плоскости показана на рис. 3.11.

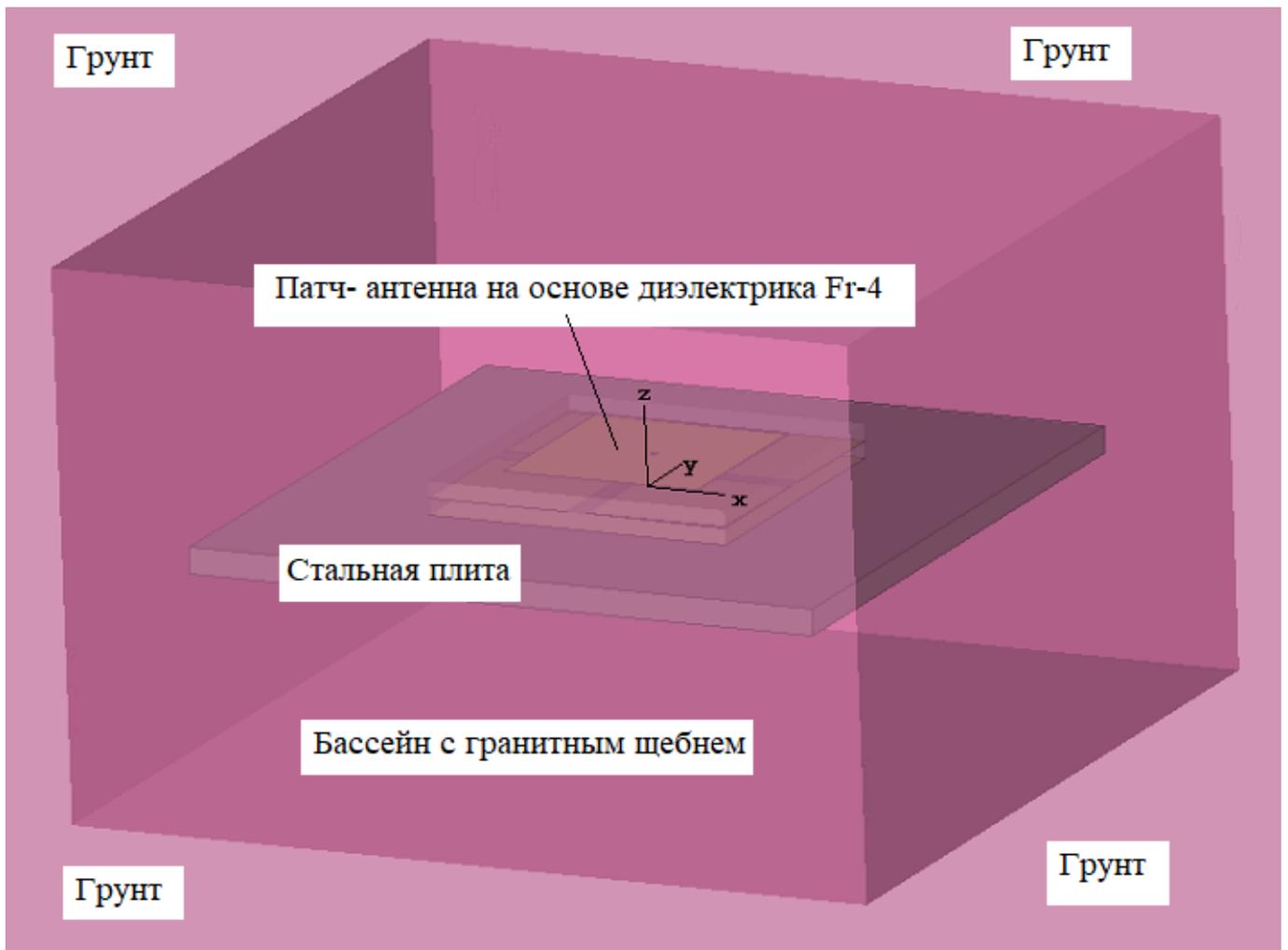


Рис. 3.8. Модель патч-антенны с метаматериальной подложкой в диссипативной среде. Антенна расположена в центре бассейна с гранитной крошкой ($\epsilon_{r \text{эфф.}} = 3$; $\text{tg}(\delta_3) = 0.03$) с размерами $3.2 \times 3.2 \times 2.1 \text{ м}^3$; над антенной (верхняя поверхность антенны – верхняя поверхность бассейна) – навал грунта ($\epsilon_{r \text{эфф.}} = 8$; $\sigma = 0.005 \text{ См/м}$) толщиной 0.5 м. Размеры антенны $1.19 \times 1.19 \times 0.13 \text{ м}^3$; размеры полоска патча - $0.78 \times 0.78 \text{ м}^2$. Размеры стальной плиты (дополнительная подстилающая поверхность) $2.5 \times 2.5 \times 0.1 \text{ м}^3$

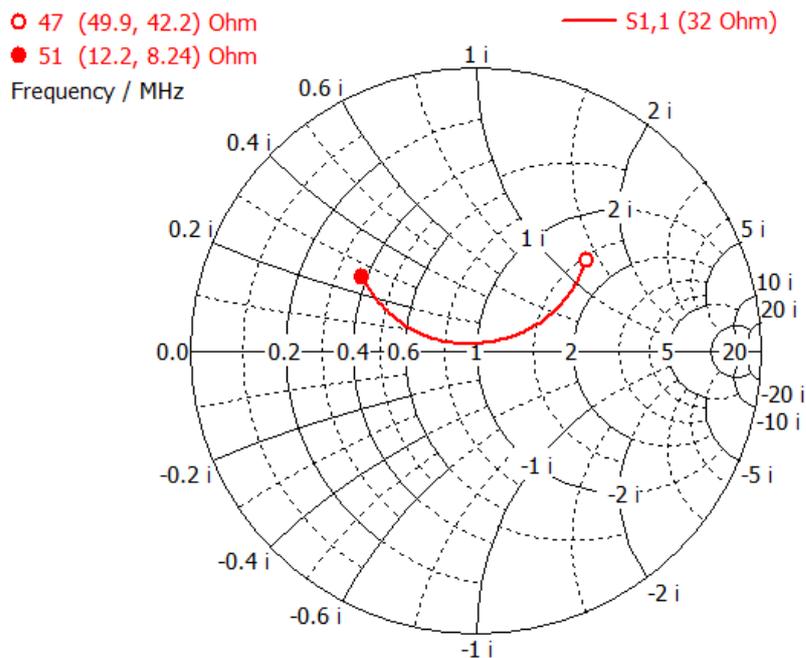


Рис. 3.9. Номограмма Вольперта-Смита патч- антенны с метаматериальной подложкой в диссипативной среде (рис. 3.8)

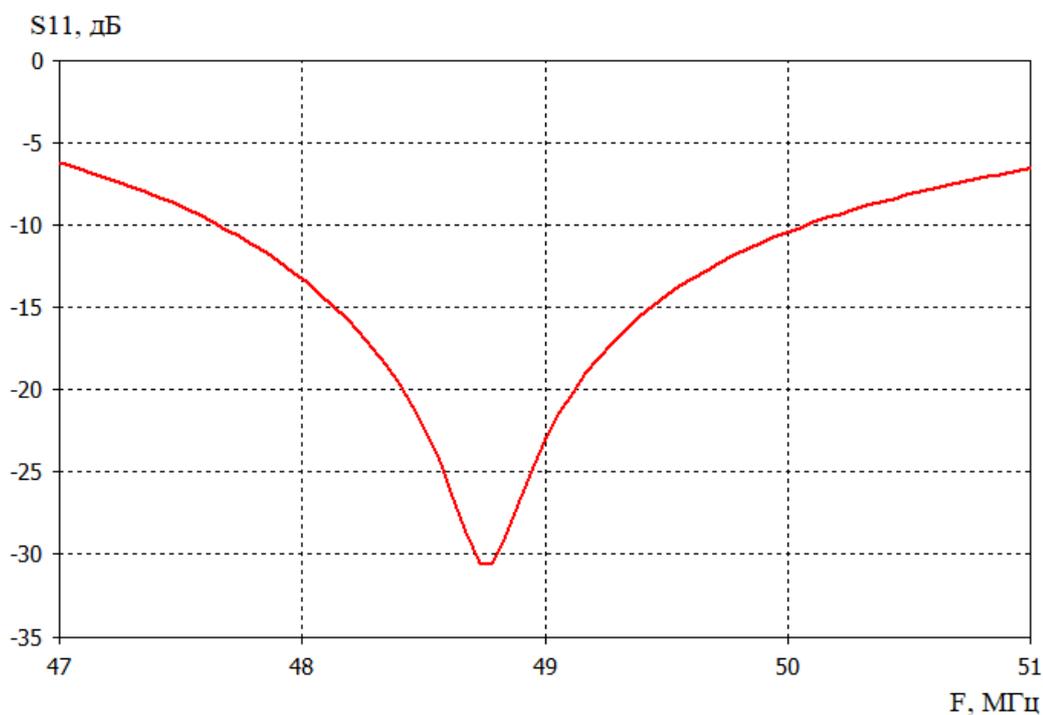


Рис. 3.10. Коэффициент отражения от входа патч- антенны с метаматериальной подложкой в диссипативной среде, волновое сопротивление фидера 32 Ом (рис. 3.8)

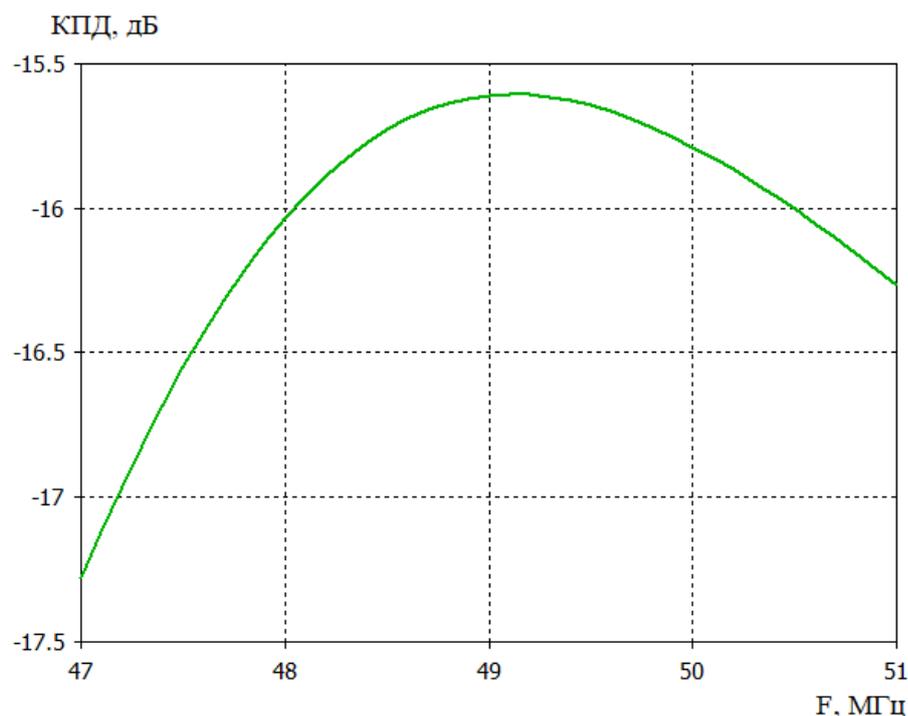


Рис. 3.11. КПД патч- антенны с метаматериальной подложкой в диссипативной среде, волновое сопротивление фидера 32 Ом (рис. 3.8)

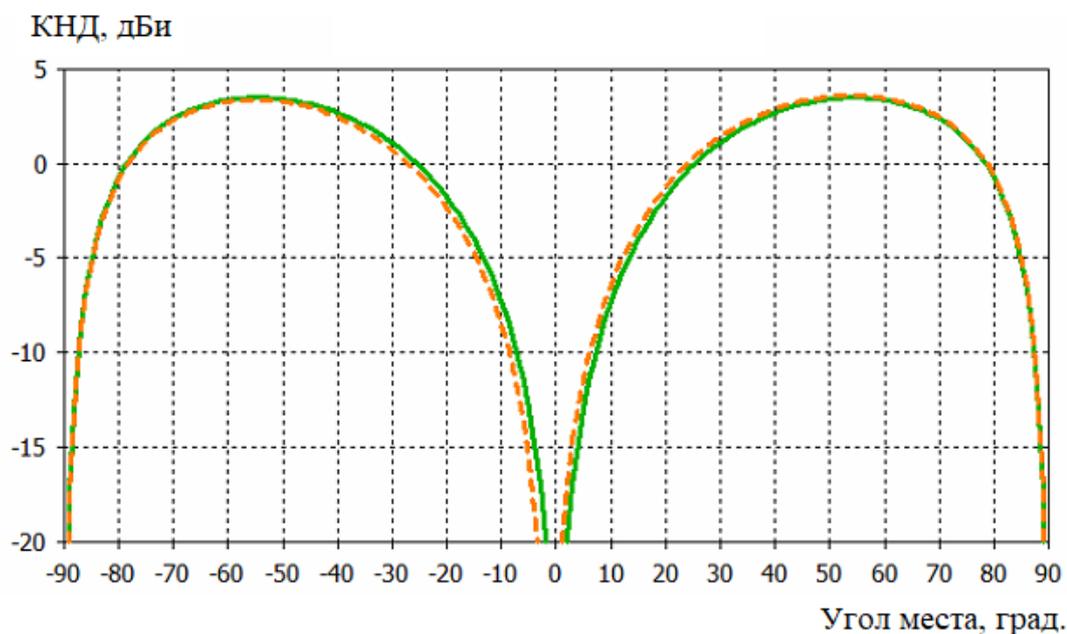


Рис. 3.12. Диаграммы направленности в верхнем полупространстве (в воздухе) патч-антенны с метаматериальной подложкой, расположенной в бассейне с гранитным щебнем, окруженным грунтом со всех сторон (рис. 3.8), в угло-местной плоскости при азимуте 0 град. (штриховая линия) и при азимуте 90 град. (сплошная линия) на частоте 48.8 МГц

При отсутствии навала земли сверху бассейна с гранитной крошкой КПД антенны, приблизительно на 4 дБ выше, рис. 3.13.

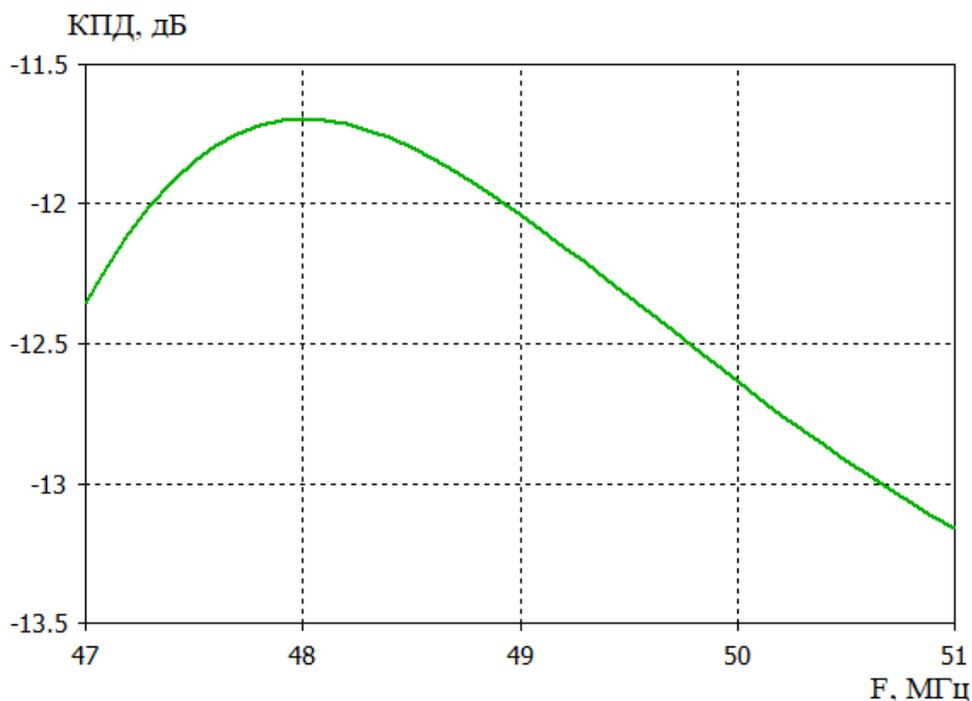


Рис. 3.13. Частотная зависимость КПД патч- антенны с метаматериальной подложкой с диэлектрической основой в виде материала FR-4 ($\epsilon_r = 4.3$; $tg(\delta_3) = 0.025$); антенна расположена в центре бассейна с гранитной крошкой ($\epsilon_{r \text{эфф.}} = 3$; $tg(\delta_3) = 0.03$) с размерами $3.2 \times 3.2 \times 2.1 \text{ м}^3$; верхняя поверхность бассейна находится на одном уровне с поверхностью грунта ($\epsilon_{r \text{эфф.}} = 8$; $\sigma = 0.005 \text{ См/м}$)

Был изготовлен макет патч- антенны с метаматериальной подложкой и основанием из пеноплекса, рис. 3.14. Размеры антенны указаны на рис. 3.15-3.17.

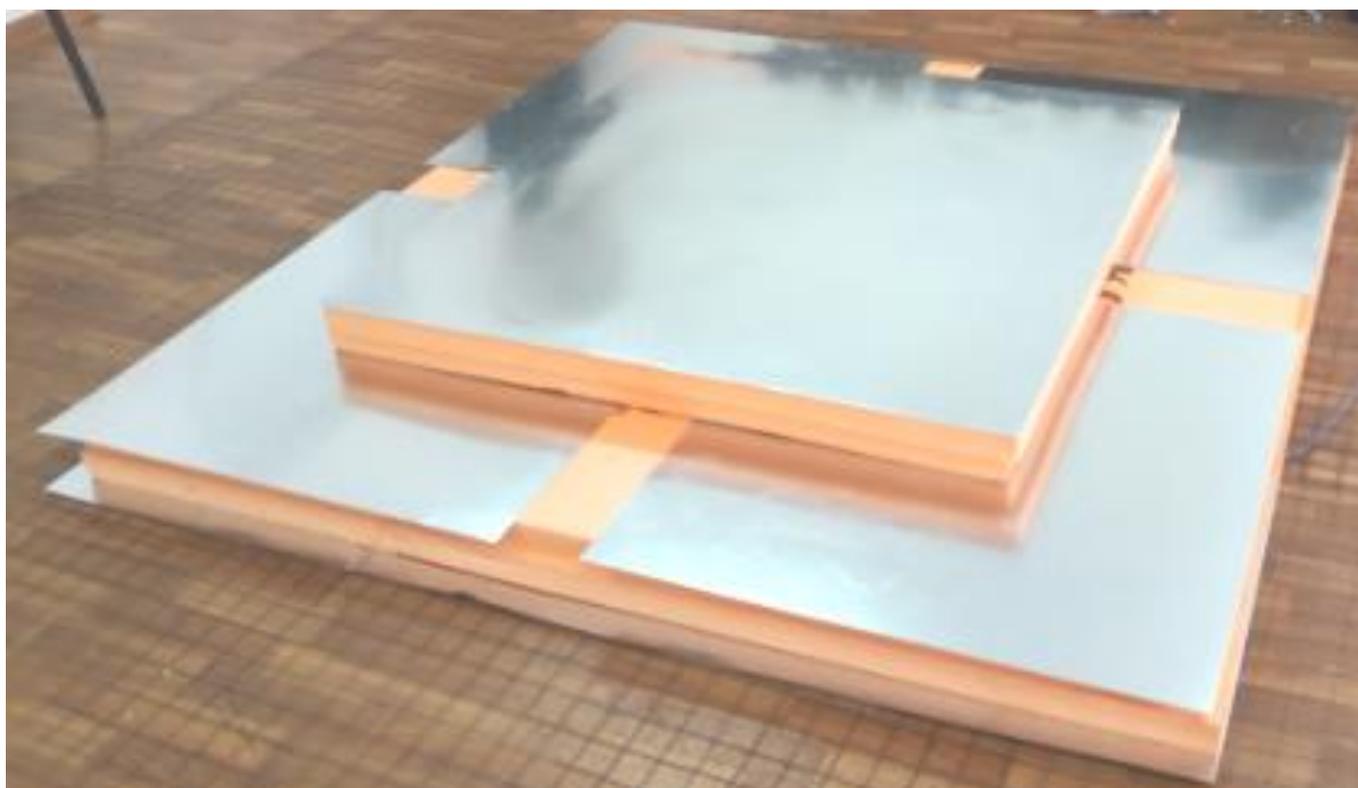


Рис. 3.14. Макет патч- антенны с метаматериальной подложкой и основанием из пеноплэкса

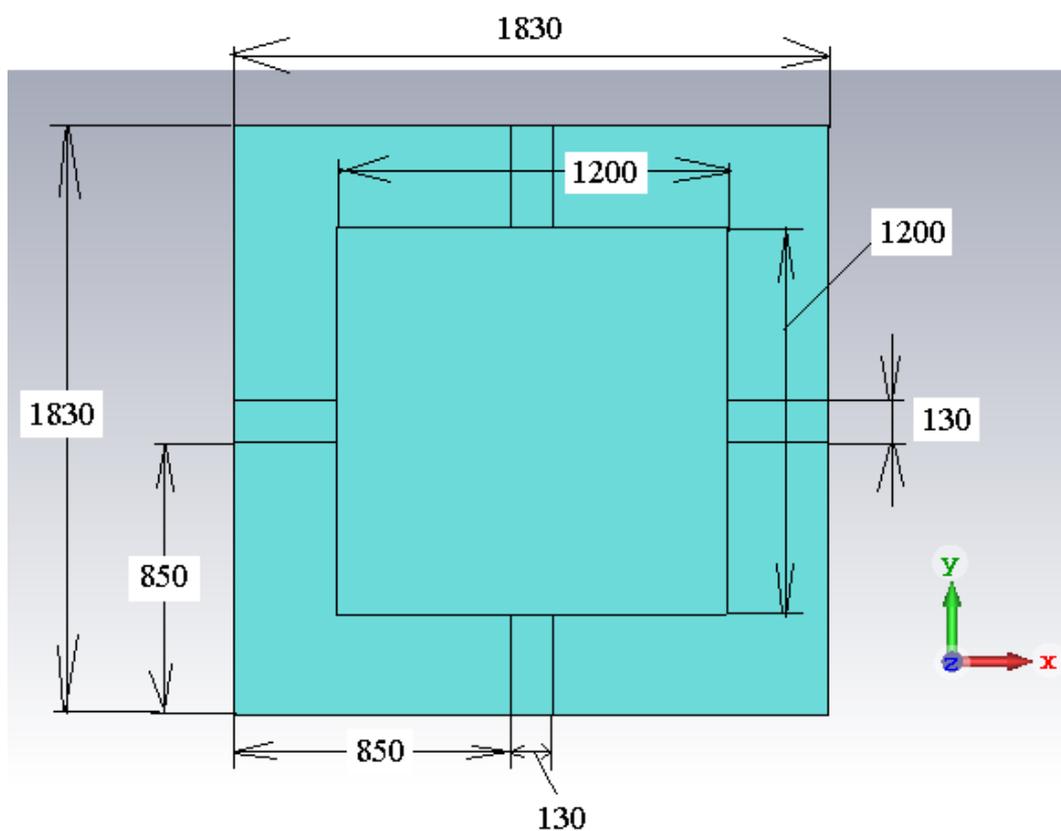


Рис. 3.15. Размеры патч- антенны с метаматериальной подложкой и основанием из пеноплэкса

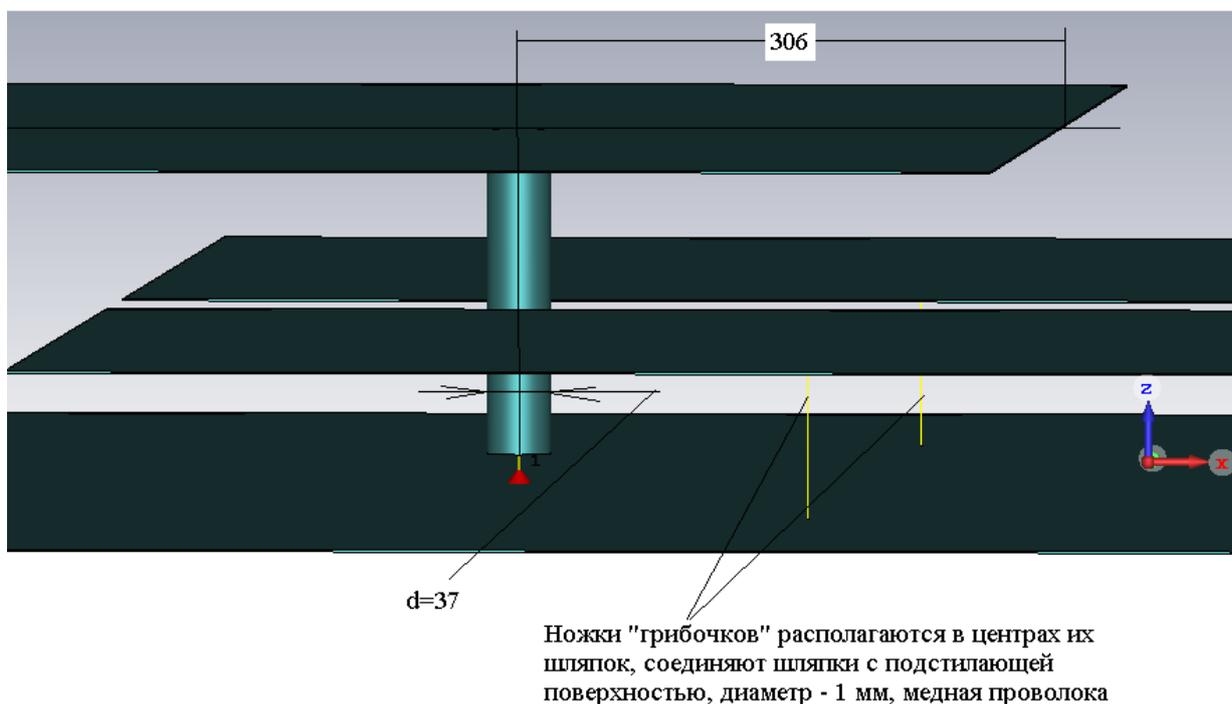


Рис. 3.16. Запитка патч- антенны от коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом

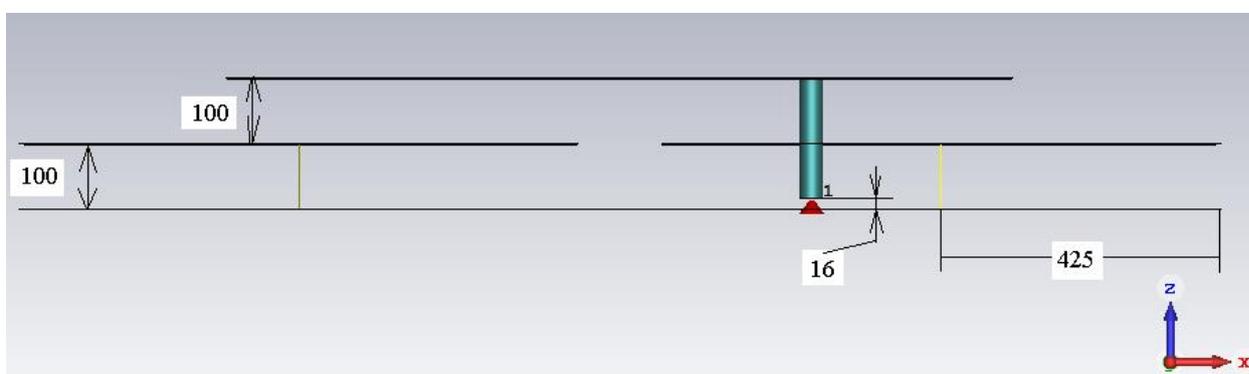


Рис. 3.17. Вид сбоку. Высота антенны – 200 мм (2 слоя строительной пены по 100 мм толщиной каждая)

В ходе проектирования учитывалось, что уменьшение размеров антенного устройства, в соответствии с критерием Чу-Харрингтона [92-98], ведет к увеличению потерь и сужению полосы рабочих частот, однако был выбран компромисс между сравнительно небольшим увеличением потерь, сужением полосы рабочих частот и уменьшением габаритных размеров устройства.

3.2. Натурные экспериментальные исследования в полевых условиях подземной патч- антенны с метаматериальной подложкой

Для проверки основных характеристик изготовленного макета антенны патч- типа с метаматериальной подложкой (рис. 3.14) были проведены ее сравнительные испытания в полевых условиях с антенной типа «четвертьволновый штырь над подстилающей поверхностью в виде стальной сетки» (которая, по условиям технического задания, является эталоном).

Испытания проводились 23 мая 2019 года на поле, расположенном, приблизительно в 20 километрах от г. Воронежа. Грунт в районе испытаний – чернозем на глубину 55-70 см, глубже – глина. Влажность грунта – средняя, три дня назад прошел интенсивный дождь.

Схема проведения испытаний основывалась на использовании метода сравнения исследуемой антенны с эталонной антенной. На расстоянии около 70 метров относительно исследуемой антенны располагался генератор синусоидальных сигналов с выходной мощностью около 15 дБмВт с антенной штыревого типа.

Патч- антенна (рис. 3.14) находилась поочередно в одном из следующих состояний, и в каждом состоянии проводилось измерение ее параметров:

- антенна располагалась на земной поверхности;
- антенна располагалась в грунтовой полости в форме прямоугольного параллелепипеда глубиной 0.5 м и значениями ширины в двух ортогональных направлениях 2.5 м;
- антенна располагалась в грунтовой полости в форме прямоугольного параллелепипеда глубиной 0.5 м и значениями ширины в двух ортогональных направлениях 2.5 м, сверху полость с антенной засыпана грунтом вровень с земной поверхностью, высота грунта над антенной составляла около 0.3 м;
- антенна располагалась в грунтовой полости в форме прямоугольного параллелепипеда глубиной 0.5 м и значениями ширины в двух ортогональных направлениях 2.5 м, сверху полость с антенной засыпана грунтом с возвышением высотой 0.2 м относительно земной поверхности, высота грунта над антенной – 0.5 м;

- антенна располагалась в грунтовой полости в форме прямоугольного параллелепипеда глубиной 0.5 м и значениями ширины в двух ортогональных направлениях 2.5 м, сверху полость с антенной засыпана грунтом с возвышением высотой 0.2 м относительно земной поверхности, высота грунта над антенной – 0.5 м, грунт равномерно полит водой – 40 литров воды на площадь 2.5 м на 2.5 м.

Макет антенны перед проведением испытаний был оклеен полиэтиленовой пленкой. На рис. 3.18 приведено фото макета антенны патч- типа с метаматериальной подложкой, подготовленного к проведению испытаний. На дне полости в грунте была расстелена стальная сетка с размером ячейки около 50 мм, рис. 3.19. При размещении антенны в полости расстояние от верха антенны до уровня земной поверхности составляло около 0.3 м, рис. 3.20. Возвышение слоя грунта относительно уровня земли составляло около 0.2 м, рис. 3.21.



Рис. 3.18. Макет антенны патч- типа с метаматериальной подложкой в полиэтиленовой пленке перед проведением испытаний



Рис. 3.19. Полость в грунте для размещения патч- антенны. Глубина полости – 0.5 м, ширина в обоих направлениях – 2.5 м. На дне полости расположена стальная сетка с размером ячейки 50 мм



Рис. 3.20. При размещении антенны в полости расстояние от верха антенны до уровня земной поверхности составляло около 0.3 м



Рис. 3.21. Полость с патч- антенной засыпана слоем грунта, возвышение слоя грунта относительно уровня земли составляет 0.2 м, а общая толщина слоя грунта над антенной – 0.5 м

На рис. 3.21 показано фото экрана дисплея векторного анализатора в режиме измерения комплексного входного сопротивления патч- антенны. Вблизи резонансной частоты 42.6 МГц входное сопротивление антенны имеет индуктивный характер; активная часть входного сопротивления составляет около 50.4 Ом.

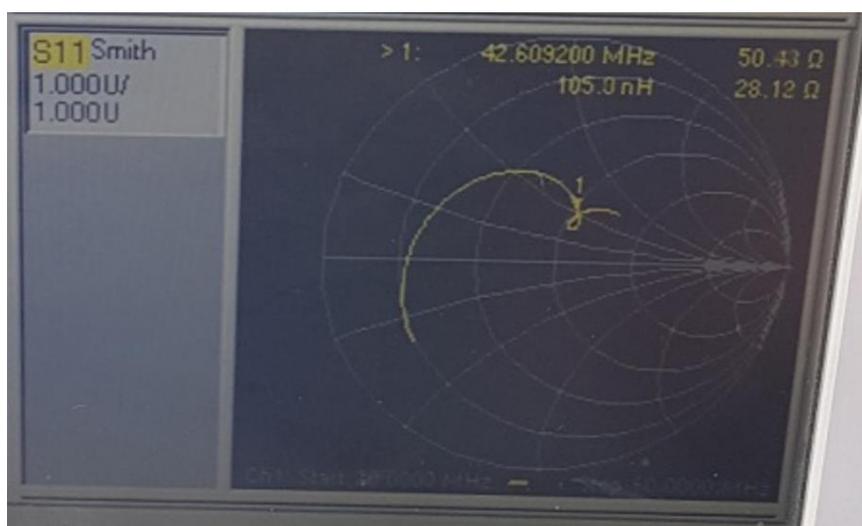


Рис. 3.21. Измерение входного сопротивления патч- антенны при ее расположении в полости в грунте

Результаты исследований сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Результаты измерений макета патч- антенны с метаматериальной подложкой на частоте ее резонанса и эталонной антенны

Четвертьволновый штырь над металлической сеткой размерами $4 \times 4 \text{ м}^2$ (эталонная антенна)		Патч- антенна с метаматериальной подложкой		Разница коэффициентов усиления патч-антенны и эталонной антенны, дБ
КСВН	Мощность принятого сигнала, дБмВт	КСВН	Мощность принятого сигнала, дБмВт	
Патч- антенна лежит на поверхности грунта				
1.21	-57.2	1.71	-56.5	+ 0,7
Патч- антенна лежит на металлической сетке на дне полости, полость не засыпана грунтом				
1.21	-57.2	1.75	-61.5	-4.3
Патч- антенна лежит на металлической сетке на дне полости, полость засыпана грунтом вровень с земной поверхностью				
1.21	-57.2	2.5	-67.0	-9.8
Патч- антенна лежит на металлической сетке на дне полости, полость засыпана грунтом на 0.2 м выше уровня земной поверхности				
1.21	-57.2	2.2	-65.1	-7.9
Патч- антенна лежит на металлической сетке на дне полости, полость засыпана грунтом на 0.2 м выше уровня земной поверхности, грунт полит водой из расчета 40 литров на площадь $2.5 \times 2.5 \text{ м}^2$				
1.21	-57.2	2.18	-66.2	-9.0

Из таблицы 1 следует, что во всех рассмотренных случаях, включающих отсутствие и наличие навала земли над патч- антенной, ее входные характеристики изменяются несущественно; коэффициент усиления патч- антенны ниже коэффициента усиления четвертьволнового штыря над металлической сеткой не более, чем на 9.8 дБ, что соответствует требованиям, предъявляемым к подземным антеннам УКВ диапазона волн, используемым в системах управления.

Условия испытаний были специально выбраны наиболее жесткими, а именно – грунт насыпался непосредственно на верх патч- антенны; в случае размещения антенны в полости, заполненной диэлектриком с относительно низкими потерями (в частности – гранитным щебнем) коэффициент полезного действия будет существенно выше, что подтверждают данные электродинамического моделирования.

В заключение сформулируем основные этапы разработанной методики проектирования подземной патч- антенны УКВ с метаматериальной подложкой:

- построение физической модели антенны с идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхностью, расположенной в воздухе, выбор параметров подложки и размеров «грибков», расчет основных характеристик антенны;

- параметрический синтез патч- антенны с метаматериальной подложкой, расположенной в бассейне с гранитной крошкой, с учетом конечности размеров металлической подстилающей поверхности, выбор размеров бассейна и подстилающей поверхности, при которых основные характеристики антенны будут в минимальной степени изменяться при вариации параметров грунта, при заданных ограничениях на габаритные размеры антенны;

- изготовление макета антенны, измерение ее основных характеристик и, при необходимости – верификация физико-математической модели.

Аналогичная методика была использована и при проектировании подземных УКВ антенн резонаторно-щелевого типа со щелями «Г»- образной формы, подраздел 3.3, а также – при проектировании вариантов УКВ антенны на основе спирали Архимеда с экраном, глава 4.

3.3. Методика проектирования подземных УКВ антенн резонаторно-щелевого типа со щелями «Г»- образной формы

При рассмотрении перспективных путей построения подземных антенн УКВ диапазона волн рассматривались два основных подхода:

- использование жесткой конструкции антенны, габаритные размеры которой позволяли бы осуществлять ее сборку в заводских условиях, обеспечивали ее надежную герметизацию от влаги;

- использование высокопрочных коаксиальных кабелей, прошедших испытания в условиях, эквивалентных их нахождению в грунте вблизи источника мощных механических воздействий; в качестве материала, изолирующего антенну от непосредственного контакта с грунтом, использовать гранитный или мраморный щебень, незначительно накапливающий влагу.

В рамках реализации первого подхода, в качестве одного из перспективных вариантов подземной антенны УКВ диапазона рассматривалась антенна резонаторно-щелевого типа со щелями Г- образной формы. Один из вариантов антенны резонаторно-щелевого типа с 4 щелями в виде буквы «Г» показан на рис. 3.22.

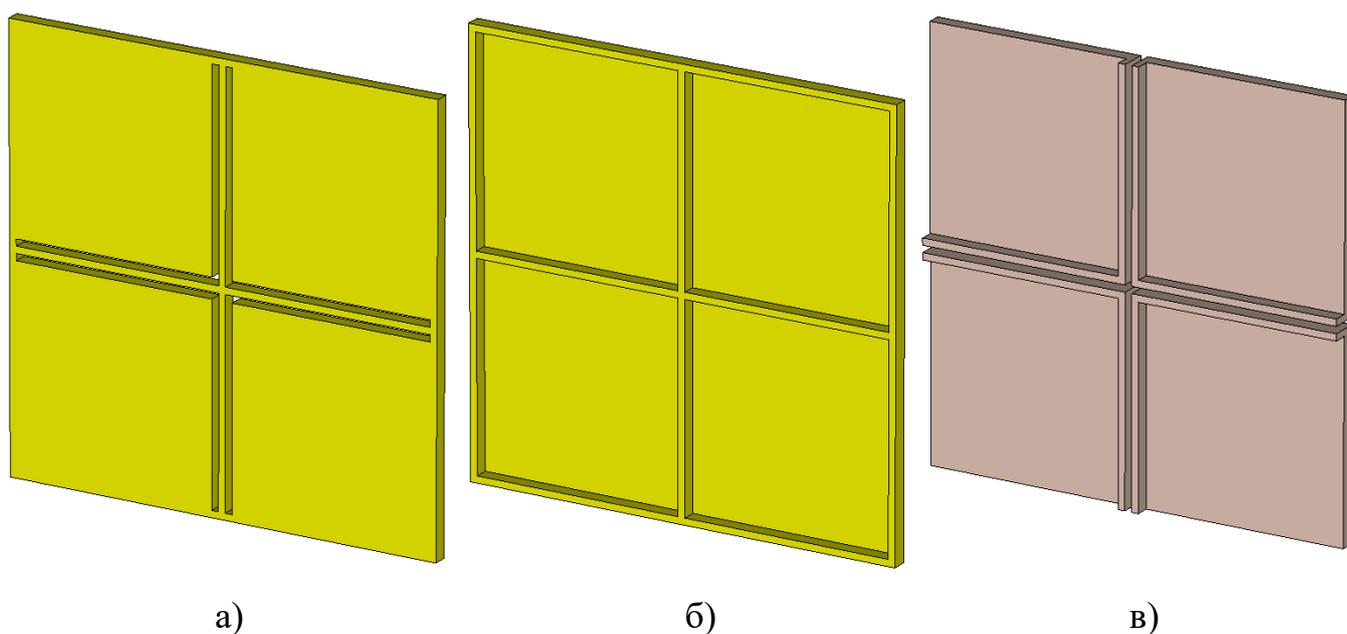


Рис. 3.22. Подземная антенна с 4 щелями: а) – плита со щелями; б) – основание, полости резонаторов; в) – диэлектрическое заполнение резонаторов

В модели в качестве материала заполнения полостей резонаторов и щелей использовался материал FR-4 (стеклотекстолит, $\epsilon_r = 4.3$; $tg(\delta_d) = 0.025$). Над антенной располагался слой изолятора в виде стеклотекстолитовой плиты толщиной 100 мм. Запитка антенны – квадратурная, осуществляется с помощью четырех коаксиальных кабелей (50 Ом), подключаемых вблизи внешних концов щелей.

Габаритные размеры антенны составляют $2600 \times 2600 \times 175$ мм³; центральная частота функционирования – 35.5 МГц, ширина полосы частот, ограниченная значением коэффициента отражения -10 дБ, составляет около 0.3 МГц, рис. 3.23. Потери в материалах антенны составляют около 0.6 дБ, рис. 3.24.

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° , рис. 3.25.

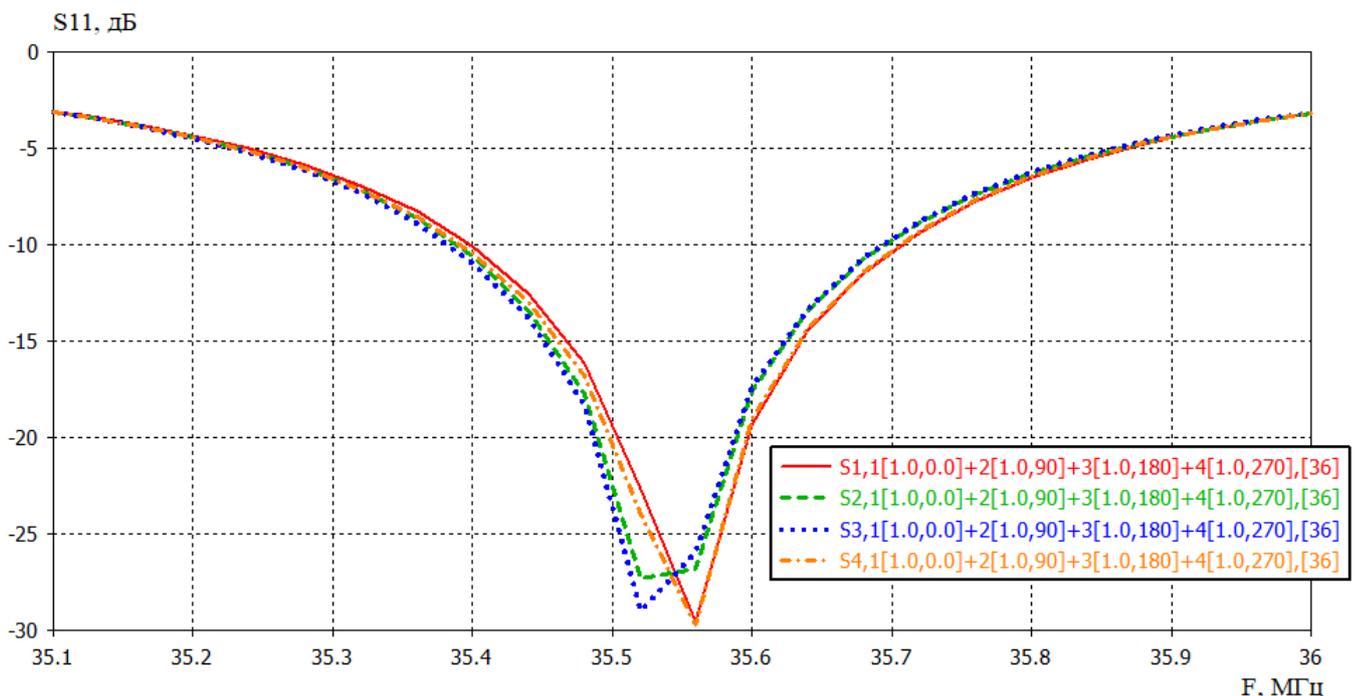


Рис. 3.23. Коэффициент отражения от входа резонаторно-щелевой антенны при квадратурной запитке ее щелей (значения фаз 0, 90, 180 и 270 градусов соответствуют частоте 36 МГц). Антенна расположена в свободном пространстве (подстилающая поверхность и грунт отсутствуют в модели)

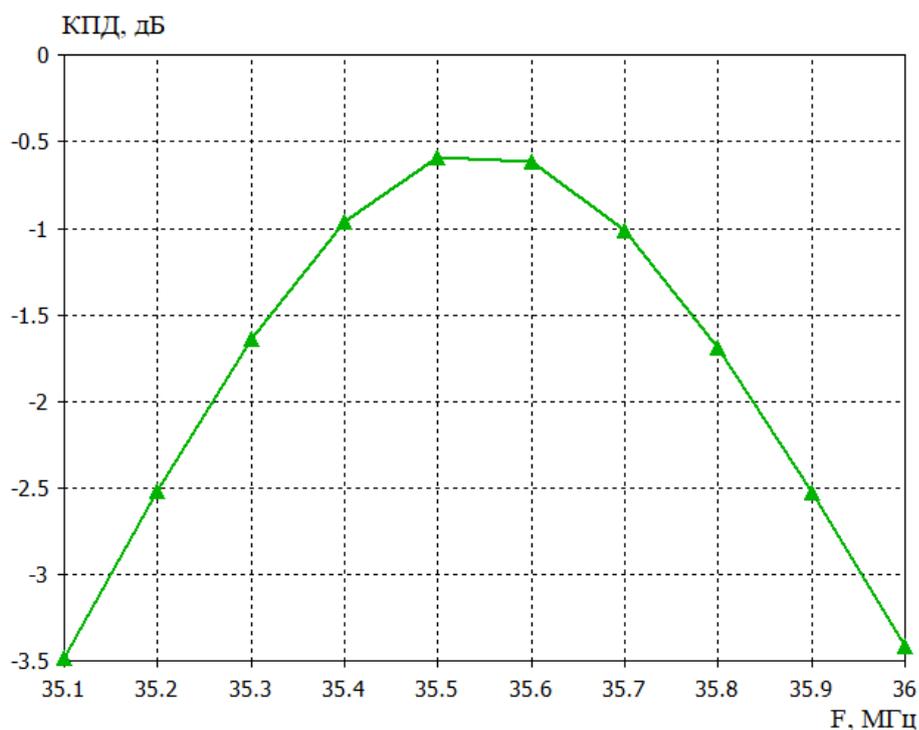


Рис. 3.24. Коэффициент полезного действия резонаторно-щелевой антенны при квадратурной запитке ее щелей (значения фаз 0, 90, 180 и 270 градусов соответствуют частоте 36 МГц). Антенна расположена в свободном пространстве (подстилающая поверхность и грунт отсутствуют в модели)

На рис. 3.25 показаны диаграммы направленности антенны в угло-местной плоскости при значениях азимута 0 и 90 градусов. Диаграмма направленности антенны в режиме квадратичной запитки ее четырех щелей близка к фигуре вращения относительно нормали к ее поверхности, рис. 3.26.

Выяснено, что при навале слоя грунта с $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005$ См/м толщиной 0.5 м суммарные потери (с учетом потерь в грунте) составляют около 10 дБ, рис. 3.27. При навале грунта резонансная частота смещается вниз, приблизительно с 35.5 МГц, в случае отсутствия грунта, до 34.2 МГц, в случае его наличия. Компенсировать изменение входного сопротивления антенны, при изменении материальных параметров грунта, а также – при навале слоя грунта над антенной, можно путем подключения четырех коаксиальных кабелей, питающих четыре щели, на различном расстоянии от концов щелей. Тем не менее, необходимость использования подобного

автоматического согласующего устройства при эксплуатации антенны является ее очевидным недостатком.

Было выяснено, что у резонаторно-щелевой антенны с одной Г-образной щелью, размещенной над бесконечно проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхностью, диаграмма направленности имеет вид половины тороида вращения, рис. 3.28.

Резонаторно-щелевая антенна с двумя щелями Г-образной формы, запитанными в квадратуре, размещенная над идеально проводящей и бесконечно протяженной полуплоскостью, характеризуется диаграммой направленности игольчатой формы, рис. 3.29.

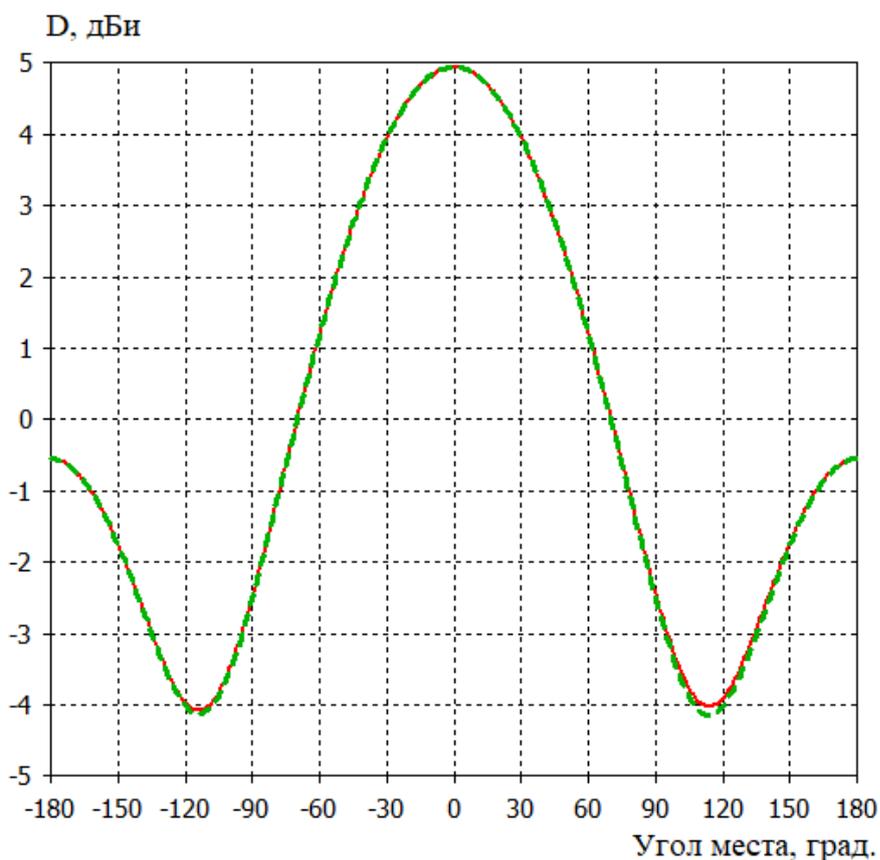


Рис. 3.25. Диаграммы направленности резонаторно-щелевой антенны в угло-местной плоскости при значениях азимута 0 и 90 градусов, квадратурная запитка ее щелей (значения фаз 0, 90, 180 и 270 градусов соответствуют частоте 36 МГц). Антенна расположена в свободном пространстве (подстилающая поверхность и грунт отсутствуют в модели)

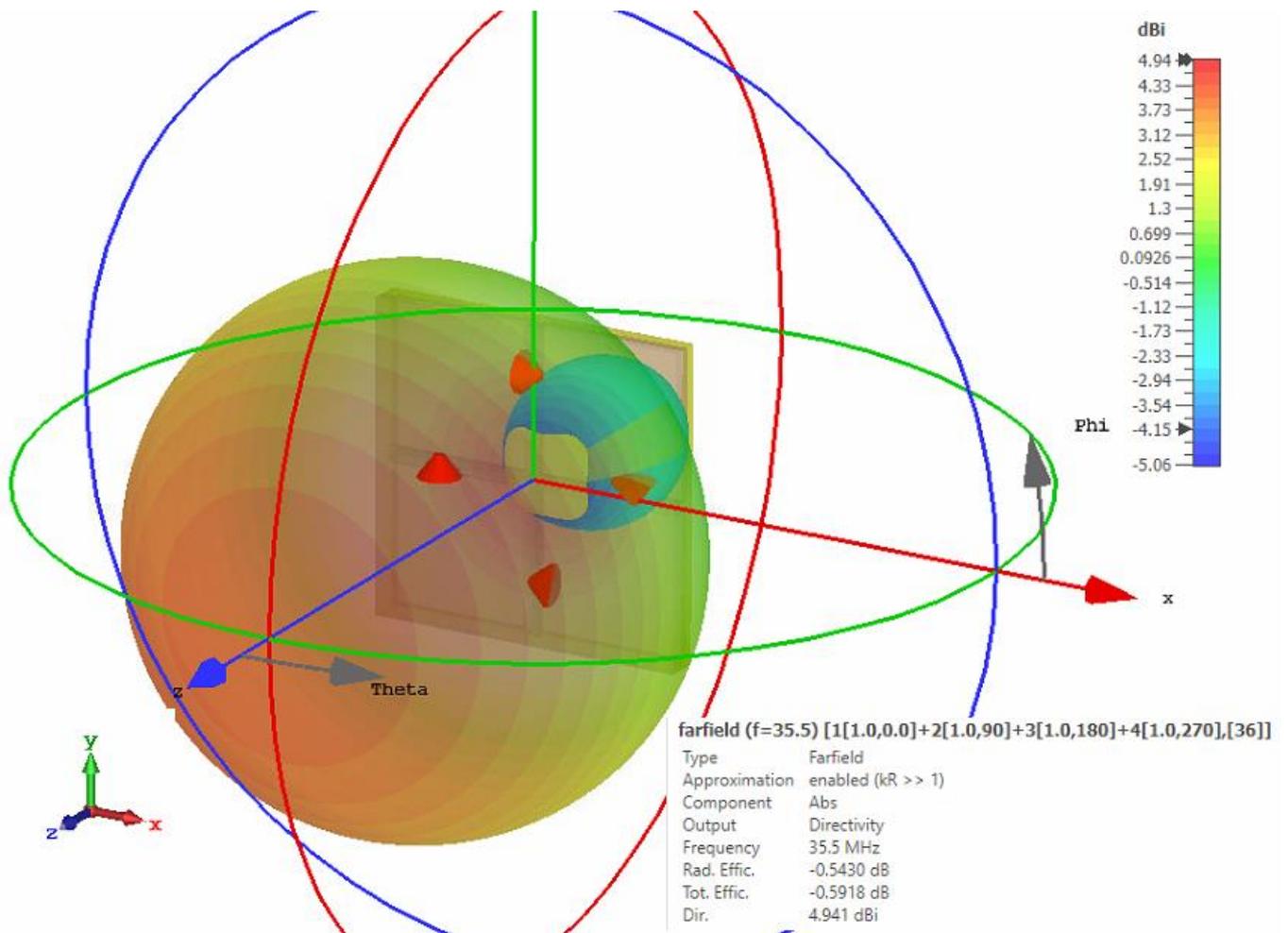


Рис. 3.26. Диаграмма направленности резонаторно-щелевой антенны в объеме при значениях азимута 0 и 90 градусов, квадратурная запитка ее щелей (значения фаз 0, 90, 180 и 270 градусов соответствуют частоте 36 МГц). Антенна расположена в свободном пространстве (подстилающая поверхность и грунт отсутствуют в модели)

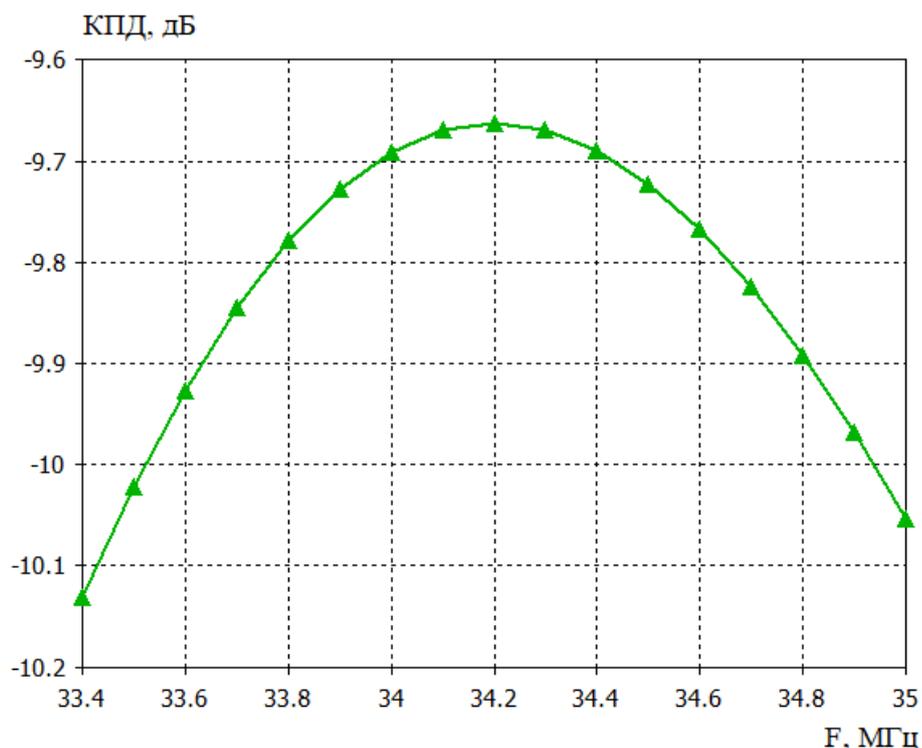


Рис. 3.27. Коэффициент полезного действия резонаторно-щелевой антенны при квадратурной запитке ее щелей (значения фаз 0, 90, 180 и 270 градусов соответствуют частоте 36 МГц). Антенна расположена в грунте с параметрами $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$, толщина слоя грунта над антенной составляет 0.5 м

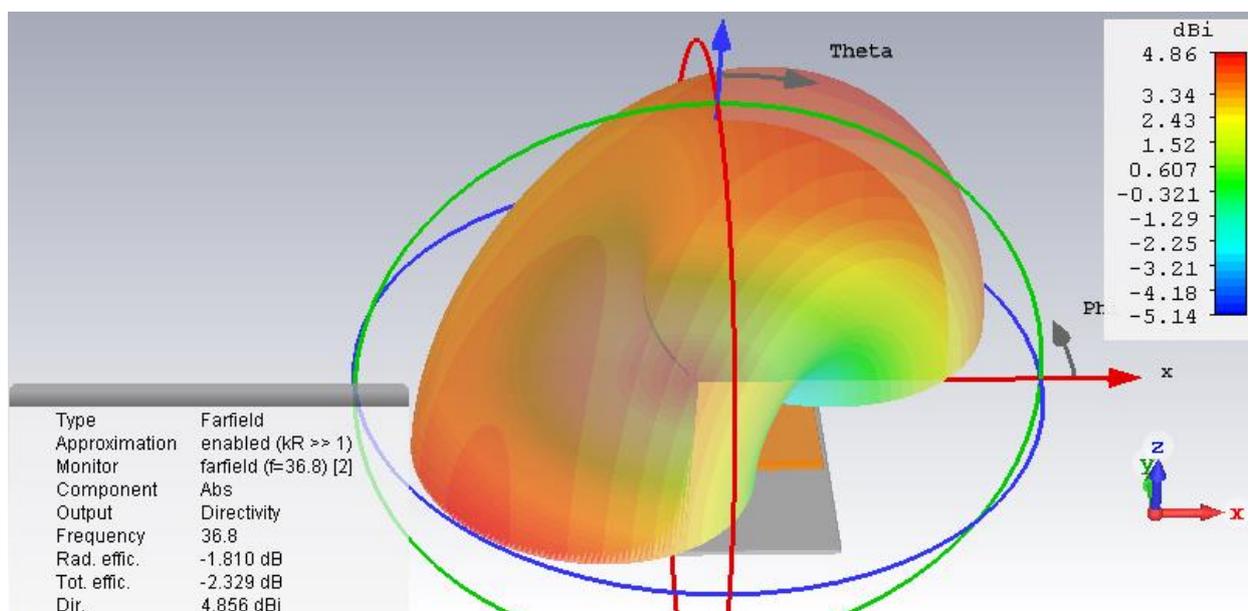


Рис. 3.28. Диаграмма направленности резонаторно-щелевой антенны с одной щелью Г-образной формы, размещенной над идеально проводящей и бесконечно протяженной полуплоскостью

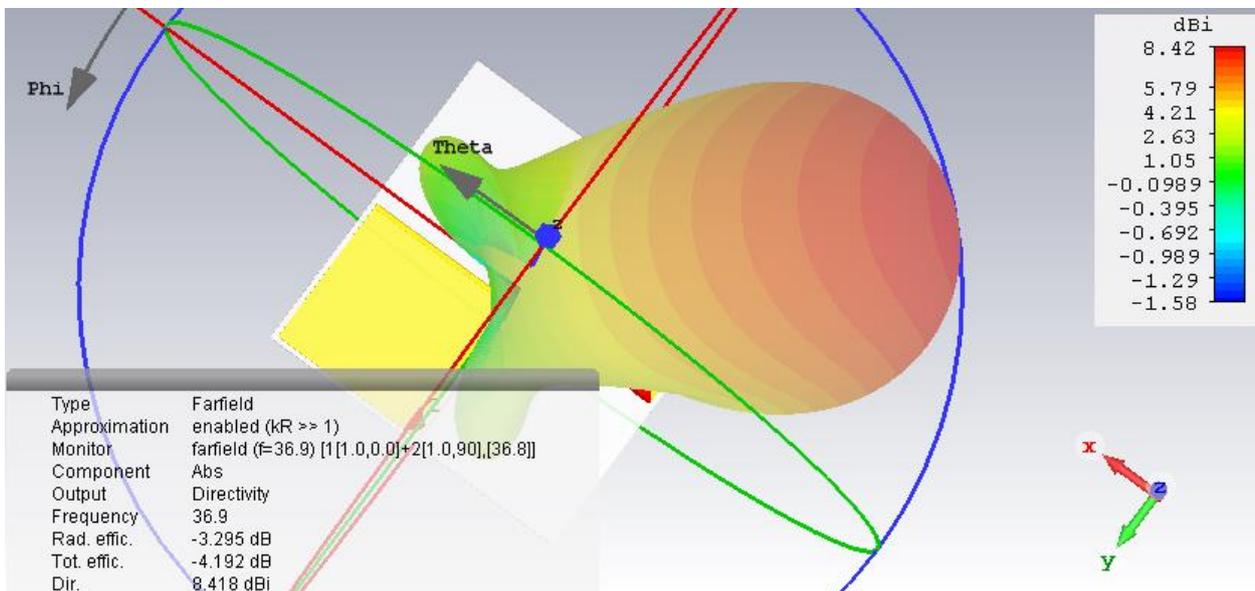
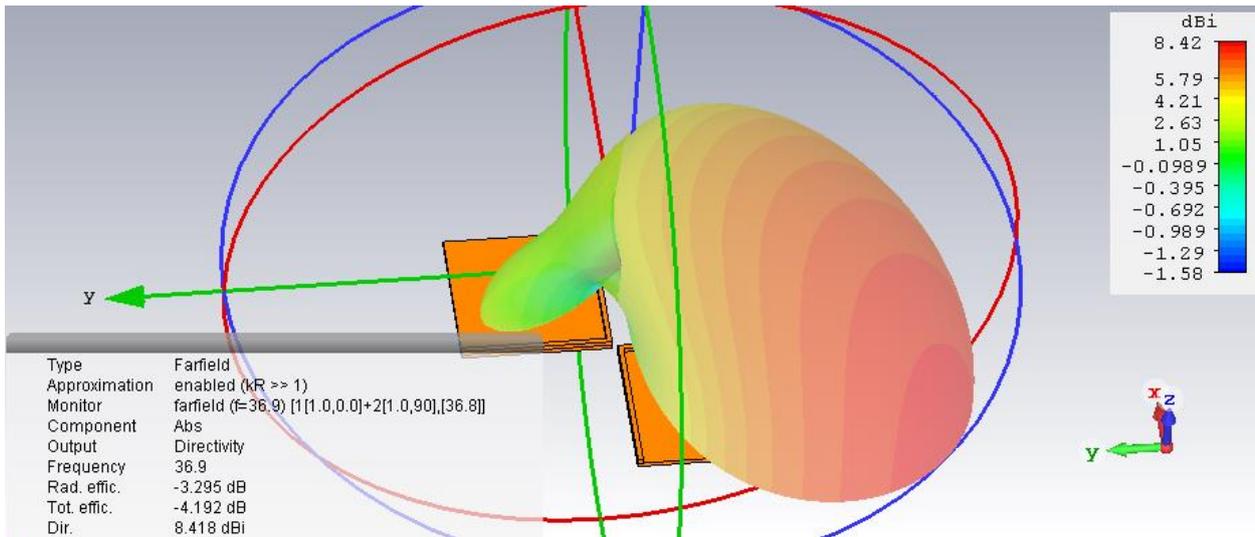


Рис. 3.29. Диаграмма направленности резонаторно-щелевой антенны с двумя щелями Г-образной формы, запитанной в квадратуре, размещенной над идеально проводящей и бесконечно протяженной полуплоскостью

В заключение отметим, что в настоящем подразделе 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.

3.4. Выводы по третьей главе

Подводя итоги исследований, проведенных в третьей главе диссертации, перечислим следующие полученные в ней результаты.

1. 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.

2. Натурные экспериментальные исследования подземной патч- антенны с метаматериальной подложкой показали, что во всех рассмотренных случаях, включающих отсутствие и наличие навала земли над патч- антенной, ее входные характеристики изменяются незначительно; коэффициент усиления патч- антенны ниже коэффициента усиления четвертьволнового штыря над металлической сеткой не более, чем на 9.8 дБ, что соответствует требованиям, предъявляемым к подземным антеннам УКВ диапазона волн, используемым в системах управления. При этом условия испытаний были специально выбраны наиболее жесткими, а именно – грунт насыпался непосредственно на верх патч- антенны; в случае размещения антенны в полости, заполненной диэлектриком с относительно низкими потерями (в частности – гранитным щебнем) коэффициент полезного действия будет существенно выше, что подтверждают данные электродинамического моделирования.

3. 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. Выяснено, что в случае навала слоя грунта с материальными параметрами $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$ и толщиной 0.5 м, суммарные потери в подземной антенне с квадратурной запиткой четырех щелей (с учетом потерь в грунте) составляют около 10 дБ.

4. Методика проектирования подземной антенны УКВ диапазона в виде двухзаходной спирали Архимеда с экраном

Основные принципы и подходы к построению подземных антенн изложены в монографии Г.А. Лаврова и А.С. Князева [1], а также – в двухтомной монографии Р. Кинга и Г. Смита [2]. Согласно рекомендациям, изложенным в [1, 2], предпочтительной поляризацией излучения подземных антенн является горизонтальная поляризация, т.к. касательная составляющая напряженности электрической компоненты электромагнитного поля на границе почвы и воздуха является непрерывной, что позволяет уменьшить отражения волн от границы раздела сред.

Другим фундаментальным принципом является уменьшение потерь мощности в почве, для реализации чего используются различные подходы: антенна помещается в среду с относительно малыми электрическими потерями (на практике в этих целях широко используется полимербетон – композитный материал на основе цемента, гранитного щебня и эпоксидной смолы); использование электрически экранированных и электрически малых рамочных антенн позволяет существенно уменьшить потери мощности в среде с высокой проводимостью, даже – в воде, за счет того, что в ближней зоне излучателя магнитного типа, каковым является малая экранированная рамка, энергия магнитного поля намного превышает энергию электрического поля; важным также является увеличение диаметра проводников, или – использование системы разветвленных проводников, что приводит к уменьшению значения волнового сопротивления эквивалентной линии передачи и снижению затухания волн.

В работах [1, 2, 5-90] рассмотрены способы построения подземных излучателей, рассмотрены пути повышения их эффективности; работы [44-46] посвящены вопросам контроля параметров подземных защищенных антенн и особенностям их эксплуатации; в работах [12, 50, 84, 88] рассмотрена методика численного электродинамического моделирования подземных антенн.

Целью следующего подраздела является разработка вариантов конструкции подземной антенны УКВ диапазона на основе жесткого коаксиального кабеля, расположенной в бассейне, который засыпан гранитным щебнем таким образом, чтобы над

плечами спирали слой щебня составлял от 0.5 метра до 1 метра. Выбор гранитного щебня в качестве конструктивного материала обусловлен тем обстоятельством, что, при наличии водостока в бассейне, антенна при любой погоде не накапливает существенного количества жидкости, благодаря чему характеризуется предсказуемой величиной коэффициента полезного действия. Данный выбор конструктивного материала является альтернативой использованию полимербетона, который, как показывает практика, через 10-15 лет эксплуатации, впитывает существенное количество жидкости, в результате чего существенно снижается значение коэффициента полезного действия антенны. Кроме того, использование гранитного, или – мраморного щебня, имеет другой положительный аспект – устойчивость антенной системы к импульсным механическим воздействиям высокой интенсивности.

4.1. Исследование и разработка вариантов реализации подземной антенны УКВ диапазона в виде двухзаходной спирали Архимеда с экраном

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.

Рассмотрим подземную антенну в виде двухзаходной спирали Архимеда с шунтовой запиткой, модель которой показана на рис. 4.1.

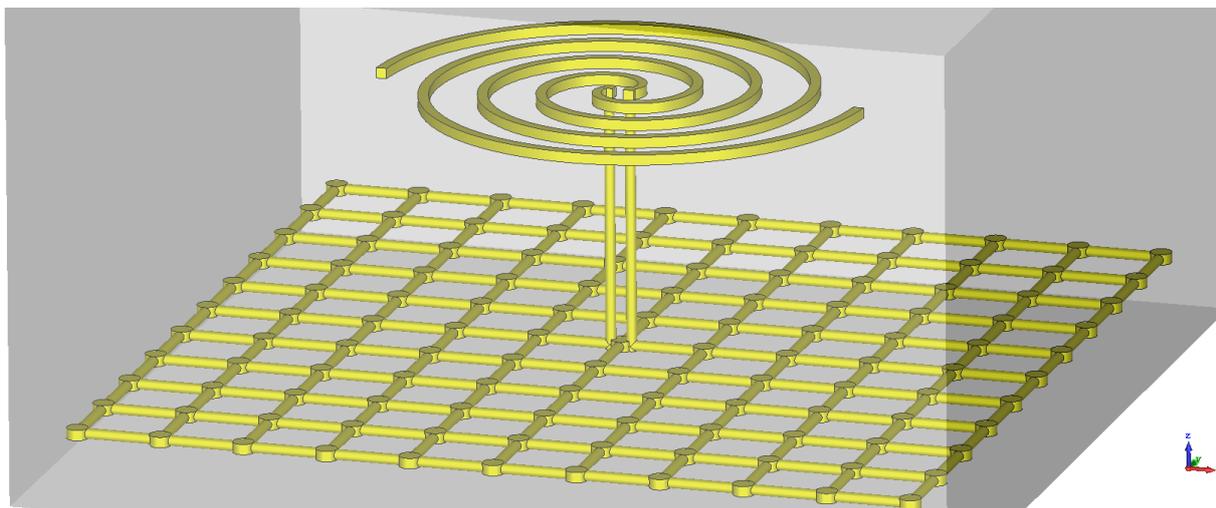


Рис. 4.1. Шунтовой способ запитки двухзаходной подземной спирали Архимеда

Моделирование антенны проводилось с использованием метода конечного интегрирования Вейланда [132-135], при этом параметры антенны были выбраны следующими: размеры бассейна, заполненного гранитным щебнем, составляли $4.5 \times 4.5 \times 2.55 \text{ м}^3$; толщина слоя щебня, насыпанного над плечами спирали, составляла 1 метр; плечи спирали в выбранной модели были изготовлены из медного проводника с квадратным поперечным сечением $50 \times 50 \text{ мм}^2$; значение максимального диаметра спирали составляло 2350 мм; минимальный радиус спирали в точках ее запитки – 25 мм; шаг спирали равен 500 мм; каждое плечо спирали содержит по 2 витка; зазор между спиралью и сетчатым экраном составлял 1170 мм; размеры экрана, состоящего из медных проводников круглого сечения, составляли $4070 \times 4070 \text{ мм}^2$.

Моделирование проводилось в условиях, когда антенное устройство (бассейн с гранитной крошкой является его неотъемлемой частью) расположено в грунте, с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 8$ и проводимостью $\sigma = 0.005 \text{ См/м}$; при этом толщина слоя грунта над антенной (над верхней кромкой бассейна с гранитной крошкой) составляла 0.5 метра.

Для определения эффективной комплексной диэлектрической проницаемости использовалась формула Лихтенекера (2.1) для мелкодисперсной смеси двух диэлектриков – частиц гранитного щебня и воздуха [141].

В модели значение эффективной диэлектрической проницаемости было принято равным $\epsilon_{эфф} = 3.0$, а значение тангенса угла диэлектрических потерь на низких частотах УКВ диапазона было взято равным $tg(\delta_d) = 0.02$.

В предложенной конструкции антенны магистральный коаксиальный кабель является продолжением одного из проводников шунта, соединяющего спираль с экраном. Центральная жила магистрального кабеля соединяется с верхним концом внешнего проводника второго коаксиального кабеля, являющимся вторым проводником шунта. В модели, с целью упрощения, коаксиальные кабели были заменены на сплошные металлические стержни, а для запитки антенны использовался сосредоточенный порт с внутренним сопротивлением 100 Ом.

На рис. 4.2 показана номограмма Вольперта-Смита, на рис. 4.3 – коэффициент отражения от входа спиральной антенны с шунтовым питанием в полосе частот от 30 до 40 МГц, соответствующие волновому сопротивлению фидерной линии 100 Ом.

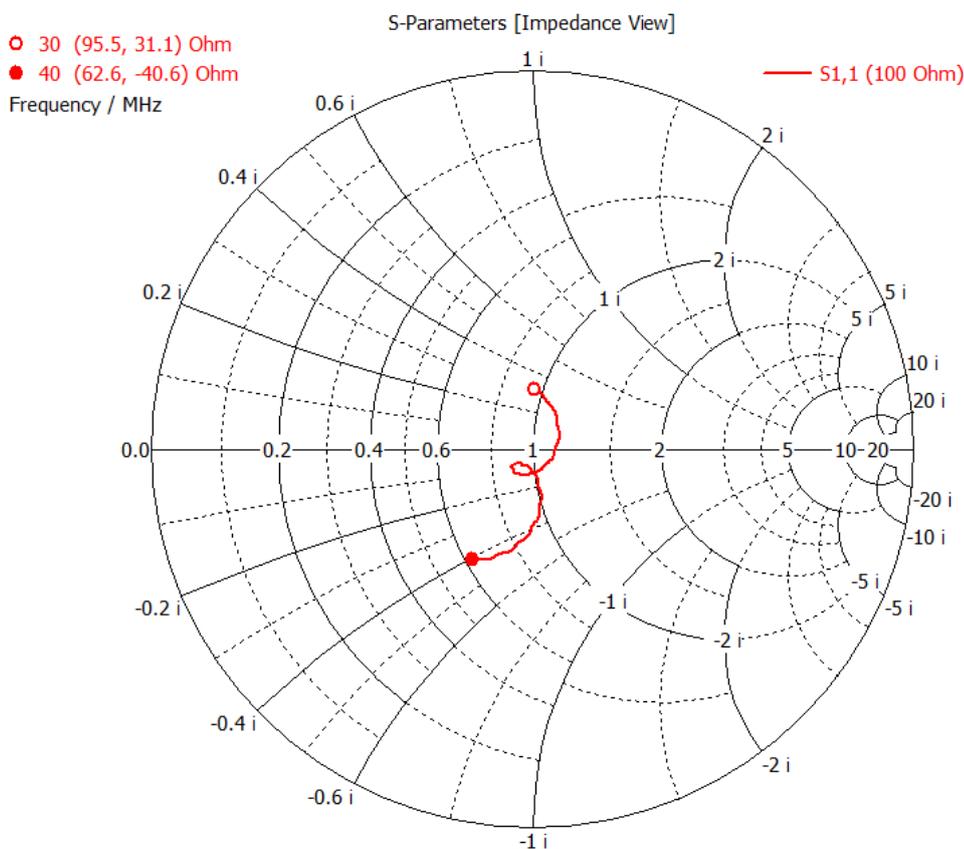


Рис. 4.2. Номограмма Вольперта-Смита в полосе частот 30 – 40 МГц

Частотные зависимости потерь в антенном устройстве с учетом и без учета качества его согласования с фидерной линией приведены на рис. 4.4, при этом полезной мощностью считалась мощность, излучаемая в верхнее полупространство - воздух. Диаграммы направленности в угло-местной плоскости для значений азимута 0 и 90 градусов приведены для значений частот 30, 35 и 40 МГц на рис. 4.5.

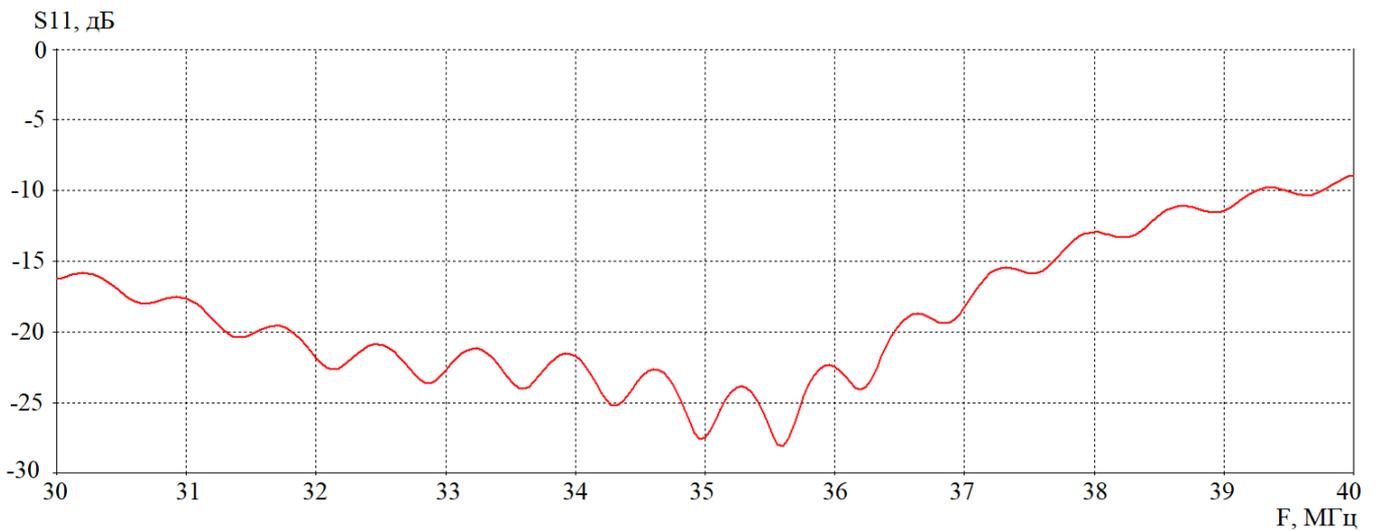


Рис. 4.3. Коэффициент отражения от входа антенны, дБ

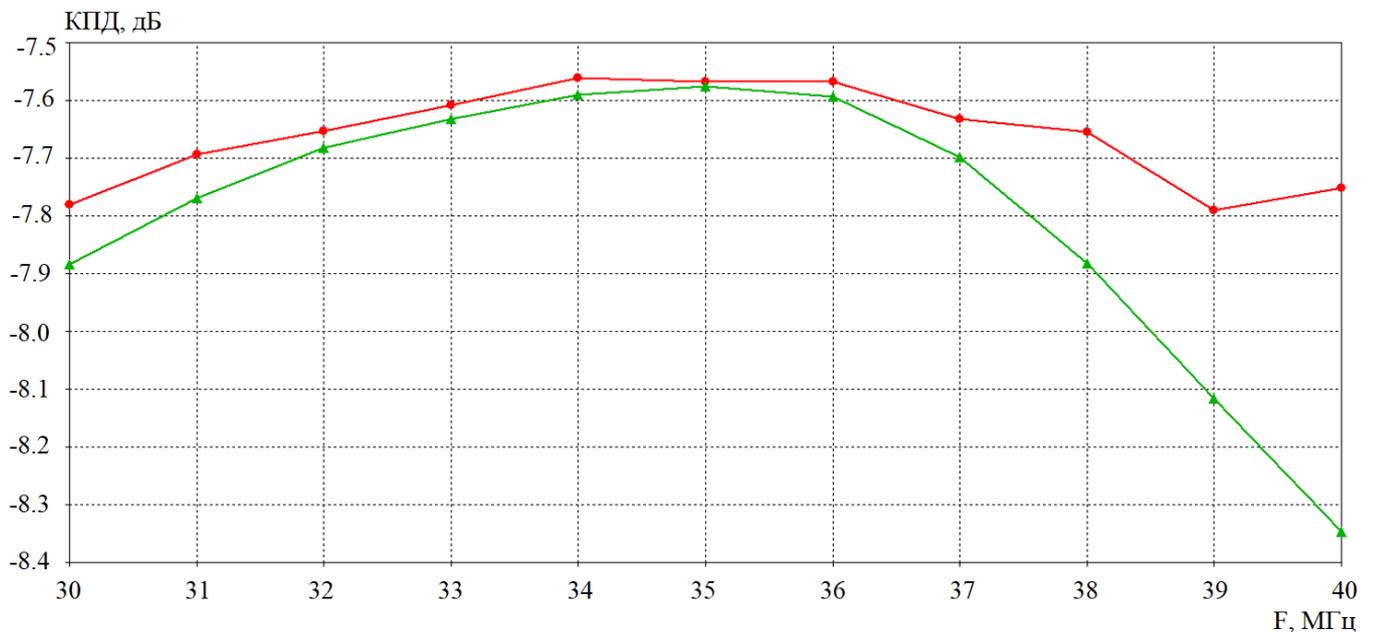
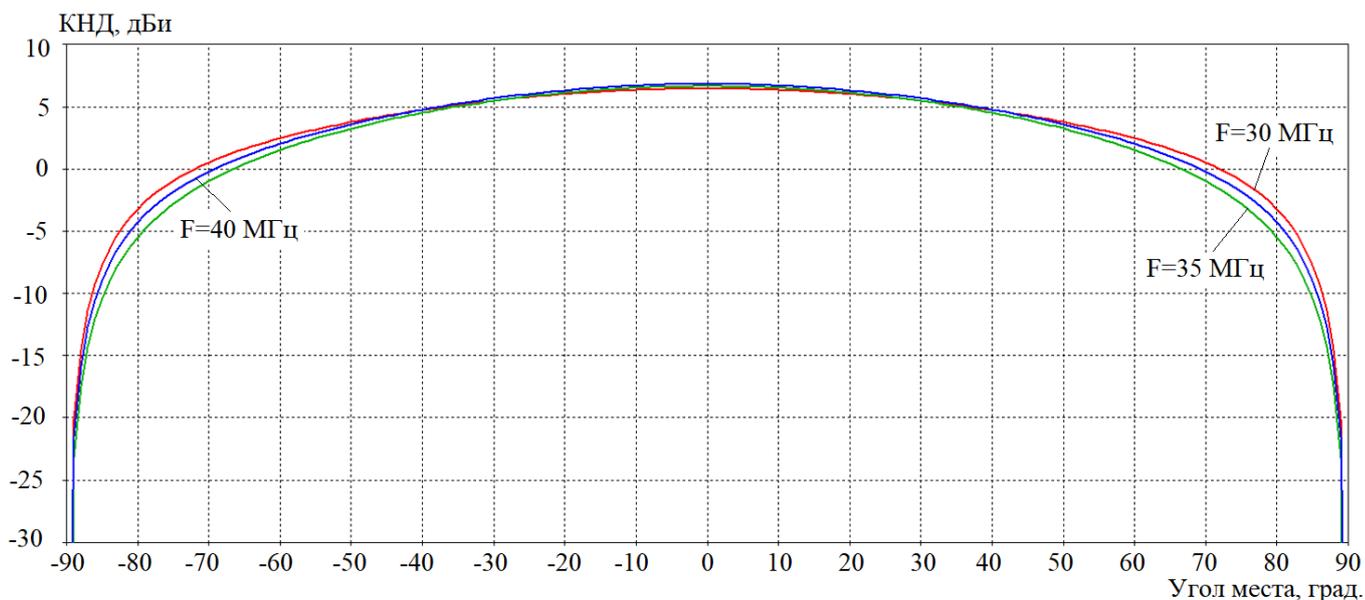
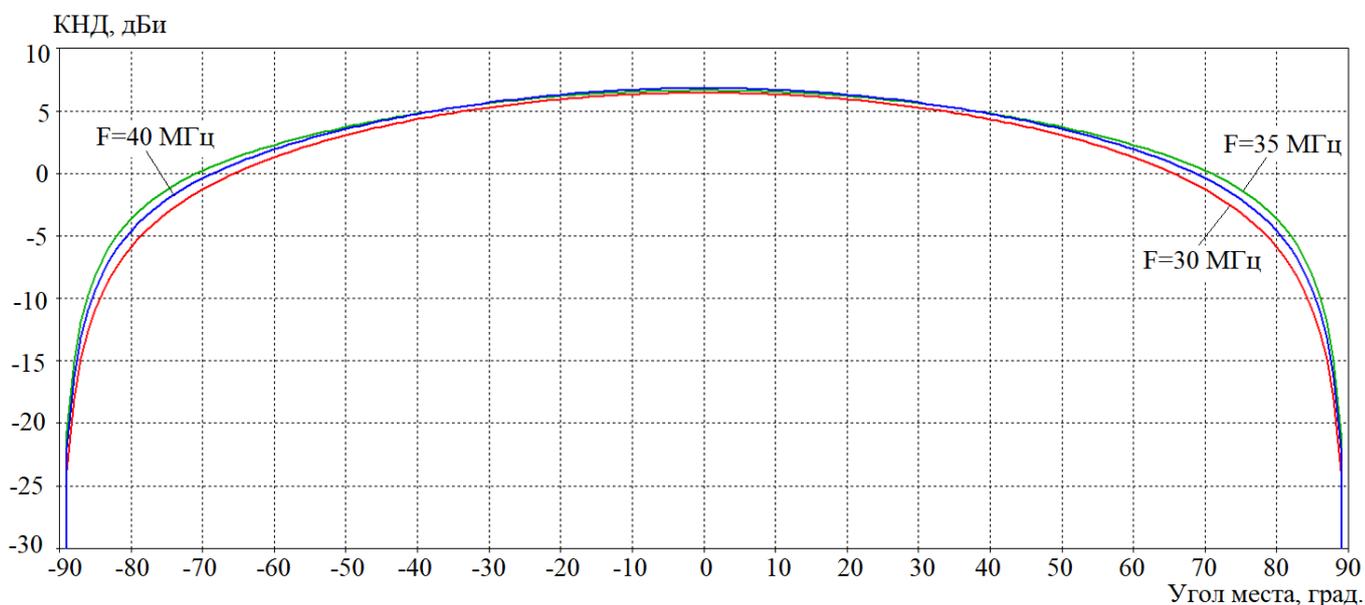


Рис. 4.4. Потери в антенне и окружающей ее поглощающей среде (грунте), дБ, без учета и с учетом согласования



а)



б)

Рис. 4.5. Диаграммы направленности, нормированные по максимальной величине коэффициента направленного действия, в угло-местной плоскости при значениях азимута 0 градусов (а) и 90 градусов (б)

Результаты моделирования показали, что входные характеристики и диаграмма направленности подземной антенны слабо зависят от проводимости (изменяемой в пределах от 0.001 См/м до 0.2 См/м) и относительной диэлектрической проницаемости грунта (изменяемой в пределах от 3 до 13), а также – от толщины слоя грунта, наваленного над антенной; при увеличении проводимости почвы и толщины

слоя ее навала над антенной лишь увеличивались потери, что является абсолютно предсказуемым результатом. Достоинством данного варианта антенны является стабильность качества согласования и направленных свойств при изменении параметров почвы и слоя грунта над антенной, а также – отсутствие необходимости использования автоматического согласующего устройства.

В качестве недостатка двухзаходной спирали Архимеда с шунтовым питанием можно отметить необходимость обеспечения регулярности двухпроводной линии передачи, образующей шунт; при механическом воздействии высокой интенсивности расстояние между проводниками шунта может измениться, что приведет к изменению входных характеристик антенны. Шунт может быть помещен внутри жесткого диэлектрического кожуха с полостями для проводников с целью обеспечения неизменности его геометрии, однако, возникает вопрос о необходимости обеспечения достаточно высокой механической прочности данного устройства.

Одним из способов преодоления данной проблемы является запитка двухзаходной спирали путем подключения плечей спирали к центральным проводникам двух коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом, оболочки которых должны соединяться между собой только в начале и в конце, рис. 4.6.

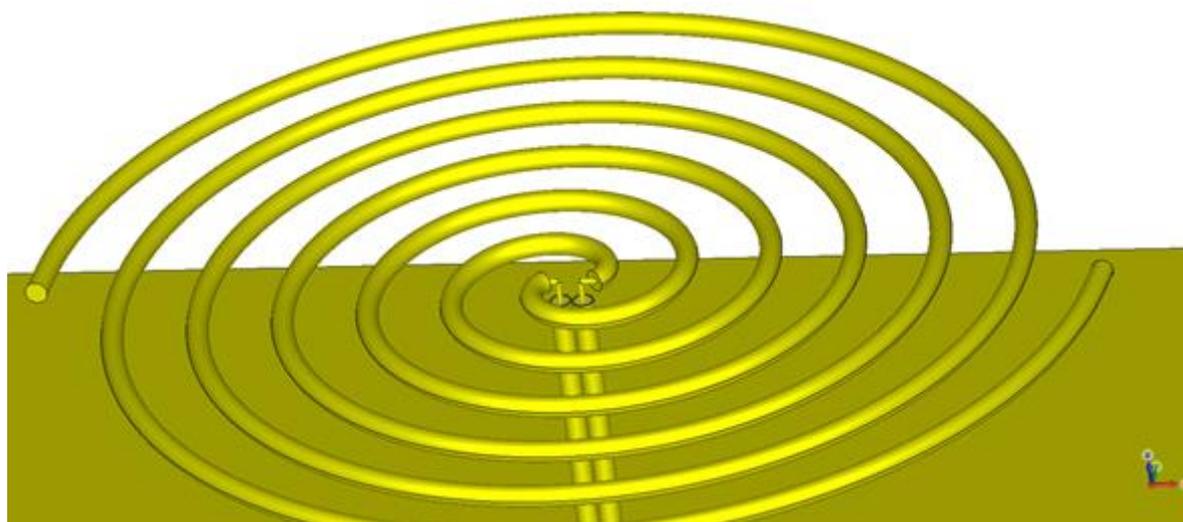


Рис. 4.6. Запитка плечей спирали от центральных проводников двух коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом

На рис. 4.7, 4.8 приведены входные характеристики варианта антенны, показанного на рис. 4.6; на рис. 4.9 показаны частотные зависимости потерь в антенне и грунте, без учета и с учетом ее согласования с фидерной линией. На рис. 4.10 показаны диаграммы направленности антенного устройства.

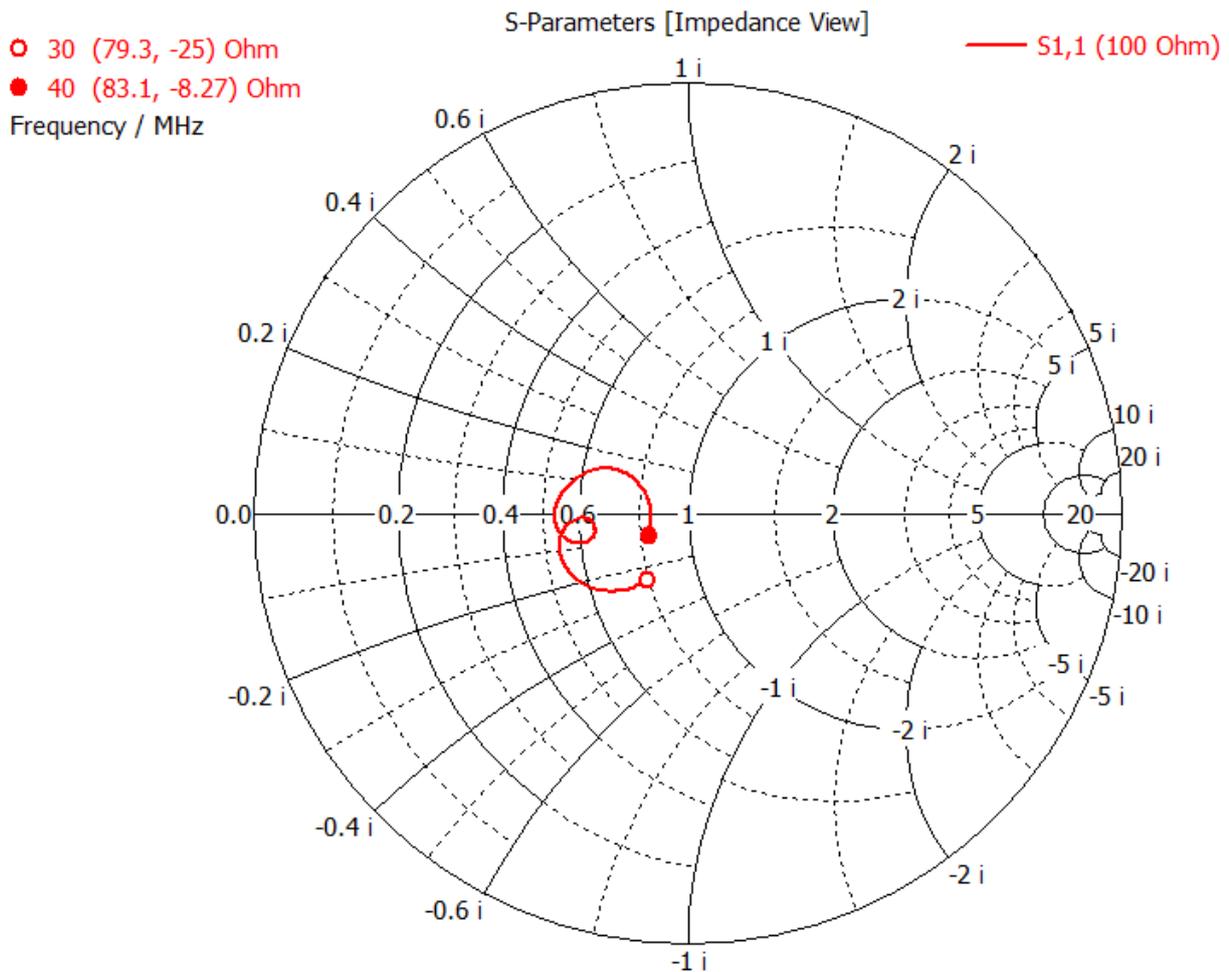


Рис. 4.7. Номограмма Вольперта-Смита в полосе частот 30 – 40 МГц

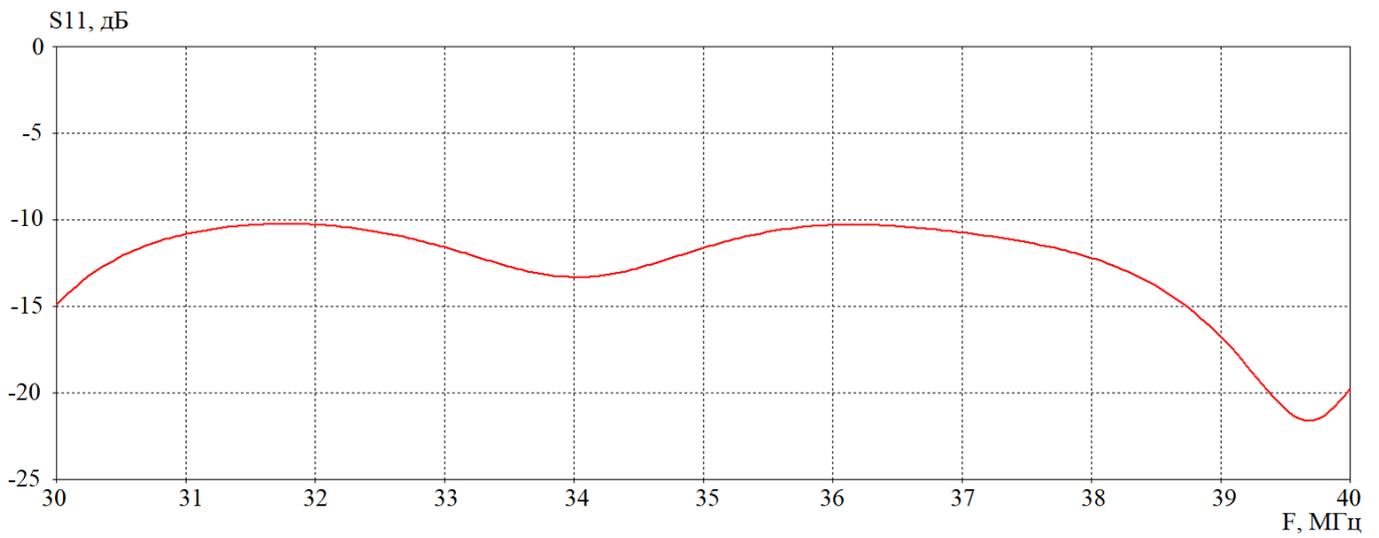


Рис. 4.8. Частотная зависимость коэффициента отражения от входа антенны

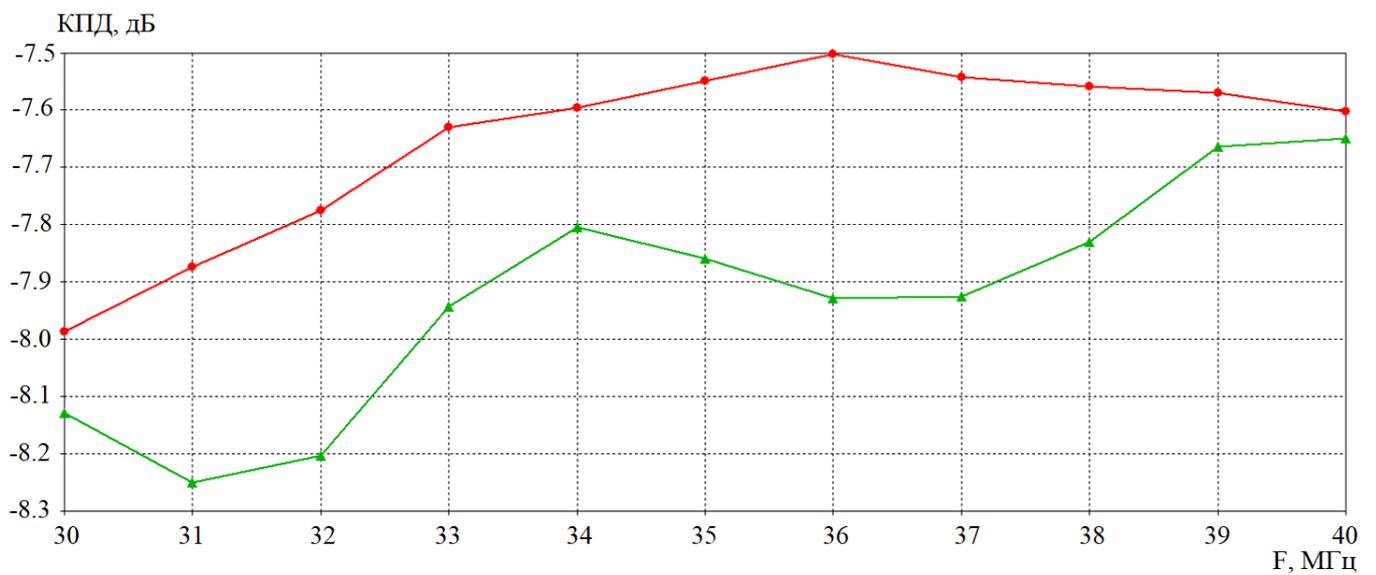
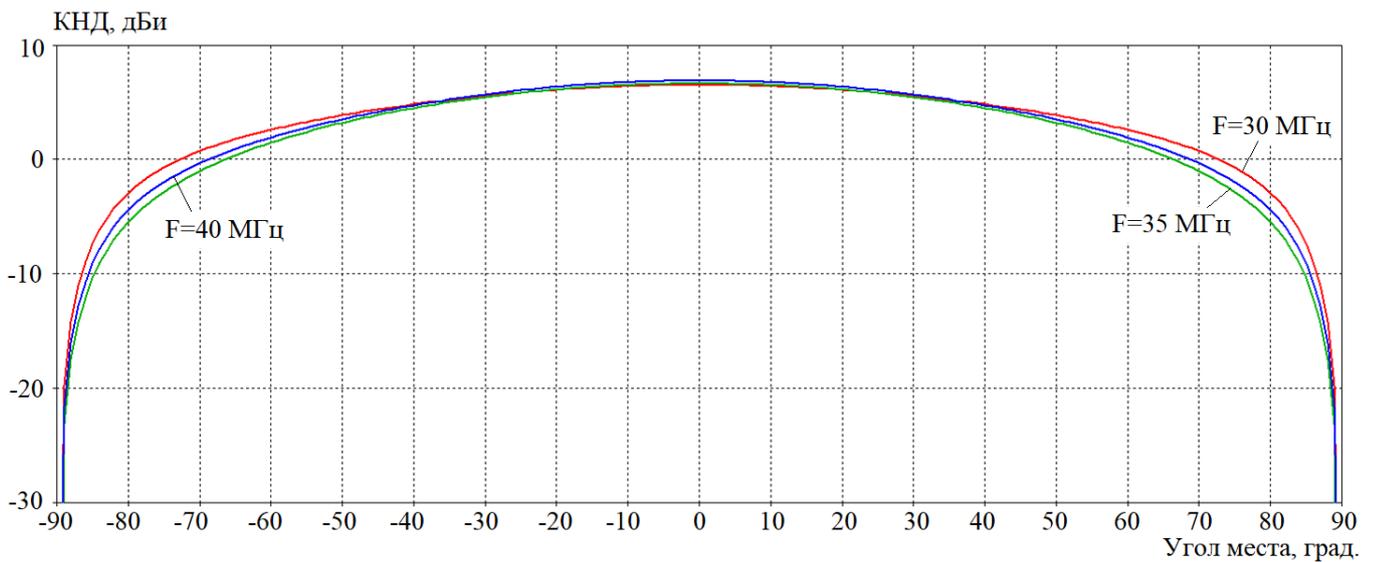
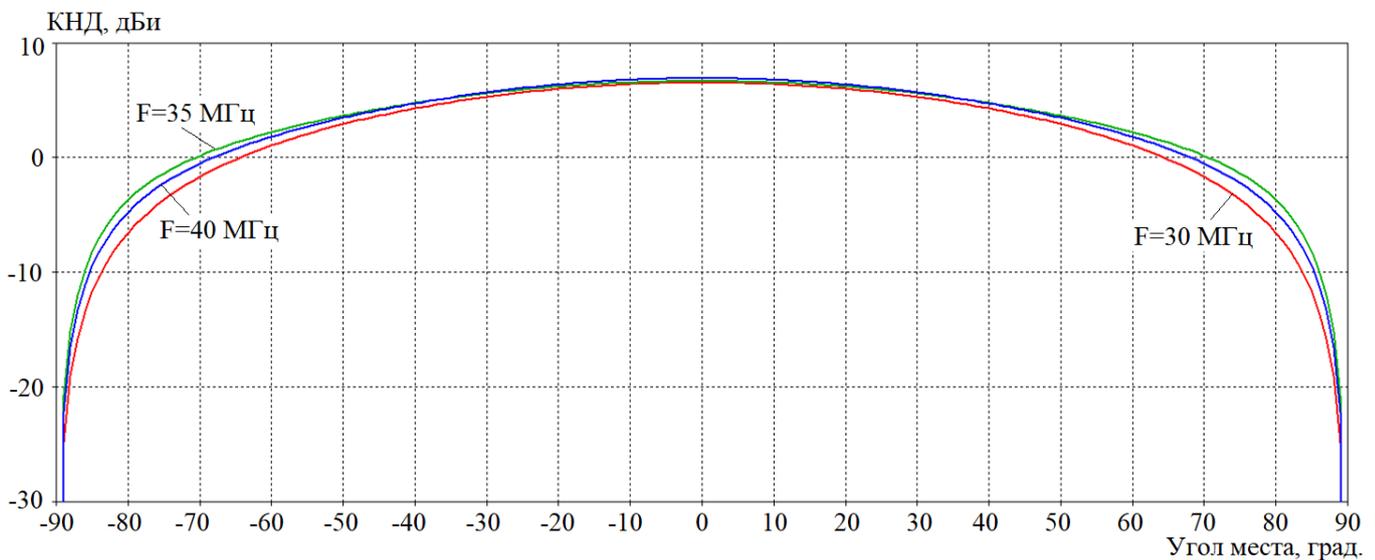


Рис. 4.9. Потери в антенне и окружающей ее поглощающей среде (грунте), дБ, без учета и с учетом согласования



а)



б)

Рис. 4.10. Диаграммы направленности, нормированные по максимальной величине коэффициента направленного действия, в угло-местной плоскости при значениях азимута 0 градусов (а) и 90 градусов (б)

В качестве недостатка варианта антенны, показанного на рис. 4.6, можно отметить необходимость использования симметрирующего устройства – гибридного кольца или U- колена.

Способом существенного упрощения конструкции антенны на основе двухзаходной спирали Архимеда является выполнение ее плечей из отрезков коаксиального кабеля, при этом к магистральному коаксиальному кабелю подключается внешняя

сторона одного из плечей, а в центре антенны центральный проводник запитанного плеча подсоединяется к внешнему проводнику противоположного плеча, рис. 4.11. При противофазной запитке двухзаходной спирали Архимеда имеет место автоматическая отсечка тока, препятствующая протеканию тока по внешнему проводнику магистрального кабеля. С точки зрения механики, подобный вариант антенны может быть изготовлен только из кабеля с малыми значениями допустимого радиуса изгиба, поэтому обеспечение высокой механической прочности подобной конструкции сопряжено с определенными проблемами. Возможен вариант построения антенны, в котором центральная часть антенны выполнена из коаксиальных линий передачи, изготовленных путем фрезерования из стальной плиты, а начиная с некоторого радиуса используется коаксиальный кабель с усиленной оболочкой; в данном случае требуется изготовление высокопрочных муфт, соединяющих центральные и внешние части плеч спирали.

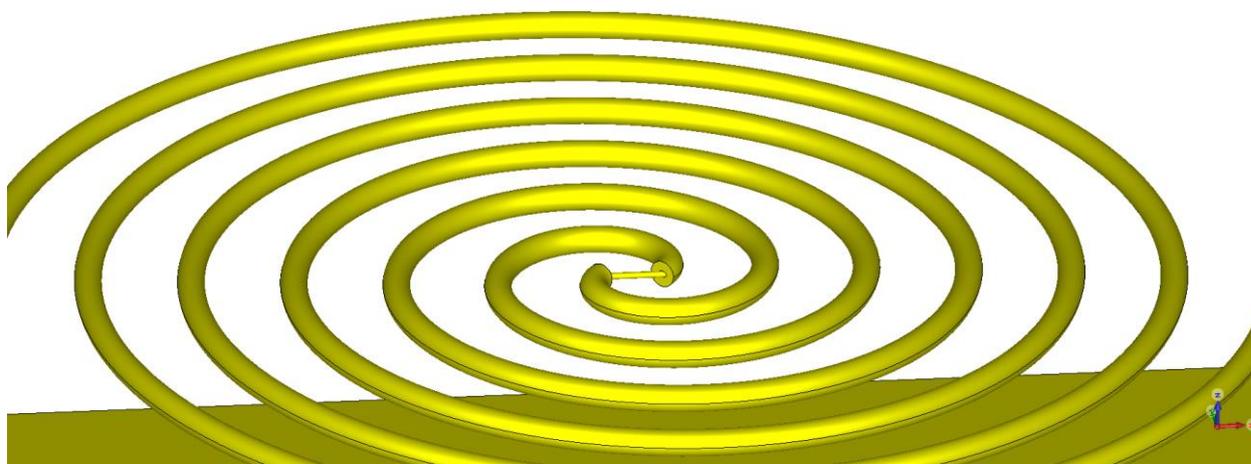


Рис. 4.11. Вариант запитки Архимедовской спирали от магистрального кабеля с внешней стороны одного из плеч

Входные характеристики антенны показаны на рис. 4.12, 4.13, а на рис. 4.14 показаны частотные зависимости потерь в антенне и грунте, без учета и с учетом ее согласования с фидерной линией. На рис. 4.15 показаны диаграммы направленности антенного устройства.

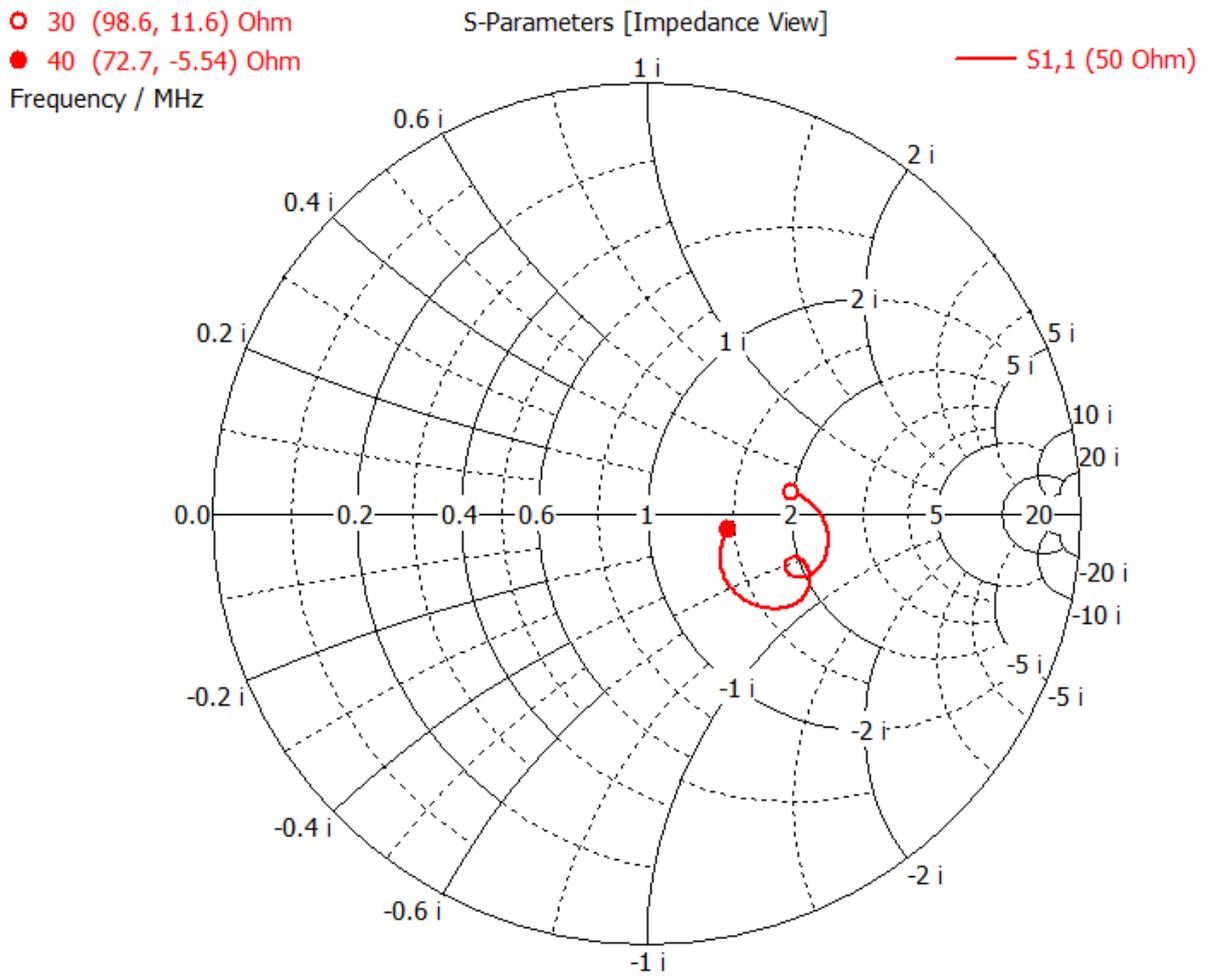


Рис. 4.12. Номограмма Вольперта-Смита в полосе частот 30 – 40 МГц

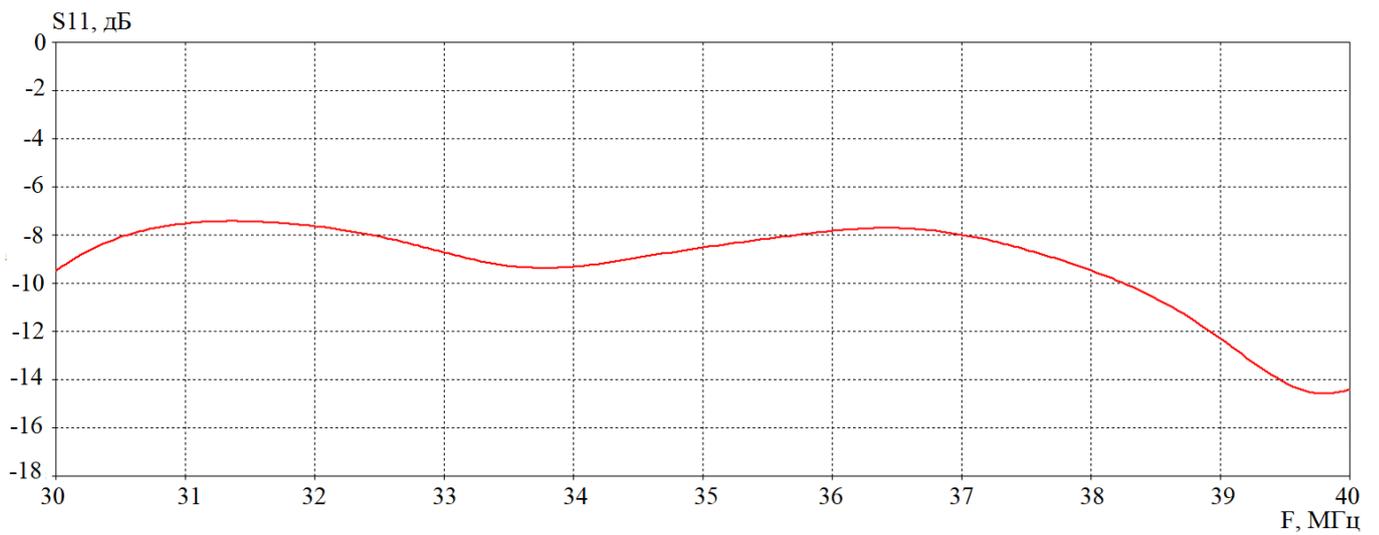


Рис. 4.13. Частотная зависимость коэффициента отражения от входа антенны

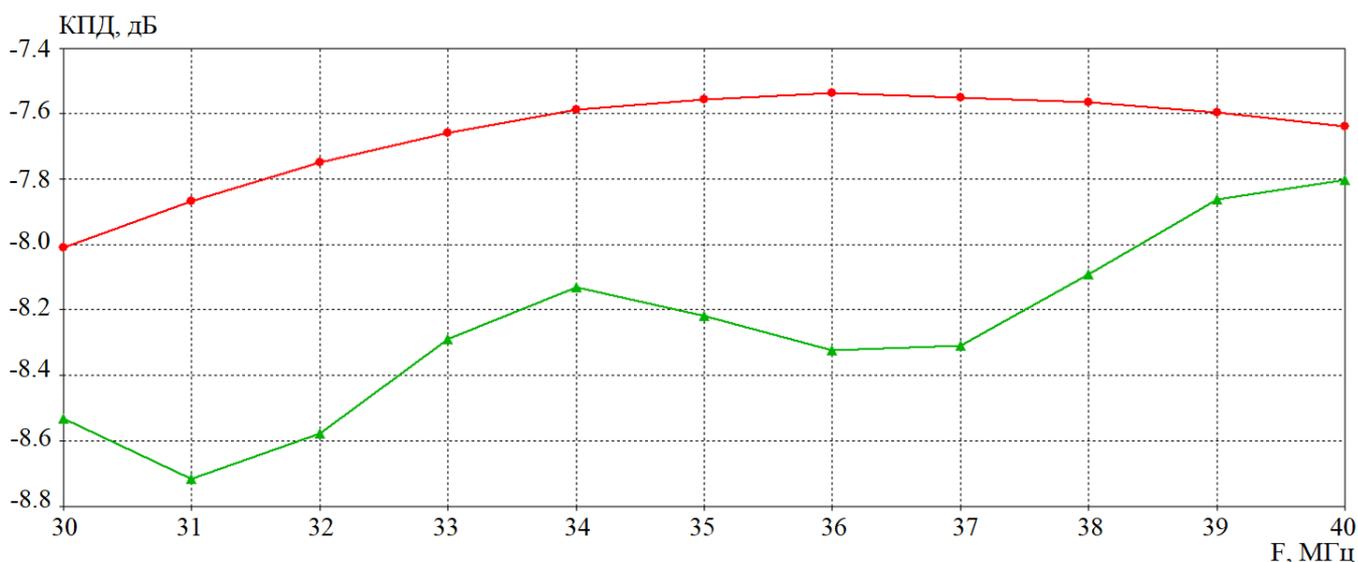
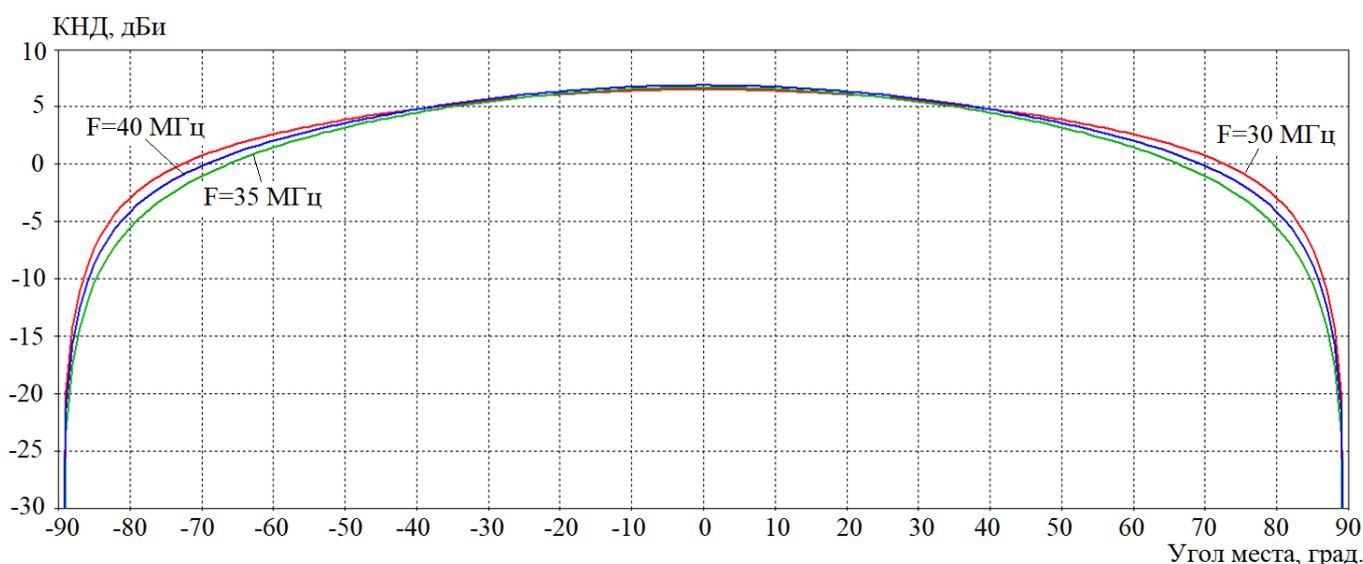
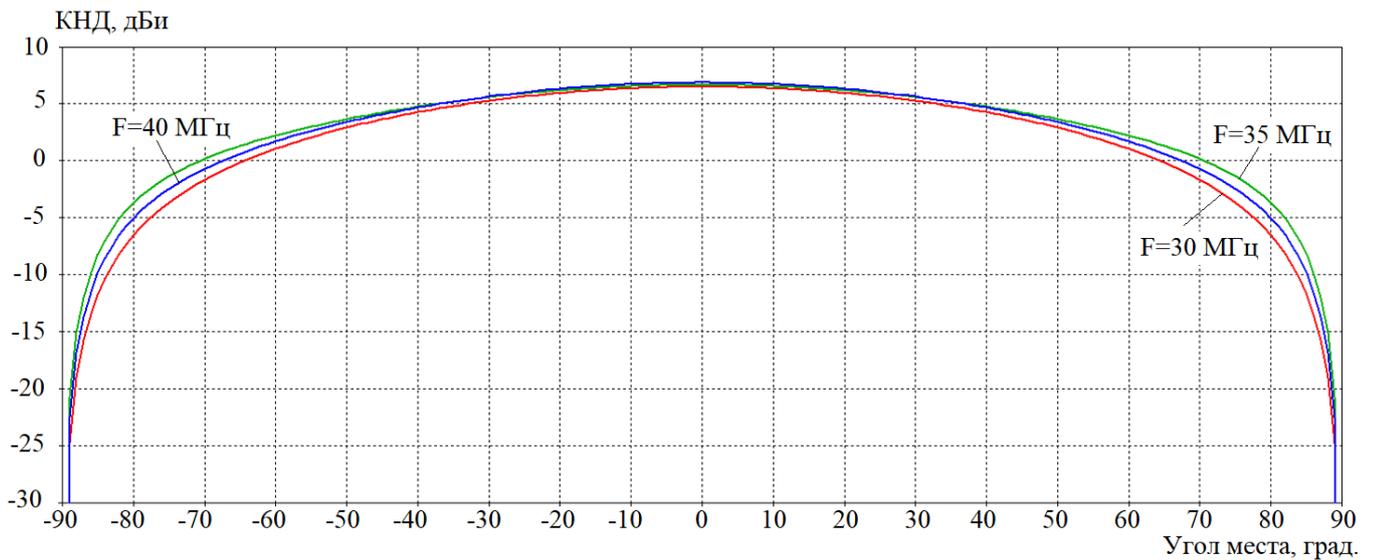


Рис. 4.14. Потери в антенне и окружающей ее поглощающей среде (грунте), дБ, без учета и с учетом согласования

Дальнейшая эволюция конструкции антенны привела к замене центральной части ее спиралей половинами окружностей с радиусами, большими, или равными минимальному радиусу изгиба усиленного коаксиального кабеля (при диаметре внешнего проводника кабеля 44 мм минимальный радиус изгиба составляет 440 мм, или – 10 значений диаметра). В модели антенна запитана сосредоточенным портом в центре – в месте соединения двух половин окружностей, рис. 4.16.



а)



б)

Рис. 4.15. Диаграммы направленности, нормированные по максимальной величине коэффициента направленного действия, в угло-местной плоскости при значениях азимута 0 градусов (а) и 90 градусов (б)

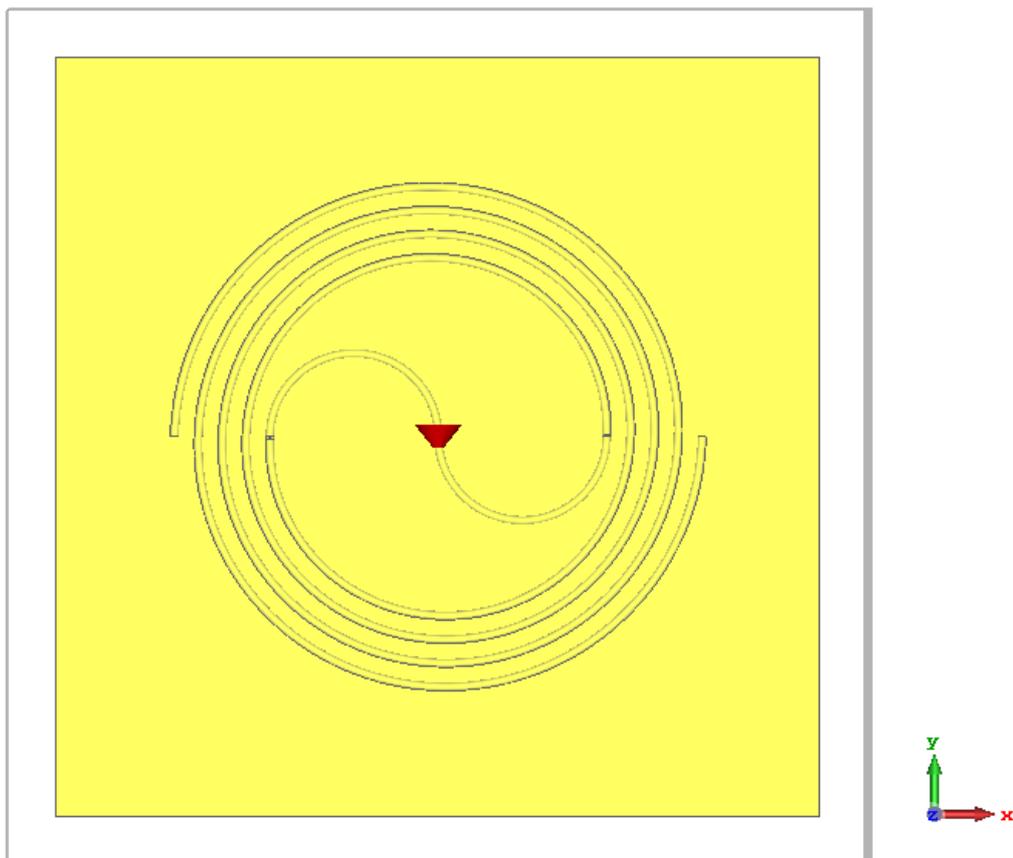


Рис. 4.16. Модель модифицированной двухзаходной спирали Архимеда, в которой центральная часть ее плечей заменена половинами окружностей с радиусами 440 мм

В реальности весь кабель будет цельным (его центральная жила будет неразрывной), а в месте соединения двух половинок окружностей, на протяженности, сравнимой с внешним диаметром кабеля, в центре антенны, оболочка удаляется, и центральная жила левой половины окружности замыкается на оболочку правой половины окружности (или наоборот). Как вариант, данное замыкание осуществляется с помощью муфты, обжимающей центральную жилу, выходящую из левой половинки окружности, а также – оболочку правой половинки окружности (для этого часть изолирующего диэлектрика снимается). Для более надежного контакта, места соединения центральной жилы, вышедшей из левой половины окружности и оболочки правой половины окружности, необходимо соединить путем пайки.

Питание антенны осуществляется с внешнего конца левого плеча спирали – это плечо продолжается аналогичным коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом. Имеющая место автоматическая отсечка токов в спирали Архимеда будет препятствовать протеканию существенного тока по магистральному коаксиальному кабелю, ведущему к приемо-передатчику.

При механическом воздействии, антенное устройство будет вести себя подобно пружине, возвращаясь в исходное состояние после окончания воздействия. При этом центральная жила является неразрывной. Достоинством варианта конструкции, показанного на рис. 4.16, является возможность изготовления обеих плеч спиральной антенны из цельного отрезка коаксиального кабеля с усиленной внешней оболочкой.

Данный вариант антенны является компромиссным, по критерию обеспечения необходимых электрических и механических характеристик. Численный электродинамический анализ показал, что полосовые свойства антенны по согласованию заметно ухудшаются – существенно сужается ширина полосы рабочих частот, в которой значение коэффициента отражения от входа антенны меньше -10 дБ (рис. 4.17, 4.18), но данная проблема может быть решена путем использования автоматического согласующего устройства.

На рис. 4.19 показаны частотные зависимости потерь в антенне и грунте, без учета и с учетом ее согласования с фидерной линией. На рис. 4.20 показаны

диаграмма направленности антенного устройства на частоте 34 МГц, на которой значение коэффициента отражения равно -10 дБ.

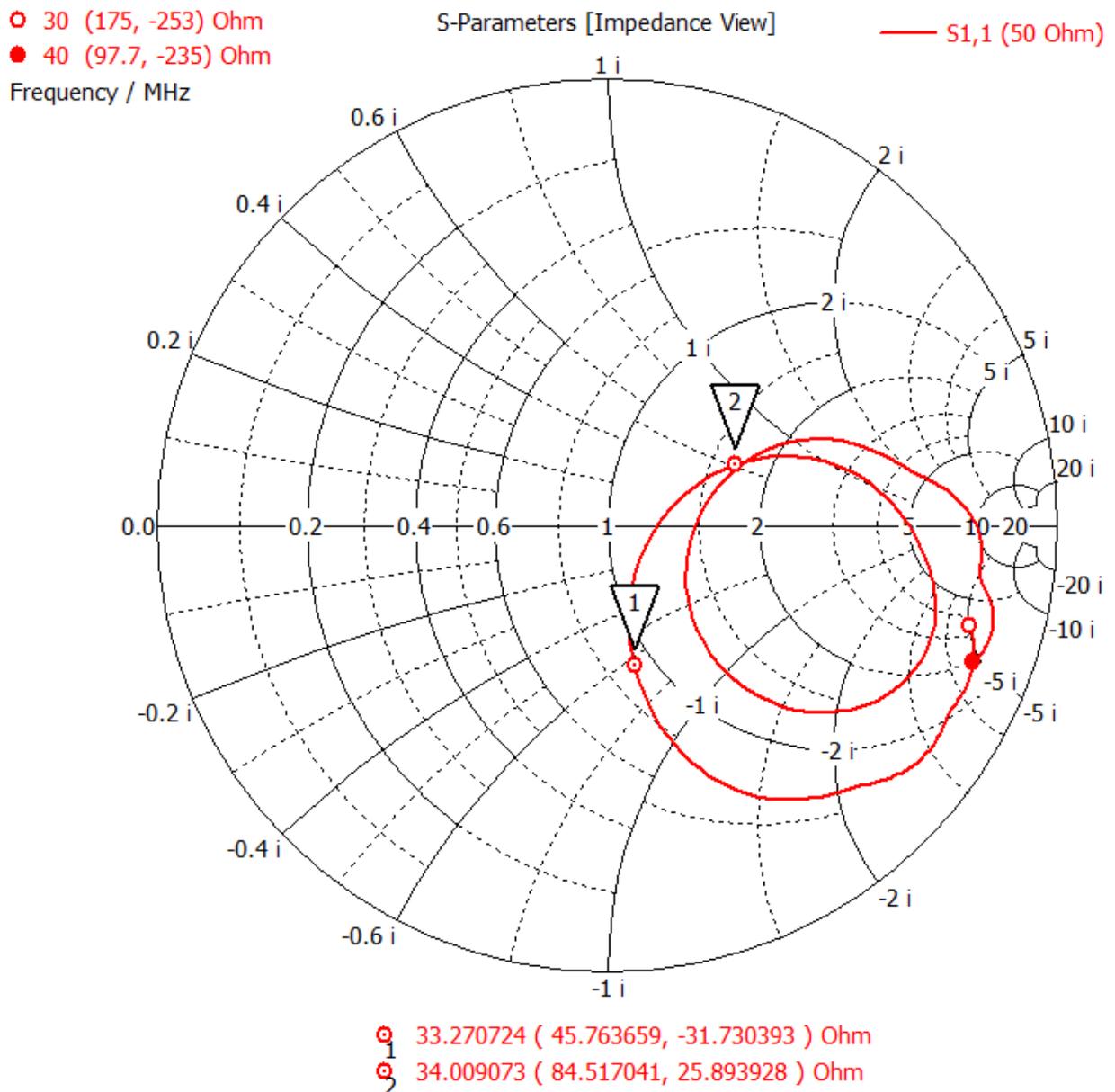


Рис. 4.17. Номограмма Вольперта-Смита в полосе частот 30 – 40 МГц

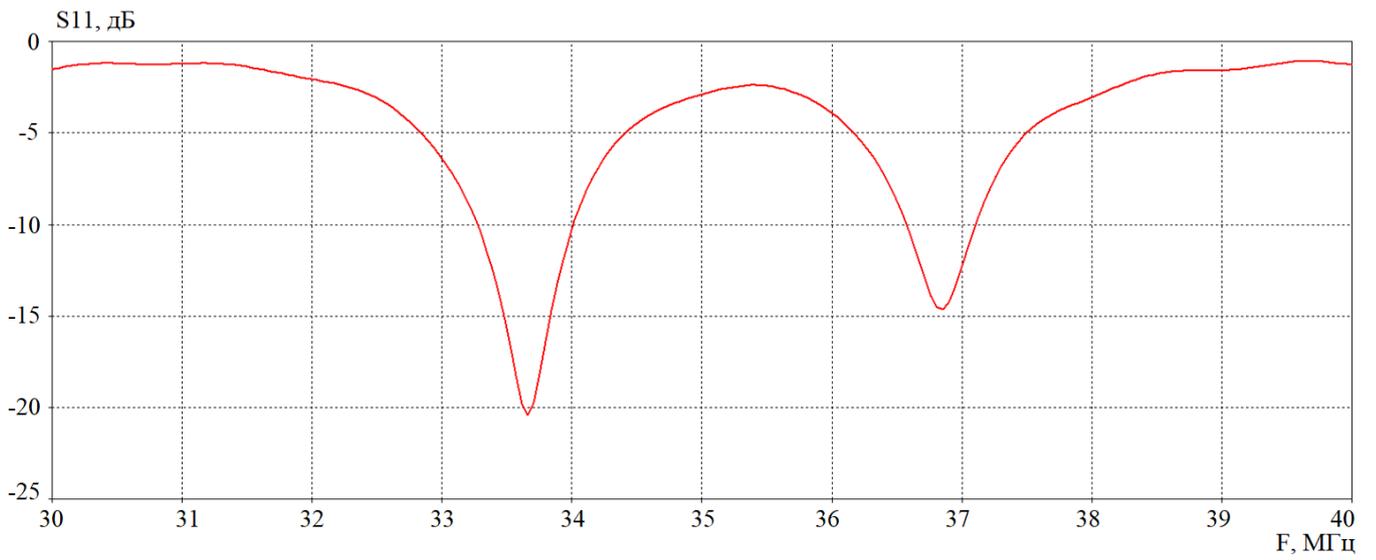


Рис. 4.18. Частотная зависимость коэффициента отражения от входа антенны

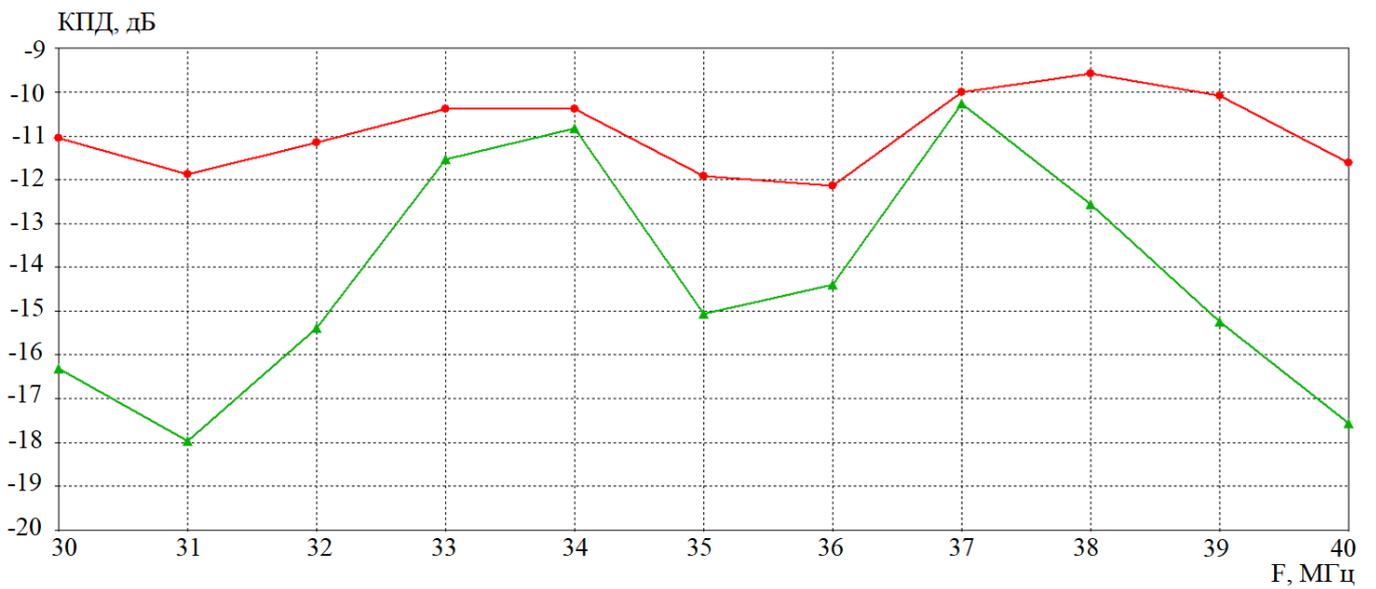
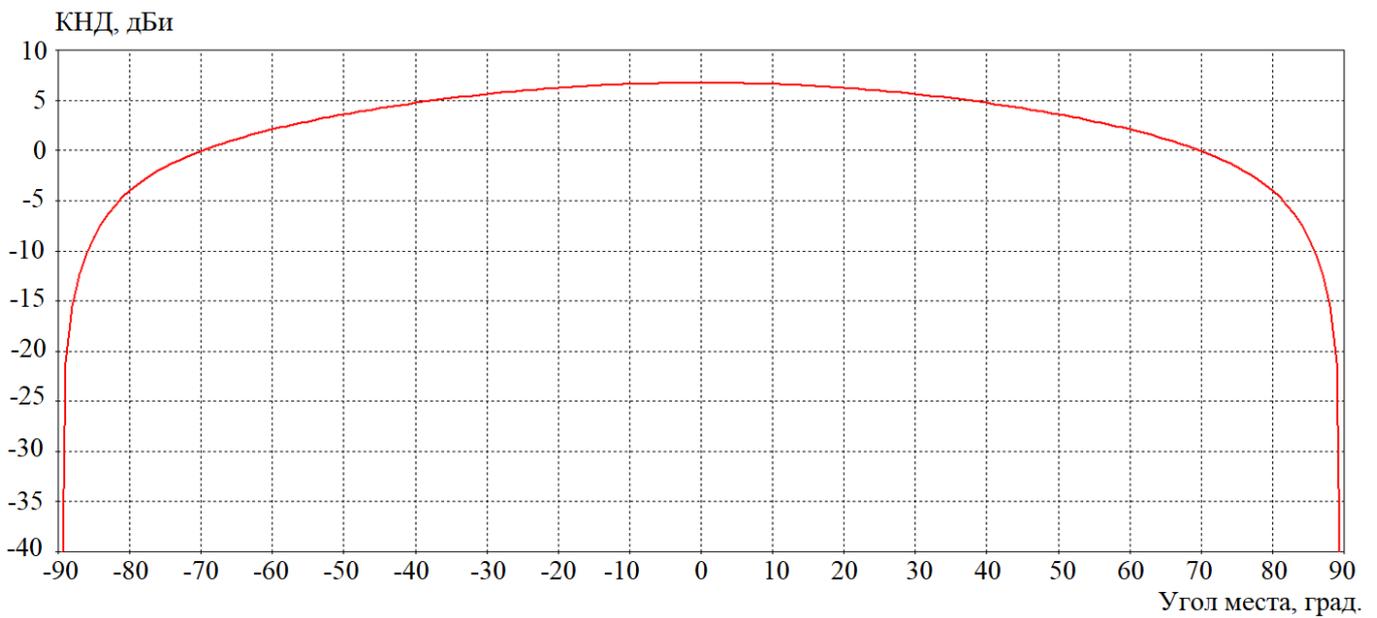
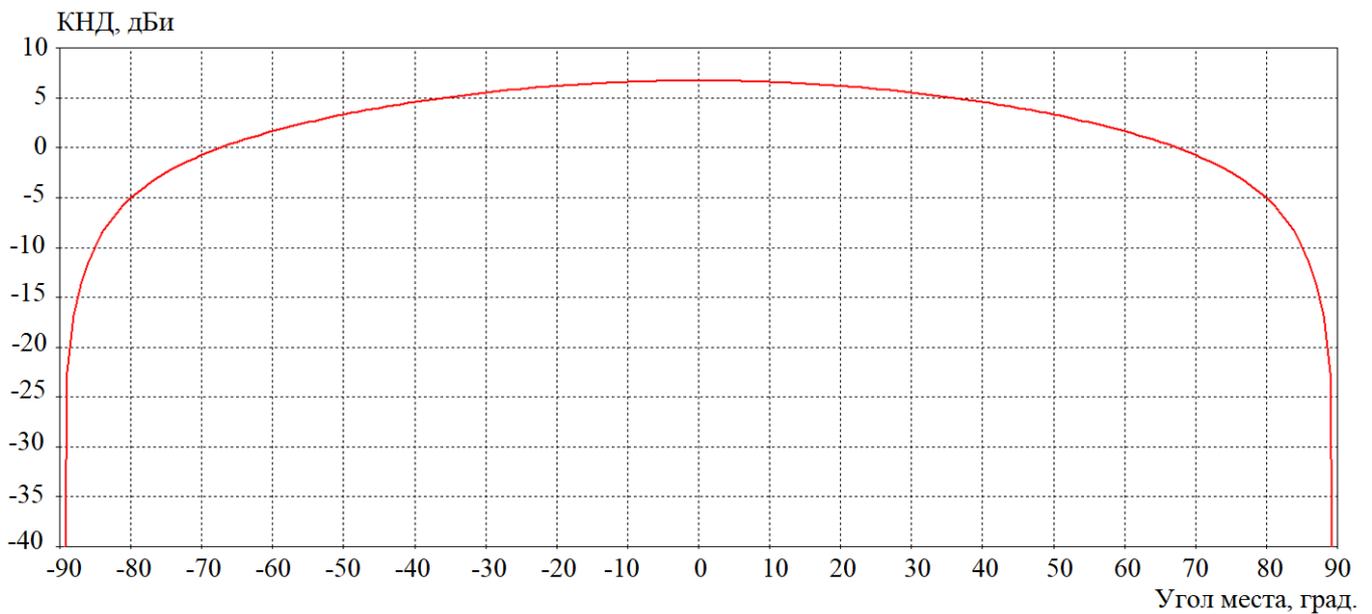


Рис. 4.19. Потери в антенне и окружающей ее поглощающей среде (грунте), дБ, без учета и с учетом согласования



а)



б)

Рис. 4.20. Диаграммы направленности на частоте 34 МГц, нормированные по максимальной величине коэффициента направленного действия, в угло-местной плоскости при значениях азимута 0 градусов (а) и 90 градусов (б)

Для проведения натуральных экспериментальных исследований был изготовлен уменьшенный, примерно в 20 раз, относительно оригинала, макет спирали Архимеда с экраном и шунтовым питанием, рис. 4.21. Габаритные размеры макета антенны составляли $220 \times 220 \times 100 \text{ мм}^3$. Антенна запитывалась с помощью

симметрирующего трансформатора, построенного на основе четвертьволновой двухпроводной линии передачи, замкнутой на конце. Оба проводника линии передачи представляют собой медные трубки, внутри одной из которых проложен коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом, используемый в качестве фидерной линии.

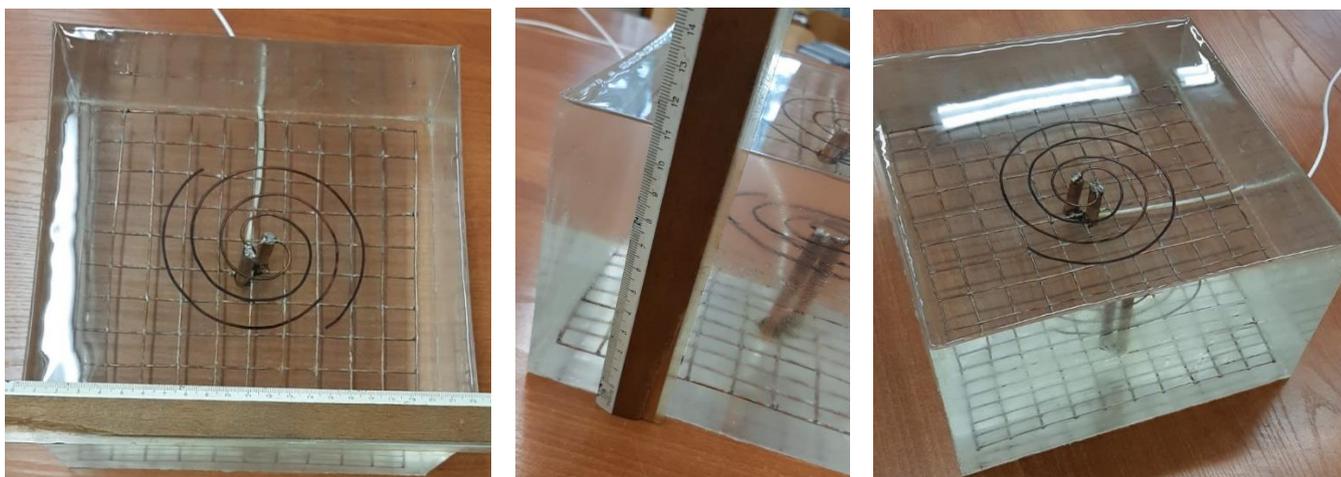


Рис. 4.21. Уменьшенный макет спирали Архимеда с экраном и шунтовым питанием

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.

На рис. 4.22 показан макет антенны, верхняя грань которой расположена на одном уровне с поверхностью грунта.



Рис. 4.22. Антенна расположена в грунте, верхняя грань слоя изоляционного материала находится на одном уровне с поверхностью грунта

Частотная зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) на входе антенны приведена на рис. 4.23. Из приведенного графика видно, что в полосе частот, приблизительно, от 520 до 1620 МГц значения КСВ не превышают 2.5, а в полосе частот от 820 до 1610 МГц максимальное значение коэффициента стоячей волны составляет 2.

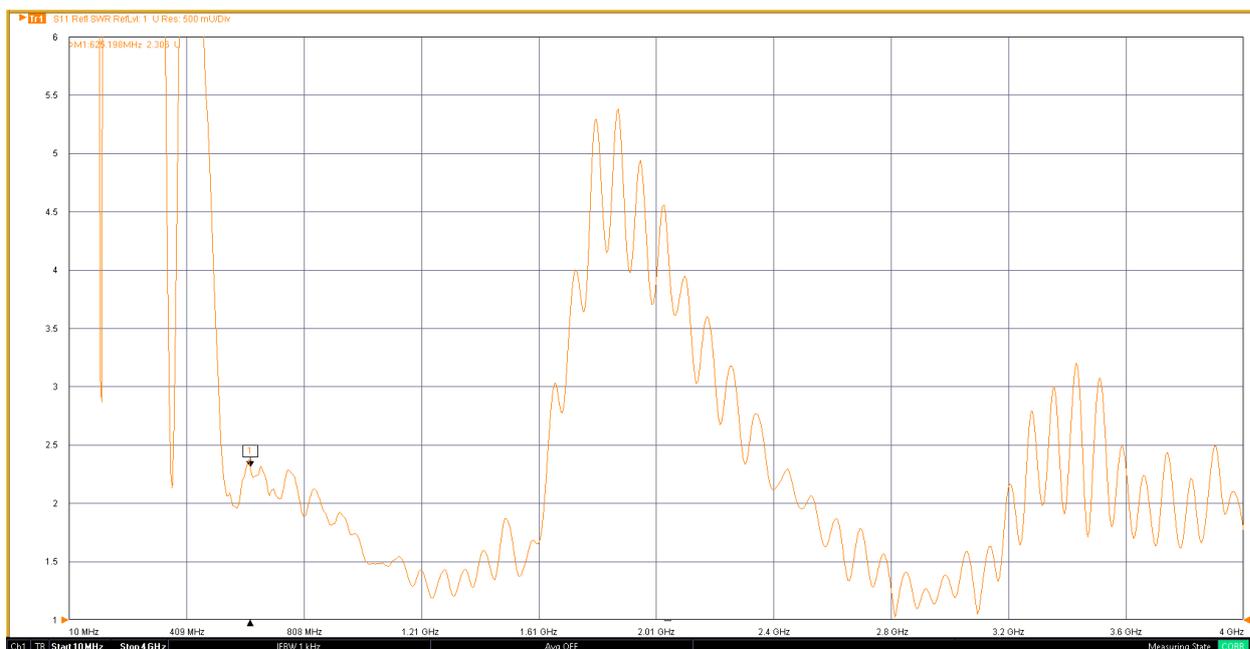


Рис. 4.23. Коэффициент стоячей волны антенны на основе спирали Архимеда

При измерении значений коэффициента усиления подземной антенны на основе спирали Архимеда, в качестве эталонной антенны использовался несимметричный четвертьволновый тонкопроволочный вибратор с высотой около 90 мм со средней частотой рабочего диапазона около 800 МГц, запитываемый относительно медной металлической пластины с размерами $190 \times 190 \text{ мм}^2$. В качестве передающей антенны использовалась антенна рупорного типа, расположенная на расстоянии около 7 м от приемных антенн.

На рис. 4.24 показаны зависимости коэффициента передачи (дБ) между спиральной антенной, не засыпанной слоем грунта, и передающей антенной. Было выяснено, что в полосе частот, приблизительно от 600 МГц до 1200 МГц коэффициент усиления спиральной антенны на горизонтальной поляризации, в среднем, от 2 до 5 дБ выше, чем ее же коэффициент усиления на вертикальной поляризации, рис. 4.24.

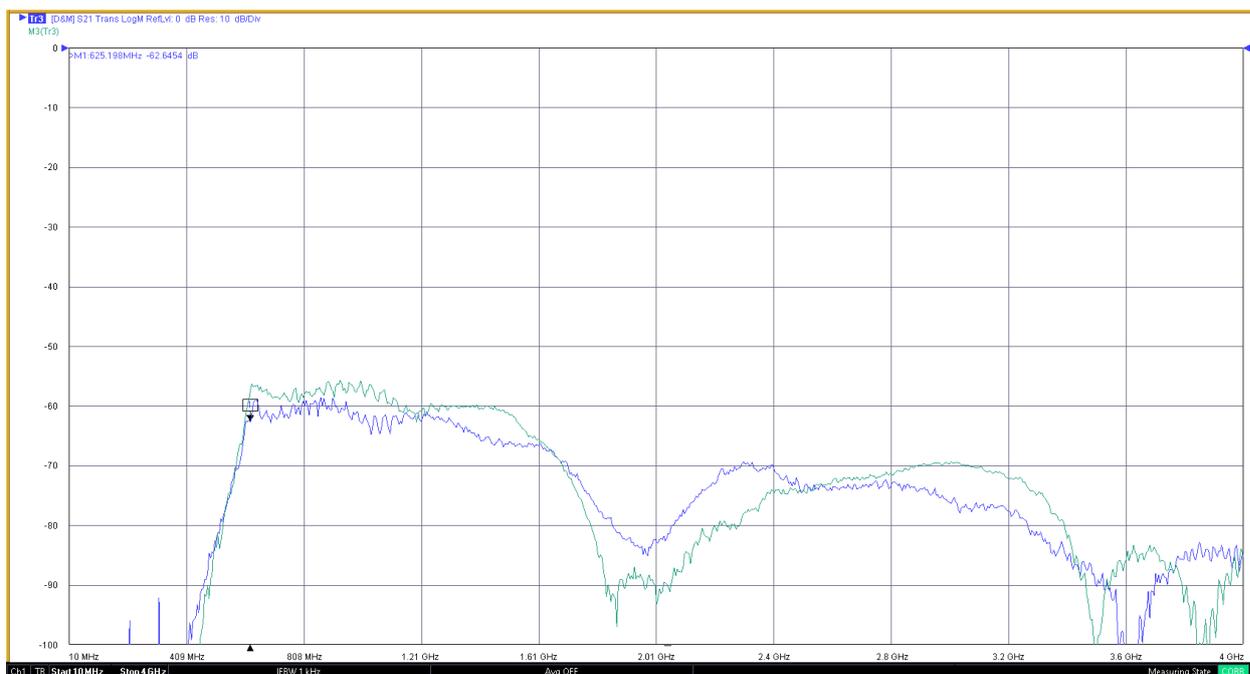


Рис. 4.24. Коэффициент передачи (дБ) между спиральной антенной (без засыпки ее грунтом) и передающей антенной; расстояние между приемной и передающей антеннами – около 7 м. В полосе частот от 600 МГц до 1200 МГц коэффициент усиления спиральной антенны на горизонтальной поляризации, в среднем, от 2 до 5 дБ выше, чем на вертикальной поляризации

Сравнение уровней сигналов на выходах эталонной антенны – четвертьволнового штыря (рис. 4.25) и исследуемой подземной антенны в виде спирали Архимеда с экраном (рис. 4.24) показали, что последняя уступает по коэффициенту усиления четвертьволновому штырю, в среднем, 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 (грунта средней влажности (рис. 4.26) и влажного грунта (рис. 4.27)) коэффициент усиления антенны существенно не изменяется, на отдельных частотах уменьшение коэффициента усиления составляет не более 4-5 дБ.

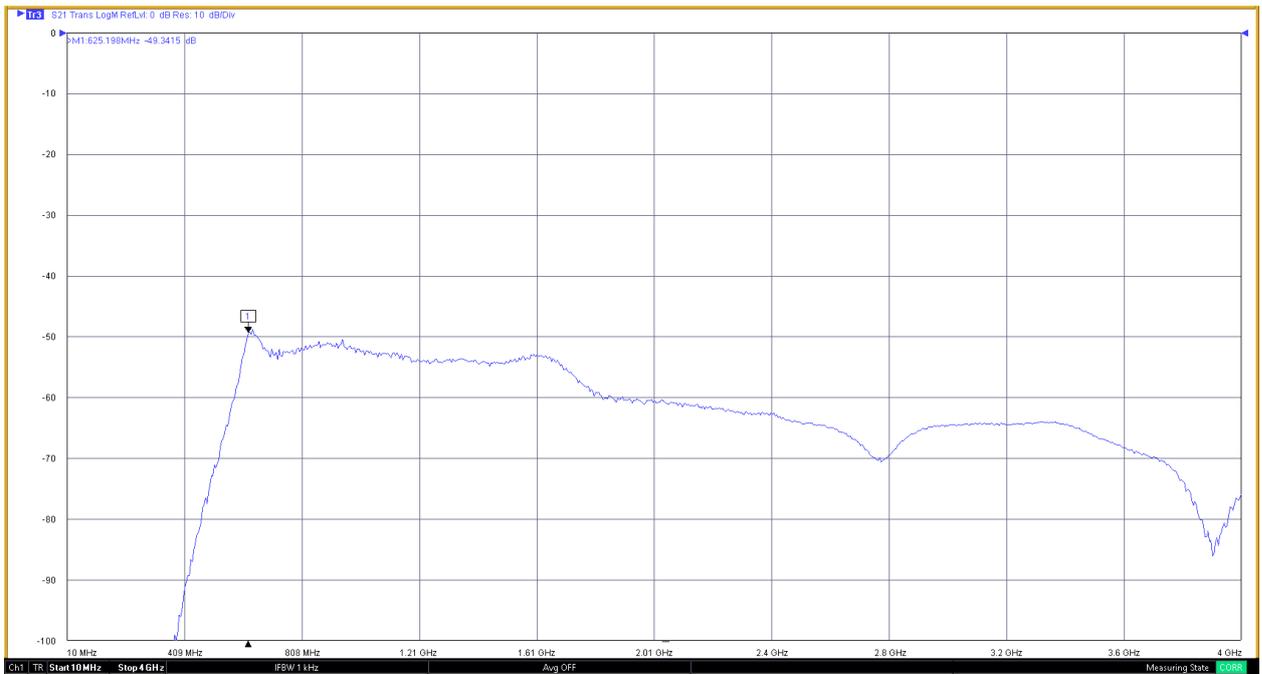


Рис. 4.25. Коэффициент передачи (дБ) между эталонной антенной (четвертьволновый штырь над металлическим экраном с размерами $0.5\lambda_0 \times 0.5\lambda_0$) и передающей антенной; расстояние между приемной и передающей антеннами – около 7 м

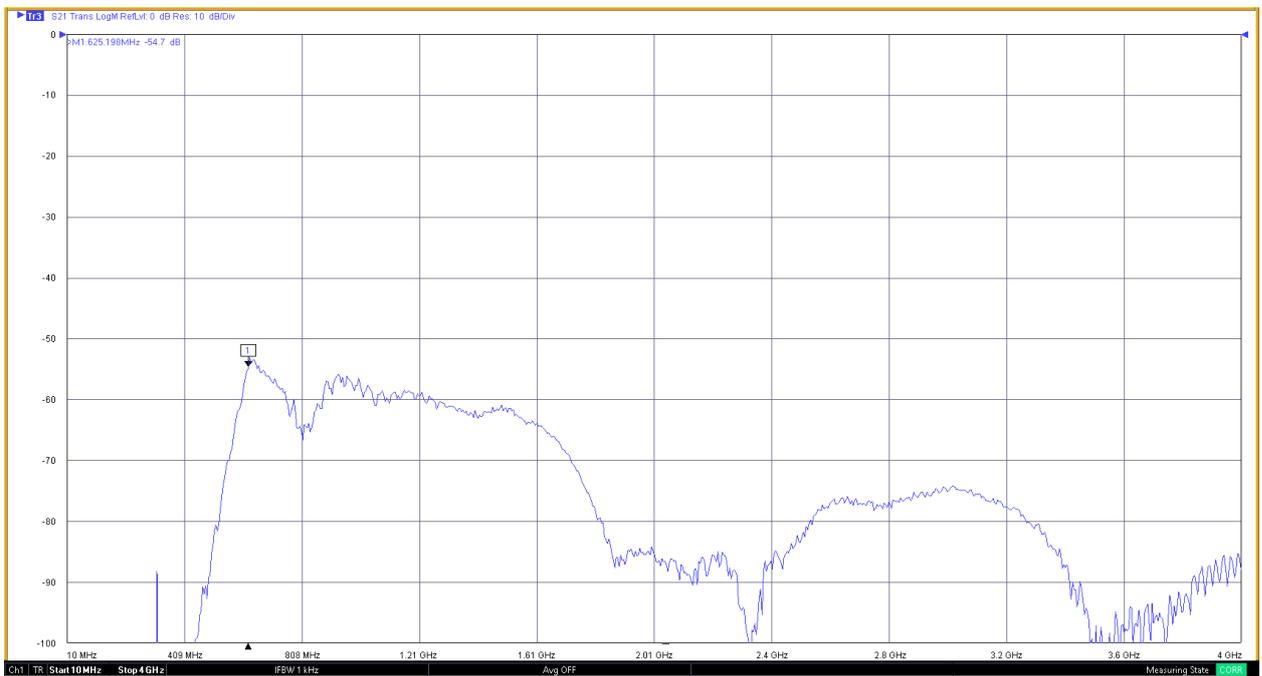


Рис. 4.26. Коэффициент передачи (дБ) между спиральной антенной (над антенной – слой грунта средней влажности толщиной 5 см) и передающей антенной; расстояние между приемной и передающей антеннами – около 7 м

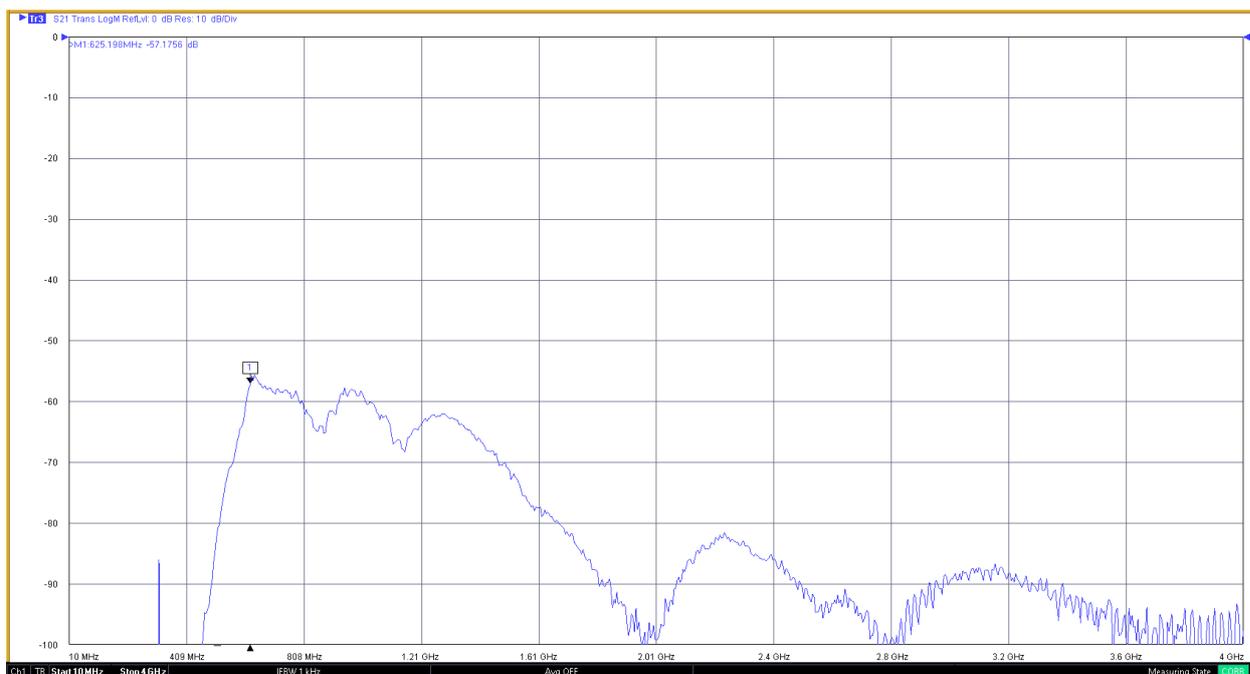


Рис. 4.27. Коэффициент передачи (дБ) между спиральной антенной (над антенной – слой влажного грунта толщиной 5 см) и передающей антенной; расстояние между приемной и передающей антеннами – около 7 м

Проведенные исследования подтверждают перспективность использования в качестве подземных антенн антенны в виде спирали Архимеда с экраном, в которой реализован шунтовой способ запитки. Благодаря тому, что подавляющая доля мощности электромагнитного излучения, проходящая через слой грунта, в случае засыпки антенны слоем грунта, приходится на горизонтальную поляризацию, потери в диссипативной среде – окружающем антенну грунте являются незначительными.

В заключение отметим, что материальные параметры используемого изолирующего материала – прозрачной эпоксидной смолы в дециметровом диапазоне волн близки к соответствующим параметрам гранитного щебня, измеряемым на низких частотах УКВ диапазона (значение эффективной диэлектрической проницаемости щебня близко к величине $\epsilon_{\text{эфф}} = 3.0$, а значение тангенса угла диэлектрических потерь – $tg(\delta_d) = 0.02$), поэтому проведенные экспериментальные исследования макета антенны в дециметровом диапазоне волн подтверждают перспективность использования подобных антенн, с размерами, увеличенными, в соответствии с

принципом электродинамического подобия, предназначенными для функционирования в низкочастотной области УКВ диапазона волн.

В заключение необходимо отметить, что в настоящем подразделе предложены, синтезированы и проанализированы, с использованием метода конечного интегрирования Вейланда, реализованного в пространственно-временной области, три варианта построения подземной антенны, функционирующей в длинноволновой области УКВ диапазона волн, построенной на основе двухзаходной спирали Архимеда.

Было выяснено, что использование в качестве изолирующего материала гранитного, или – мраморного щебня позволяет существенно снизить чувствительность входных характеристик антенны и ее диаграммы направленности к параметрам грунта, а также – к толщине навала грунта над антенной.

В предложенных вариантах акцент важности обеспечения требуемых механических характеристик усиливается, при переходе от варианта с шунтовой запиткой, к варианту запитки антенны сбоку, и является максимальным в конструкции модифицированной спирали Архимеда, в которой ее центральная часть заменена половинами окружностей, а оба плеча изготавливаются из цельного коаксиального кабеля с неразрывным внутренним проводником.

4.2. Методика оценки степени неоднородности диэлектрической среды, используемой для изоляции подземной антенны УКВ диапазона

Важной задачей, связанной с диагностикой состояния подземных антенн УКВ диапазона, является оценка степени неоднородности диэлектрической среды, используемой для изоляции подземной антенны. Накопление влаги в изолирующей среде ведет к снижению коэффициента полезного действия подземной антенны и изменению характера ее входного сопротивления, поэтому анализ степени ее неоднородности должен проводиться постоянно и оперативно.

В настоящем подразделе предложена методика оценки степени неоднородности диэлектрической среды, используемой для изоляции подземной антенны УКВ диапазона, основанная на использовании электродинамического принципа

эквивалентных полей и токов [161], являющегося прямым следствием принципа Гюйгенса-Кирхгофа, описываемого, в общем случае (для векторных полей), – леммой Лоренца (4.1), а в частном случае (скалярных полей – проекций составляющих векторных полей) – интегралом Гюйгенса-Кирхгофа (4.2):

$$\int_S \left[\left[\vec{E}_1, \vec{H}_2 \right] - \left[\vec{E}_2, \vec{H}_1 \right] \right] \vec{n} dS = \\ = \int_V \left(\vec{E}_2 \cdot \vec{j}_1^{\text{э}} - \vec{E}_1 \cdot \vec{j}_2^{\text{э}} - \vec{H}_2 \cdot \vec{j}_1^{\text{м}} + \vec{H}_1 \cdot \vec{j}_2^{\text{м}} \right) dV, \quad (4.1)$$

где

\vec{E}_1, \vec{H}_1 – электрическая и магнитная составляющие электромагнитного поля, создаваемые источниками в виде сторонних электрического и магнитного токов $\vec{j}_1^{\text{э}}$ и $\vec{j}_1^{\text{м}}$;

\vec{E}_2, \vec{H}_2 – электрическая и магнитная составляющие электромагнитного поля, создаваемые источниками в виде сторонних электрического и магнитного токов $\vec{j}_2^{\text{э}}$ и $\vec{j}_2^{\text{м}}$;

S – замкнутая поверхность, охватывающая объем V ;

\vec{n} – единичный вектор внешней нормали;

если поверхность S не охватывает ни одного из источников, то объемный интеграл в правой части выражения (4.1) становится равным нулю;

$$\dot{E} = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(\dot{E}_0 \frac{\partial \dot{G}}{\partial \vec{n}} - \frac{\partial \dot{E}_0}{\partial \vec{n}} \dot{G} \right) dS, \quad (4.2)$$

где

$\dot{E} = \dot{E}(x; y; z)$ – поле в точке наблюдения;

$\dot{E}_0 = \dot{E}_0(x_0; y; z_0)$ – поле в текущей точке интегрирования, лежащей на поверхности S ;

$\dot{G} = \frac{\exp(-i \cdot k_0 \cdot \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2})}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}}$ – скалярная функция Грина для свободного пространства;

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ – волновое число для свободного пространства;

\vec{n} – нормаль к поверхности интегрирования.

Представим z – компоненту электрического поля в точках $P_n(x_n; y_n; z_n)$, $n = 1, 2, \dots, N$, лежащих на замкнутой поверхности S , в виде суперпозиции полей излучения вспомогательных точечных источников $Q_m(x_m; y_m; z_m)$, $m = 1, 2, \dots, N$, с комплексными амплитудами U_m , расположенных вне объема V , ограниченного замкнутой поверхностью S :

$$\begin{aligned} \dot{E}(P_n(x_n; y_n; z_n)) = & -i\omega_0\mu_a \cdot \sum_{m=1}^N \left(U_m \cdot \dot{G}(P_n(x_n; y_n; z_n); Q_m(x_m; y_m; z_m)) \right) + \\ & + \frac{1}{i\omega_0\varepsilon_a} \cdot \sum_{m=1}^N \left(U_m \cdot \left[\overrightarrow{\text{grad}} \left(\text{div} \left(\dot{G}(P_n; Q_m) \right) \right) \right]_z \right), \quad n = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (4.3)$$

где

ω_0 – циклическая частота;

μ_a и ε_a – абсолютные магнитная и диэлектрическая проницаемости среды;

индекс z в операторе градиента означает взятие соответствующей проекции вектора $\overrightarrow{\text{grad}} \left(\text{div} \left(\dot{G}(P_n; Q_m) \right) \right)$.

Представление поля в виде (4.3) построено на использовании электродинамического принципа эквивалентных полей и токов; высокая эффективность метода дискретных источников показана в работе [162]. В ней показано, что использование метода дискретных источников позволяет снизить размерность систем уравнений до 50 и более раз, относительно широко распространенного метода моментов, при заданном уровне точности решения граничной задачи электродинамики.

При расположении вспомогательных точечных источников Q_m на расстояниях, от анализируемой области пространства, существенно больших длины волны в среде, второе слагаемое в выражении (4.3) становится существенно меньшим по модулю, чем первое, поэтому вторым слагаемым в данном случае можно пренебречь.

В диссертации [163] показано, что если трехмерную поверхность интегрирования S в интеграле Гюйгенса-Кирхгофа (4.2), путем предельного перехода, сжимая в направлениях $\pm z$, преобразовать в плоскую поверхность в виде круга, поверхностный интеграл в выражении (4.2) заменяется на контурный интеграл по периметру круга L , т.к. значения функции поля \dot{E}_0 на верхней и нижней поверхностях, ограниченных контуром L , будут одинаковыми, а значения нормальных производных $\frac{\partial \dot{E}_0}{\partial \vec{n}}$ будут отличаться по знаку; такими же свойствами будут обладать скалярная функция Грина и ее нормальная производная.

При переходе к эквивалентной плоской задаче аппроксимации электромагнитного поля, скалярная функция Грина точечного источника заменяется на скалярную функцию Грина бесконечно протяженных линейных источников, перпендикулярных плоскости, в которой лежит контур интегрирования L [163]:

$$G(P, Q) = -\frac{\pi i}{2} \cdot H_0^1(k_0 r_{P,Q}), \quad (4.4)$$

где

$H_0^1(z) = J_0(z) + iN_0(z)$ - функция Ганкеля первого рода нулевого порядка;

$J_0(z)$ и $N_0(z)$ - функция Бесселя и функция Неймана, соответственно.

Решая систему линейных алгебраических уравнений

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

$$n = 1, 2, \dots, N. \quad (4.5)$$

относительно комплексных амплитуд вспомогательных источников излучения U_m , используя в качестве исходных данных измеренные значения комплексных амплитуд поля $\dot{E}(P_n(x_n; y_n))$ в множестве точек $n = 1, 2, \dots, N$, лежащих на плоскости, ограниченном контуром L , получим выражение, аппроксимирующее поле в анализируемой области пространства:

$$\dot{E}(x; y) = -i\omega_0\mu_a \cdot \sum_{m=1}^N \left(U_m \cdot \dot{G}(x; y; Q_m(x_m; y_m)) \right). \quad (4.6)$$

Используя второе уравнение Максвелла в дифференциальной форме [161]

$$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = -i\omega_0\mu_a\vec{H}, \quad (4.7)$$

и используя выражение (4.6) для z компоненты вектора напряженности электрического поля, получаем выражения для проекций вектора напряженности магнитного поля в точках плоскости, ограниченной плоским контуром L :

$$\dot{H}_x = \frac{1}{-i\omega_0\mu_a} \frac{d\dot{E}_z}{dy}, \quad (4.8)$$

$$\dot{H}_y = \frac{1}{i\omega_0\mu_a} \frac{d\dot{E}_z}{dx}. \quad (4.9)$$

Для анализа степени неоднородности среды находим активную часть вектора Пойнтинга электромагнитного поля во внутренних точках плоского контура L :

$$P_x = Re\{-\dot{E}_z \cdot \dot{H}_y^*\}, \quad (4.10)$$

$$P_y = Re\{\dot{E}_z \cdot \dot{H}_x^*\}, \quad (4.11)$$

где знак * над составляющими вектора напряженности магнитного поля означает операцию комплексного сопряжения.

На рис. 4.28 показана модель электродинамической структуры, используемая для диагностики степени неоднородности диэлектрического заполнения полости в грунте ($\epsilon_{r \text{эфф.}} = 8$; $\sigma = 0.005$ См/м), засыпанной гранитным щебнем ($\epsilon_{r \text{эфф.}} = 3$; $\delta_d = 0.03$). Глубина бассейна – 3 м, диаметр бассейна – 3 м. Центр области с

повышенной проводимостью в виде эллипсоида вращения ($\epsilon_{r \text{эфф.}} = 13$; $\sigma = 0.2 \text{ См/м}$) имеет координаты: $x = -1.0 \text{ м}$; $y = 0 \text{ м}$; $z = -1.5 \text{ м}$; высота эллипсоида – 1 м; диаметры эллипсоида в плоскости xOy равны 0.5 м. Толщина слоя навала грунта над верхом бассейна составляет 0.5 м.

На окружности с радиусом 1.45 м и центром в точке $z = -1.5 \text{ м}$ расположено 18 пар симметричных электрических вибраторов, длина каждого из которых составляет 110 мм, используемых в качестве электрических пробников электромагнитного поля. Источником электромагнитного поля является симметричный электрический вибратор, расположенный на высоте 145 мм относительно дна бассейна.

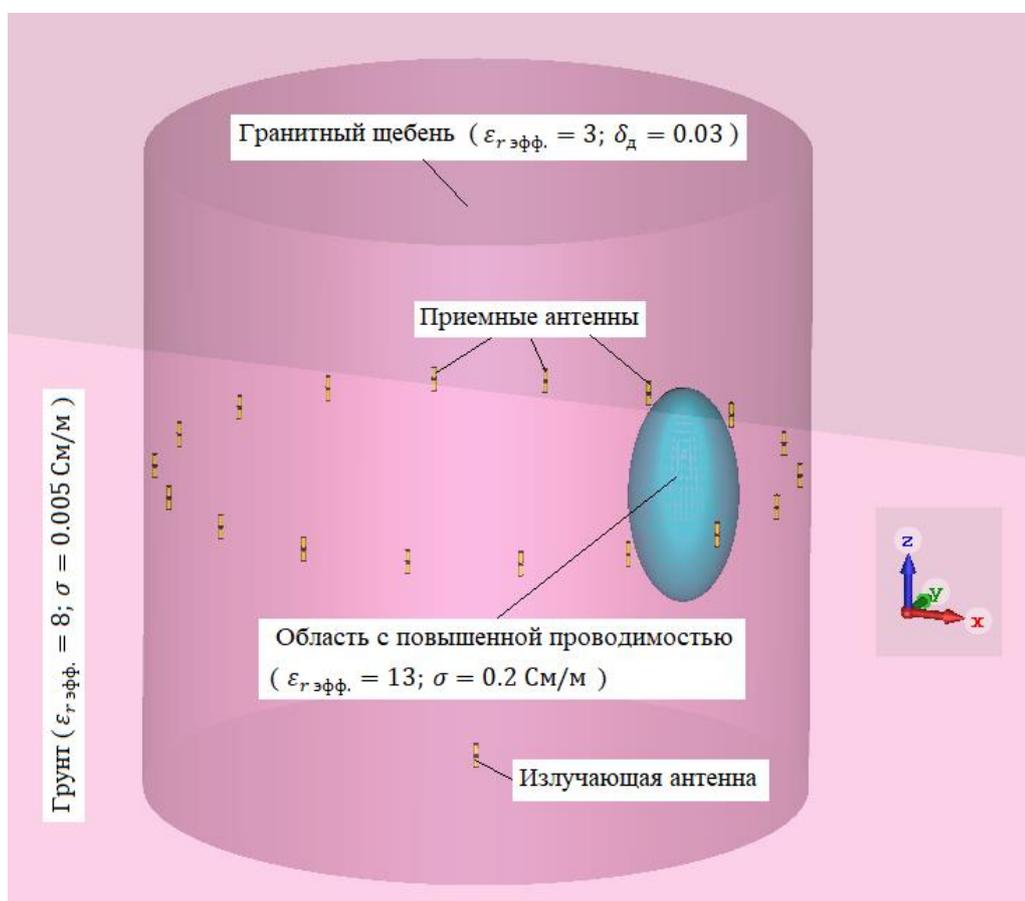


Рис. 4.28. Модель структуры, используемая для диагностики степени неоднородности диэлектрического заполнения полости в грунте, засыпанной гранитным щебнем. Глубина бассейна – 3 м, диаметр бассейна – 3 м. Центр области с повышенной проводимостью имеет координаты: $x = -1.0 \text{ м}$; $y = 0 \text{ м}$; $z = -1.5 \text{ м}$; высота эллипсоида – 1 м; диаметры эллипсоида в плоскости xOy равны 0.5 м. Толщина слоя навала грунта над верхом бассейна – 0.5 м

Проведенные исследования электродинамической модели показали, что при расположении вспомогательных источников поля $Q_m(x_m; y_m)$ на расстояниях, больших $10\lambda_{в\text{ среде}}$, аппроксимируемое поле внутри плоского контура L , на котором расположены приемные антенны, изменяется незначительно при изменении радиуса окружности, на которой расположены вспомогательные источники поля.

При вычислении значений скалярной функции Грина (4.4) считалось, что вся окружающая среда является вакуумом ($\epsilon_r = 1; \mu_r = 1$), т.к. принципиальным моментом предлагаемой методики является априорная неизвестность значений материальных параметров окружающей среды. Правомерность такого подхода обусловлена тем, что главной задачей является оценка степени неравномерности пространственного распределения неоднородностей с повышенной проводимостью и диэлектрической проницаемостью, а не точное вычисление значений проводимости и диэлектрической проницаемости в анализируемой области пространства.

Проведенные численные эксперименты показали, что в области частот, близких к частоте полуволнового резонанса области с повышенной проводимостью (рис. 4.29 и 4.30) 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.

На частоте волнового резонанса (рис. 4.31) проводящий эллипсоид, подобно электрическому вибратору с полной длиной $2l = \lambda_0$, характеризуется повышенной добротностью, а следовательно – изолированностью от окружающего его объема среды. Поэтому в области расположения эллипсоида на рис. 4.31 мы видим минимальные значения плотности потока активной мощности – проводящая неоднородность в режиме волнового резонанса сильно изолирована от окружающей ее среды, вытесняя потоки активной мощности электромагнитного поля.

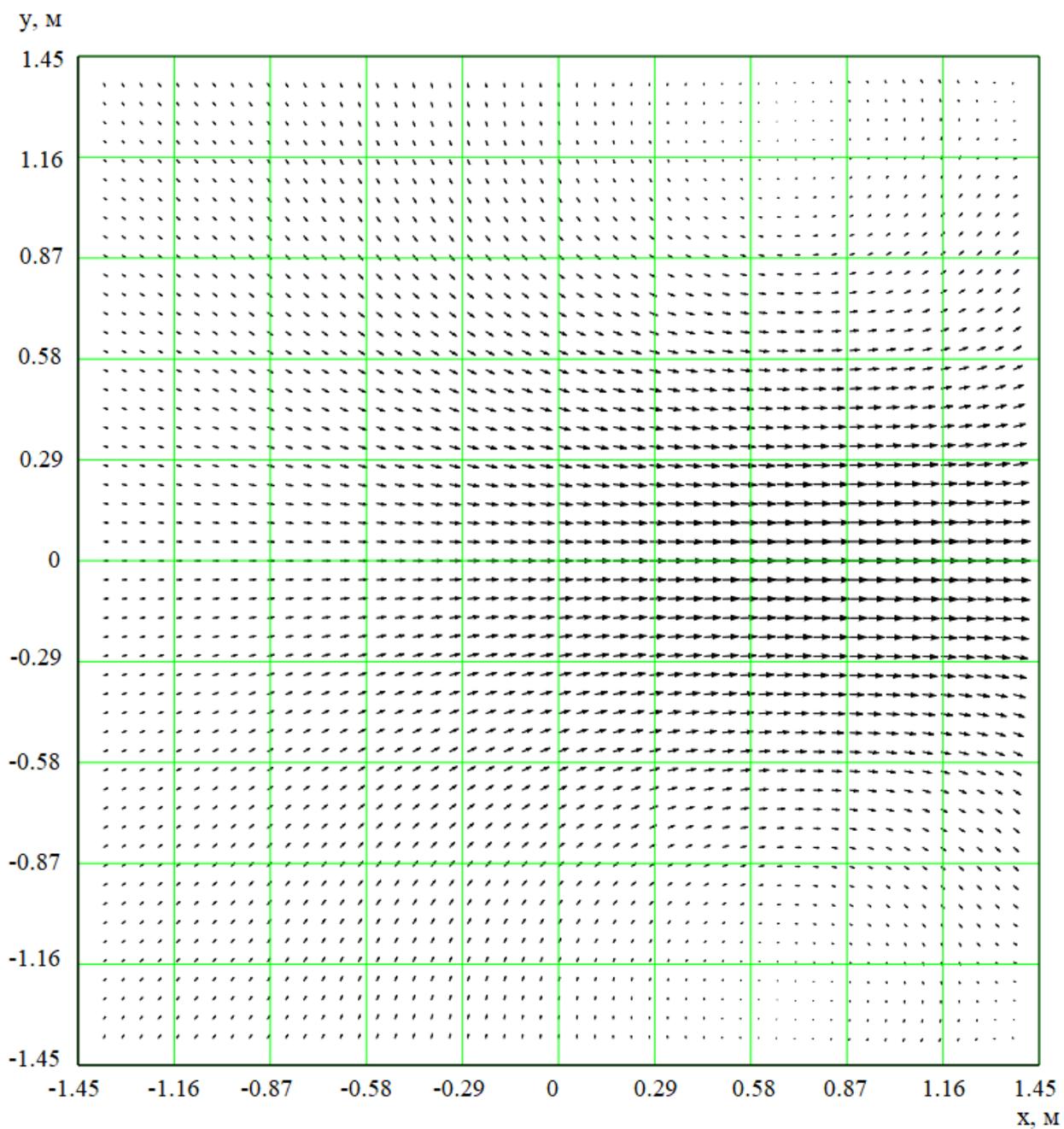


Рис. 4.29. Распределение реальной части вектора Пойнтинга на плоскости в сечении $z = -1.5$ м на частоте $F = 75$ МГц. Координаты центра неоднородности: $x = -1.0$ м;
 $y = 0$ м

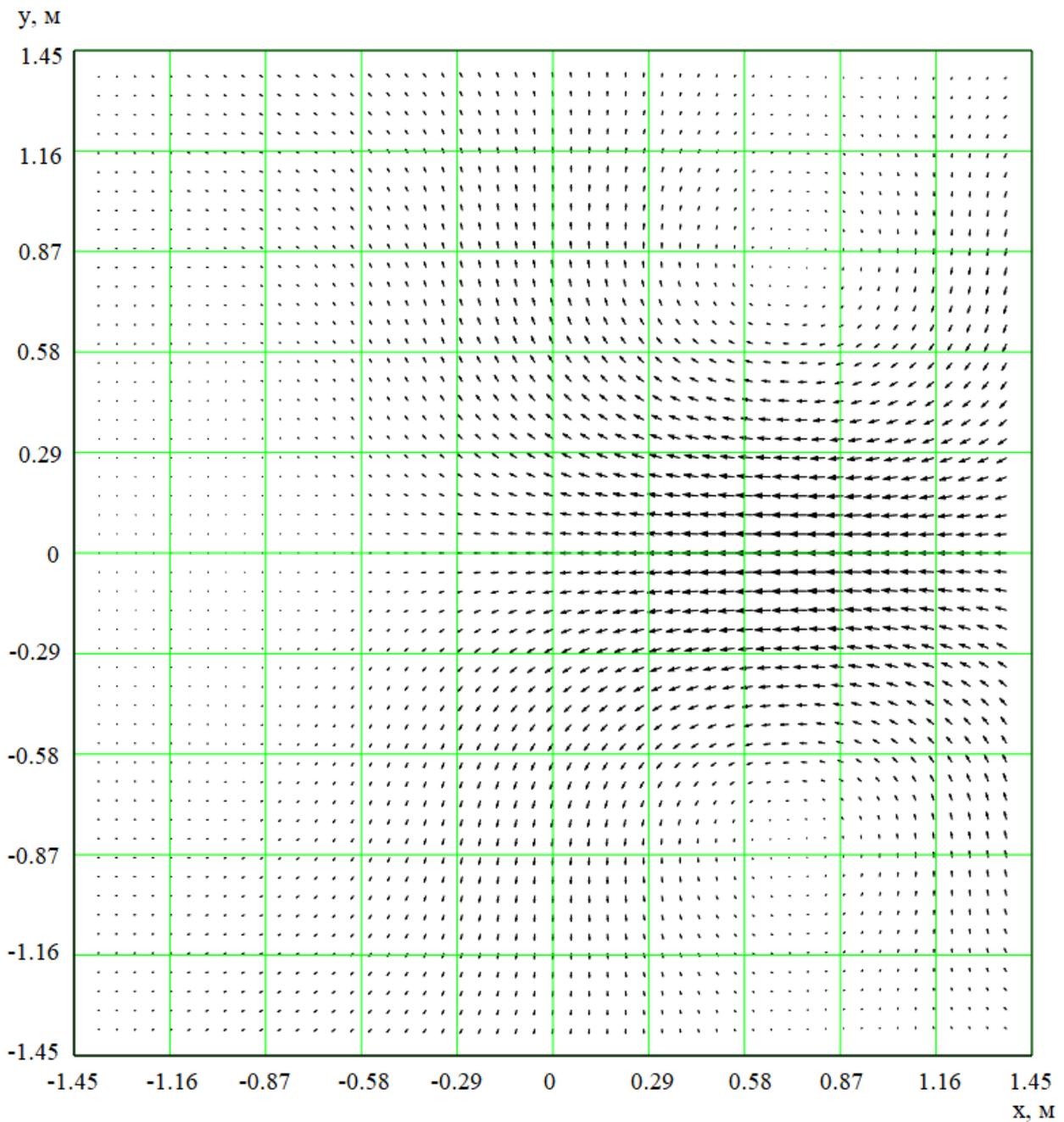


Рис. 4.30. Распределение реальной части вектора Пойнтинга на плоскости в сечении $z = -1.5$ м на частоте $F = 100$ МГц. Координаты центра неоднородности: $x = -1.0$ м; $y = 0$ м

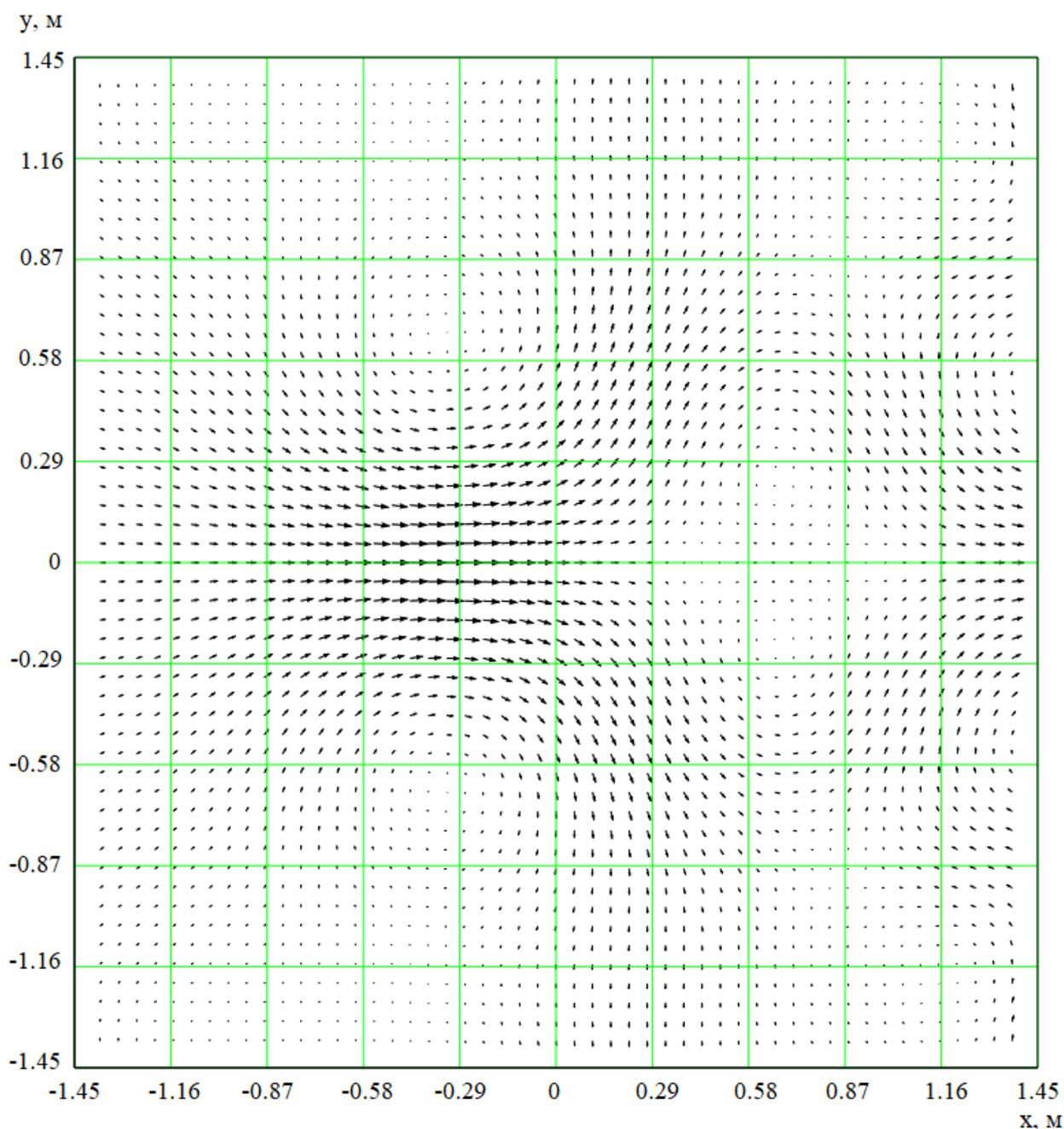


Рис. 4.31. Распределение реальной части вектора Пойнтинга на плоскости в сечении $z = -1.5$ м на частоте $F = 150$ МГц. Координаты центра неоднородности: $x = -1.0$ м; $y = 0$ м

При дальнейшем увеличении частоты, на частотах, выше частоты волнового резонанса, проводящая неоднородность вновь начинает сильно концентрировать потоки активной мощности (рис. 4.32), а потоки активной мощности в окружающих областях пространства носят вихревой характер.

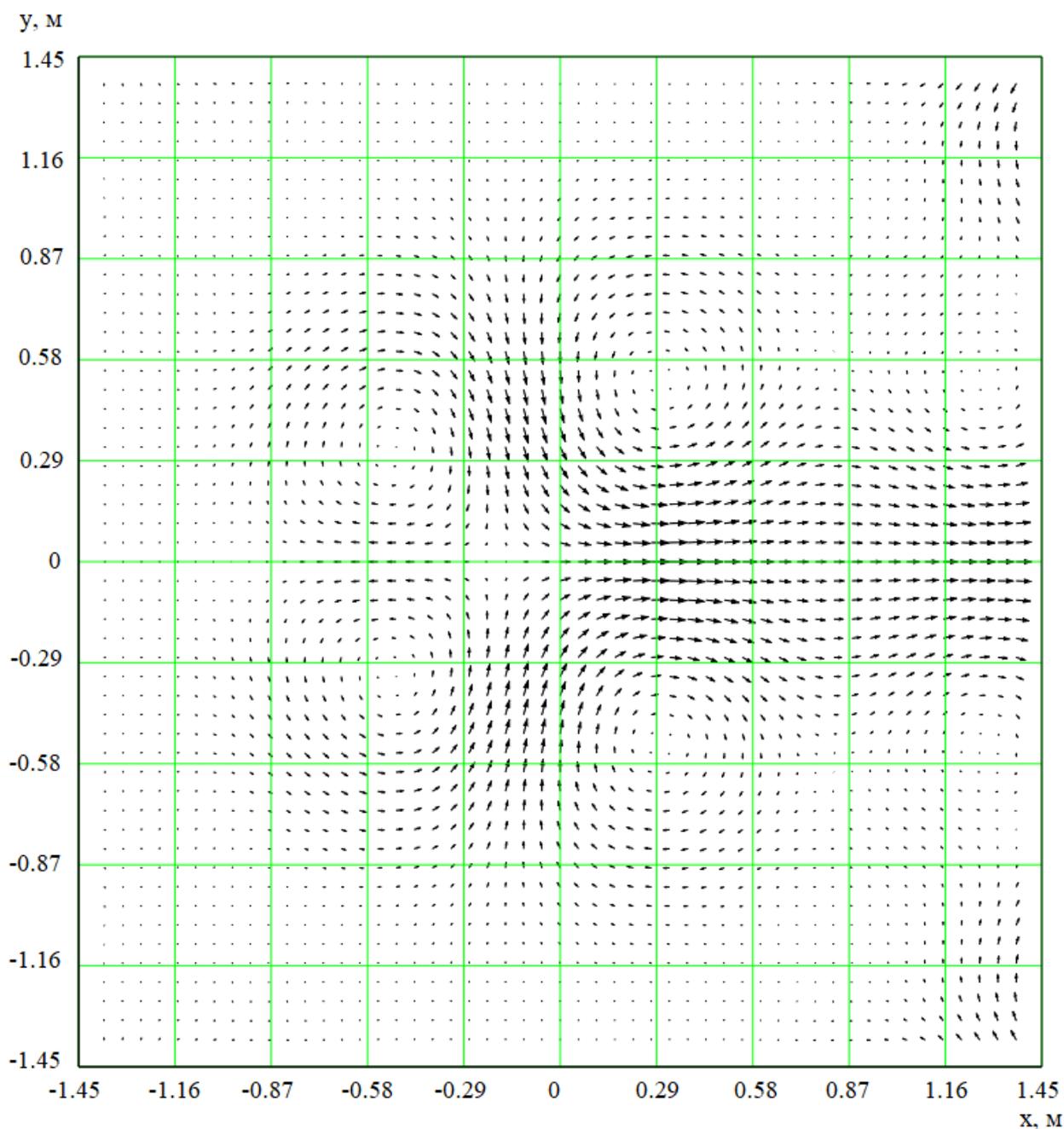


Рис. 4.32. Распределение реальной части вектора Пойнтинга на плоскости в сечении $z = -1.5$ м на частоте $F = 181$ МГц. Координаты центра неоднородности: $x = -1.0$ м; $y = 0$ м

Таким образом, предлагаемая методика позволяет оценить степень неоднородности среды в грунтовой полости, заполненной щебнем, содержащей области с повышенными значениями проводимости и диэлектрической проницаемости, на основе анализа 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.

4.3. Выводы по четвертой главе

Подводя итоги исследований, проведенных в четвертой главе диссертации, перечислим следующие полученные в ней результаты.

1. 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.

2. Был изготовлен уменьшенный, приблизительно в 20 раз, относительно оригинала, макет спирали Архимеда с экраном и шунтовым питанием, в котором в качестве изолирующего диэлектрика использовалась прозрачная эпоксидная смола. 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. Сравнение характеристик макета спирали Архимеда, уменьшенного, относительно оригинала, приблизительно, в 20 раз, 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.

3. Выяснено, что 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.

4. 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.

Заключение

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 $2 \div 3.4$ 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, характеризуемых легкостью транспортировки к месту эксплуатации и простотой монтажа. Разработаны конструкции подземных антенн резонаторно-целевого 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.

Список литературы

1. Лавров, Г.А. Приземные и подземные антенны / Г.А. Лавров, А.С. Князев. – М.: Сов. радио. 1965. 472 с.
2. Кинг, Р. Антенны в материальных средах. В 2-х книгах. Кн. 2. Пер. с англ. / Р. Кинг, Г. Смит. – М.: Мир, 1984. 824 с.
3. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг, С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко и др.; под ред. Г.З. Айзенберга. – 2-е, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1985. 536 с.
4. Айзенберг, Г.З. Антенны ультракоротких волн. – М.: Связьиздат, 1957. 698 с.
5. Брауде, Б.В. Широкополосные и диапазонные передающие антенны с распределенным излучением без использования поглощающих энергию активных сопротивлений / Б.В. Брауде. – Дис. ... докт. тех. Наук. - Л.: ЛПИ им. Калинина. – 1955. – 304с.
6. Брауде, Б.В. Электромагнитное поле провода, расположенного по оси цилиндрической полости в полупроводящей среде / Б.В. Брауде // Бюллетень электропромышленности Ленинграда. – 1946.– № 9-10.– С.3-16.
7. Надененко, С.И. Антенны / С.И. Найденко. – М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1959, 552 с.
8. Щелкунов, С.А. Антенны (Теория и практика): перевод с англ. / С.А. Щелкунов, Г.Т. Фриис; под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: Советское радио, 1955. – 603 с.
9. Фидельман, В.Е. Оценка взаимосвязи продольных и поперечных составляющих электромагнитных полей протяженных антенных устройств и систем, находящихся в реальных материальных средах с сезонно изменяемыми от климатических условий электрическими параметрами / Д.А. Антропов, В.Е. Фидельман // Антенны. - 2013. - Вып.12(199). - С. 55-60.
10. Фидельман, В.Е. Разработка высокоэффективных защищенных широкополосных пластинчатых антенн у границы материальных сред "воздух-земля" с улучшенными диапазонными свойствами и электрическими характеристиками /

Д.А. Антропов, О.Ю. Перфилов, В.Е. Фидельман // Антенны. – 2014. - Вып. 7 (206). - С. 49-53.

11. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн физической теории дифракции. – М.: Сов. радио, 1962. – 244 с.

12. Фейнберг, Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / Е.Л. Фейнберг. – М.: Наука - ФИЗМАТЛИТ, 1999. – 497 с.

13. Эминов, С.И. Теория интегрального уравнения тонкого вибратора/ С.И. Эминов // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т.38. – Вып.12. – С. 2160 – 2168.

14. Эминов, С.И. Теория интегро-дифференциальных уравнений вибраторов и вибраторных решеток / С.И. Эминов // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – 1997. – Т.V. – Вып.2 (18). – С. 48 – 58.

15. Бузов, А.Л. Автоматизированный комплекс технических средств для адаптивных радиолиний ДКМВ / А.Л. Бузов, С.Н. Елисеев, Ю.И. Кольчугин, М.А. Минкин, А.С. Сухарев // Вестник СОНИИР. – 2006. - №1 (11). – С.27-32.

16. Бузов, А.Л. Алгоритм адаптивного управления радиосредствами комплекса технических средств автоматизированной связи ДКМВ диапазона / А.Л. Бузов, Ю.И. Кольчугин, Е.Н. Маслов, М.А. Минкин // VII Международная научно-техническая конференция Проблемы техники и технологии телекоммуникаций 20-23 ноября 2006 г.: Материалы конференции. – Самара, 2006. – С.229-231.

17. Бузов, А.Л. Исследование влияния электропроводящей опоры на характеристики активной симметричной антенны ДКМВ диапазона / А.Л. Бузов, А.Д. Красильников, А.В. Оглоблин // Электросвязь. – 2015. - №6. – С.

18. Бузов, А.Л. Исследование путей повышения эффективности защищенных антенн / А.Л. Бузов, М.А. Бузова, Ю.И. Кольчугин // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докл. IV Международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2005. – С.196-197.

19. Бузов, А.Л. Исследования триортогональных антенных элементов ДКМВ диапазона для систем радиосвязи, использующих технологию ММО / А.Л. Бузов, А.Д. Красильников, А.В. Оглоблин // Радиотехника. – 2015.– №4.– С. 18-22.

20. Бузов, А.Л. Перспективы создания адаптивных ДКМВ радиолиний для сетей специальной радиосвязи / А.Л. Бузов, Ю.И. Кольчугин, М.А. Минкин // Проблемы совершенствования и развития специальной связи и информации, предоставляемых государственным органам: Материалы 4-й Всероссийской научной конференции, 10-11 февраля 2005 г. Часть 2 / Под общей редакцией профессора В. М. Щекотихина. – Орел: Академия ФСО России, 2005. – С.59

21. Бузов, А.Л. Разработка и реализация защищенных антенно-фидерных устройств постоянной готовности диапазона ВЧ / А.Л. Бузов, М.А. Бузова, А.В. Васин, О.Б. Гончарук, Ю.И. Кольчугин, А.П. Трофимов, В.В. Юдин // Вестник СОНИИР. – 2006. - №4 (14). – С.50-55.

22. Бузов, А.Л. Сравнительная оценка эффективности малогабаритных приемных активных рамочных и вибраторных антенн / А.Л. Бузов, А.Д. Красильников, А.В. Оглоблин // XXII Российская научно-техническая конференция ПГУТИ – Самара, 2015. – С.147.

23. Бузова, М.А. Интегральное уравнение второго рода для линейного вибратора / М.А. Бузова, В.В. Юдин // Вестник СОНИИР. – 2003. – №1. – С. 22 – 27.

24. Бузова, М.А. Интегральное уравнение Фредгольма второго рода для линейного вибратора, имеющее смысл граничного условия для магнитного поля / М.А. Бузова // Антенны. – 2003. – № 9 (76). – С. 18 – 22.

25. Бузова, М.А. Метод электродинамического анализа сложных металлических объектов на основе уравнений Фредгольма первого и второго рода и векторного интегрального уравнения с поверхностным интегралом / М.А. Бузова // Антенны. – 2007. – №10(125). – С.4–8.

26. Бузова, М.А. Методики оценивания коэффициента усиления и коэффициента бегущей волны подземных антенн / М.А. Бузова, И.А. Колояров // Электросвязь. – 2011. – №5. – С.32–34.

27. Бузова, М.А. Построение системы комбинированных методов математического моделирования сложных электродинамических систем / М.А. Бузова, С.А. Букашкин, М.А. Минкин // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2013. – № 3 (104). – С. 67–74.

28. Бузова, М.А. Приближенные интегральные уравнения второго рода в задачах электродинамического анализа поверхностных рассеивателей конечной толщины / М.А. Бузова, С.А. Букашкин, М.А. Минкин // Радиотехника. – 2014. – № 4. – С. 12–22.

29. Бузова, М.А. Проектирование проволочных антенн на основе интегральных уравнений: Учебное пособие для ВУЗов / М.А. Бузова, В.В. Юдин. – М.: Радио и связь, 2005. – 184 с.

30. Бузова, М.А. Электродинамическая модель защищенной антенны / М.А. Бузова, Ю.И. Кольчугин, В.В. Юдин. // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докл. IV Международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2005. – С.163.

31. Бузова, М.А. Электродинамический анализ проволочных антенн на основе системы уравнений Фредгольма первого и второго рода / М.А. Бузова// Антенны. – 2006. – №10(113). – С.11–15.

32. Букашкин, С.А. Перспективы реализации комплексов ДКМВ радиосвязи на основе технологии ММО / С.А. Букашкин, А.В. Оглоблин // Материалы IX Всероссийская межведомственная научная конференция «Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд государственного управления». - Орел, Россия – 2015.– С. 124-127.

33. Букашкин, С.А. Перспективы создания комплексов ДКМВ радиосвязи, использующих технологии ММО с пространственным и поляризационным разнесением/ С.А. Букашкин, А.В. Оглоблин // Цифровая обработка сигналов. 2014. – №4. – С. 28-31.

34. Букашкин, С.А. Построение и алгоритм работы радиолинии по технологии ММО на основе адаптивных фазированных антенных решеток // С.А. Букашкин, А.В. Оглоблин, Д.С. Шишкин // Радиотехника. – 2015.– №4.– С. 28-31.

35. Букашкин, С.А. Пропускная способность каналов ММО при различных схемах их реализации / С.А. Букашкин, А.В. Оглоблин // XXII Российская научно-техническая конференция ПГУТИ – Самара, 2015. – С.150.

36. Букашкин, С.А. Пути реализации технологии ММО в комплексах ДКМВ радиосвязи / С.А. Букашкин, А.В. Оглоблин // XV Международная научно-техническая конференция – Казань, 2014 – т.1.– С. 228-231.

37. Васин, А.В. Сеточное моделирование проволочной антенны, размещенной в диэлектрике / А.В. Васин, Ю.И. Кольчугин // XIII юбилейная Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (ПГАТИ, 31.01.06 – 04.02.06): Материалы конференции. – Самара, 2006. – С.117.

38. Верещагин, Е. О подземных и стелющихся антеннах / Е. Верещагин // Военный связист. - 1954. -№9. - С. 20-24.

39. Казанский, Л.С. Антенно-фидерные устройства декаметрового диапазона и электромагнитная экология / Л.С. Казанский, В.А. Романов. – М.: Радио и связь, 1996. – 270 с.

40. Казанский, Л.С. К вопросу о расчете входного импеданса подземных антенн / Л.С. Казанский, Ю.И. Кольчугин // Вестник СОНИИР. – 2007. - №1 (15). – С.45-50.

41. Казанский, Л.С. Особенности проектирования автоматизированных согласующих устройств для высокочастотных антенн ВЧ диапазона / Л.С. Казанский, М.А. Минкин // Вестник СОНИИР. – 2005. - №4 (10). – С.43-47.

42. Казанский, Л.С. Теория моделирования антенно-фидерных устройств линейными LC-цепями с потерями, их проектирование и техническая реализация в ВЧ-диапазоне: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.12.07 / Казанский Лев Серафимович. – Самара, 1998. – 375 с.

43. Казанский, Л.С. Фазирующие устройства ДКМВ диапазона на базе LC-сеток / Л.С. Казанский, А.Д. Красильников // Вестник СОНИИР. – 2007. – № 1 (15). С. 51 – 56.

44. Колояров, И.А. Контроль состояния подземных антенн диапазона ВЧ, размещаемых в неразборных диэлектрических укрытиях / И.А. Колояров // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы IX Международной научно-

технической конференции / Под общ. ред. В.И. Тамбовцева. – Челябинск: Изд. ЧелГУ, 2010. – С.64–65.

45. Коляров, И.А. Обеспечение постоянной готовности недоступных подземных антенн ДКМВ диапазона / И.А. Коляров // Труды НИИР. – 2010. – №4. С.63–67.

46. Коляров, И.А. Основы технологии эксплуатации подземных коротковолновых антенн систем резервной радиосвязи / И.А. Коляров // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: материалы XI Международной научно-технической конференции. – Уфа: Изд. УГАТУ, 2010. – С.208–210.

47. Кольцевая фазированная антенная решетка: пат. 2159488 Рос. Федерация: МПК H01Q21/06 / Алексеев С.М.; Быков В.Г.; Лесов М.А.; Норватов В.А.; Сосунов Б.В.; Фитенко Н.Г.; Чернолес В.П.; патентообладатель Управление государственного надзора за связью по Санкт-Петербургу и Ленинградской области; Военный университет связи. – № 2000101886/09; заяв. 24.01.2000; опубл. 20.11.2000.

48. Кольчугин, И.Ю. Исследования и разработка малогабаритных кольцевых антенных решеток ДКМВ диапазона с управляемыми пространственными и поляризационными характеристиками: автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н. / И.Ю. Кольчугин. – Самара: ПГУТИ, 2014. – 16 с.

49. Кольчугин, Ю.И. Способы повышения эффективности работы подземных антенн СЧ и ВЧ диапазонов / Ю.И. Кольчугин // Вестник СНИИР. – 2005. - №4 (10). – С.48-52.

50. Кольчугин, Ю.И. Электродинамическое моделирование защищенных подземных антенн при определении их характеристик направленности / Ю.И. Кольчугин, А.П. Трофимов // Вестник СНИИР. – 2008. - №2 (20). – С.68-71.

51. Курышев, А.А. К расчету входного сопротивления антенн, образованных из проводников, обтекаемых бегущей волной тока/ А.А. Курышев, Л.В. Озерова// Техника средств связи, серия ТРС, вып.8 – М.: ЦООНТИ «Экос», 1982. - С.101-110.

52. Львов, Е.В. Пластинчатые широкодиапазонные антенны у границы материальных сред / Е.В. Львов, В.Е. Фидельман. – под ред. к.т.н., к.в.н. Е.В. Львова. – Мытищи: ФГУ 16 ЦНИИИ МО РФ, 2009.– 402 с.

53. Муравьев, Ю.К. Антенны, ч.1,2 / Ю.К. Муравьев. – Л.: ВАС, 1963. – 624 с.

54. Муравьев, Ю.К. Справочник по расчету проволочных антенн / Ю.К. Муравьев – Л.: ВАС, 1978. - 392с.

55. Неганов, В.А. Линейная макроскопическая электродинамика: в 2-х т./ В. А. Неганов, С. Б. Раевский, Г.П. Яровой; под редакцией Неганова В. А. – М.: Радио и связь, 2000. – 509 с.

56. Неганов, В.А. Метод сведения уравнения Поклингтона для электрического вибратора к сингулярному интегральному уравнению / В.А. Неганов, И.В. Матвеев, С.В. Медведев // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т.26. – Вып.12. – С. 86 –

57. Неганов, В.А. Сингулярное интегральное уравнение для расчета тонкого вибратора/ В.А. Неганов, И.В. Матвеев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 1999. – Т.2. – № 2. – С. 27 – 33.

58. Букашкин, С.А. Перспективы создания комплексов ДКМВ радиосвязи, использующих технологии ММО с пространственным и поляризационным разнесением / С.А. Букашкин, А.В. Оглоблин // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – №4. – С. 28-31.

59. Павлов, П.П. Электромагнитное поле и распределение тока вдоль бесконечно длинного изолированного провода в проводящей среде / П.П. Павлов // Радиотехника и электроника. - 1961.-Т.6.- №8.-С 1293-1307.

60. Пестовский, И.Н. Повышение энергетического потенциала радиолинии [Текст] / И.Н. Пестовский, Л.С. Турнецкий, В.П. Чернолес // Мобильные системы. – 2007. - №2. – С.45-47.

61. 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.

62. Пестовский, И.Н. Особенности построения базовых излучателей для использования в подземных фазированных антенных решетках [Текст]/ И.Н. Пестовский // Электросвязь. – 2015. - №6. – С. 54-58.

63. Пестовский, И.Н. Реализация метода моментов для расчета электрических антенн в диссипативных средах [Текст]/ И.Н. Пестовский // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. - №1. – С. 76-82.

64. 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.

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. 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.

71. 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.

72. 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.

73. 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.

74. 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.

75. 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. — Самара. — 2016. — С. 168.

76. 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. — Самара. — 2016. — С. 179.

77. Разработка путей создания подземных антенных систем для ДКМВ радиосвязи. Пестовский И.Н. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара. Поволжский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. 2016 г. 218 с.

78. Подземная антенна: пат. 2115980 Рос. Федерация: МПК H01Q21/00, H01Q1/04 / Беляцкий А.И., Мясников О.Г., Нилов Г.А., Пустовалов Е.П., Самуйлов И.Н., Сосунов Б.В., Фитенко Н.Г., Чернолес В.П.– заяв. 31.07.1997; опубл. 20.07.1998.

79. Подземная антенна: пат. 2314606 Рос. Федерация: МПК H01Q 1/04 (2006.01)/ Проценко М.С., Самуйлов И.Н., Чернолес В.П.; заявитель и патентообладатель Военная академия связи. – № 2006126944/09; заяв. 24.07.2006; опубл. 10.01.2008, Бюл. №1.

80. Подземная антенна: пат. 2472263 Рос. Федерация: МПК H01Q 21/00 (2006.01) / Проценко М.С., Риконен Д.Ю., Чернолес В.П.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного" Министерства Обороны Российской Федерации. – № 2011112633/07; заяв. 01.04.2011; опубл. 10.01.2013, Бюл. №1.

81. Подземная фазированная антенная решетка: пат. 2170997 Рос. Федерация: МПК H01Q21/06 / Быков В.Г.; Воробьев В.В.; Небеснов А.Ф.; Рожков А.Г.; Фитенко Н.Г.; Чаиркин В.Е.; Чернолес В.П.; патентообладатель Управление государственного надзора за связью по Свердловской области; Военный университет связи. – № 2000109222/09; заяв. 12.04.2000; опубл. 20.07.2001.

82. Система радиосвязи: пат. 2103824 Рос. Федерация: МПК H04B13/02 / Хитров, Ю. А. Чернолес В. П.; патентообладатель Военная академия связи. – заявка № 95120734 с приоритетом от 13.12.1995 г.; опубл. 27.01.1998, Бюл. № 3.

83. Сосунов, Б.В. К расчету параметров проводника в многослойной оболочке / Б.В. Сосунов // Антенны. – 1976. – Вып. 24. – С. 94-97.

84. Сосунов, Б.В. Основы расчета подземных антенн / Б.В. Сосунов, В.В. Филиппов. – Л.: ВАС, 1990.–82 с.

85. Сосунов, Б.В. Электромагнитное поле изолированного проводника в однородной диссипативной среде /Б.В. Сосунов //Вопросы расчета и проектирования антенн и радиолиний. Под ред. Серкова В.П. – Л.: ВАС, 1990. – С.213-218.

86. Фазированная антенная решетка: пат. 2133531 Рос. Федерация: МПК H01Q21/00 / Быков В.Г., Самуйлов И.Н., Сосунов Б.В., Фитенко Н.Г., Чернолес В.П., Артамошин А.Д.; патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью "ФАРКОМ"; Военная академия связи. – № 98100950/09; заяв. 19.01.1998; опубл. 20.07.1999.

87. Чернолес, В. П. Распространение радиоволн на трассах радиолиний и антенны: курс лекций / В.П. Чернолес. – Л.: ВАС, 1985. – 86 с.

88. Электродинамические методы анализа проволочных антенн / А.Л. Бузов, Ю.М. Сподобаев, Д.В. Филиппов, В.В. Юдин; под ред. В.В. Юдина. – М.: Радио и связь, 2000. – 151с.

89. Юдин, В.В. Кольцевые антенные решетки: схемно-пространственная мультиплексия и направленное излучение /В.В. Юдин. – М.: Радио и связь, 2001. – 189 с.

90. Драбкин А. Л., Зузенко А. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио, 1974. 574 с.

91. Underground antenna: patent no. US3346864 USA: МПК 7 H01Q 1/04 / Harmon Gregory J. - 1966.

92. Wheeler H. A. Fundamental Limitations of Small Antennas // Proc. IRE. 1947. V. 35. P. 1479–1484.

93. Wheeler H. A. A Helical Antenna for Circular Polarization // Ibid. P. 1484–1488.

94. Chu L.J. Physical limitations of omni-directional antennas // J. Appl. Phys. – 1948. – Vol. 19. – P. 1163–1175.

95. Harrington R.F. Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency // J. Res. Nat. Bur. Stand. – 1960. – Vol. 64, № 1. – P. 1–12.

96. Collin R.E. Evaluation of antenna Q / R.E. Collin, S. Rothschild // IEEE Trans. on Antennas and Propag. – 1964. – Vol. 12, № 1. – P. 23–27.

97. Fante R.L. Quality factor of general ideal antennas // IEEE Trans. On Antennas and Propag. –1969. – Vol. 17, № 2. – P. 151–155.

98. McLean J.S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas// IEEE Trans. on Antennas and Propag. –1996. – Vol. 44, № 5. – P. 672–675.

99. В.П. Беличенко, А.С. Запасной. Электрически малые антенны: проблемы, сомнения, новые результаты. Доклады ТУСУРа, № 2 (24), часть 1, декабрь 2011. С. 186-189.

100. Grimes D.M. Radiation Q of dipole-generated fields / D.M. Grimes, C.A. Grimes // Radio Sci. – 1999. – Vol. 34, № 2. – P. 281–296.

101. Grimes D.M. Minimum Q of electrically small antennas. A critical review / D.M. Grimes, C.A. Grimes // Microwave Opt. Tech. Lett. – 2001. – Vol. 28, № 2. – P. 172–177.

102. Hansen R.C. A new Chu formula for Q / R.C. Hansen, R.E. Collin // IEEE Antennas and Propagation Magazine – 2009. – Vol. 51, № 5. – P. 38–41.

103. D. Sievenpiper, D. Dawson, M. Jacob, T. Kanar, S. Kim, J. Long, and R. Quarfoth, “Experimental validation of performance limits and design guidelines for small antennas,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 60, no. 1, pp. 8 –19, Jan. 2012.

104. Small Antenna Handbook, Robert C. Hansen and Robert E. Collin. _ 2011 John Wiley & Sons, Inc. Published 2011 by John Wiley & Sons, Inc. 346 pp.

105. On the Design of Vehicular Electrically Small Antennas for NVIS Communications. Maxim Ignatenko, Dejan S. Filipovic. DOI 10.1109/TAP.2016.2547018, IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Volume: 64, Issue: 6, June 2016. PP. 2136–2145. DOI: 10.1109/TAP.2016.2547018.

106. Loss Mechanisms in the Electrically Small Loop Antenna [Antenna Designer's Notebook] Brian A. Austin; Alan Boswell; Michael A. Perks. IEEE Antennas and Propagation Magazine. Volume: 56, Issue: 4, Aug. 2014). PP. 142 - 147 DOI: 10.1109/MAP.2014.6931671.

107. L.E. Volger, J.L. Noble, Curves of Input Impedance Change due To ground for Dipole Antennas. National Bureau of Standards Monograf 72, January 31, 1964.

108. Optimizing the Receiving Properties of Electrically Small HF Antennas Steven R. Best. The Radio Science Bulletin No 359 (December 2016), PP.13-29.

109. В. Слюсар. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты. Первая миля 3–4/2010. http://www.lastmile.su/files/article_pdf/2/article_2036_557.pdf

110. Metamaterial-Inspired Efficient Electrically Small Antennas. Aycan Erentok, and Richard W. Ziolkowski. *Transactions on Antennas and Propagation*, 56(3), 2008. PP. 691 - 707. DOI: 10.1109/TAP.2008.916949.

111. ELECTROMAGNETIC METAMATERIALS: TRANSMISSION LINE THEORY AND MICROWAVE APPLICATIONS. The Engineering Approach. Christophe Caloz, Tatsuo Itoh. University of California at Los Angeles. Wiley-IEEE Press. 2005. 376 p.

112. *Small Antennas*. John Volakis, Chi-Chin Chen, Kyohen Fujimoto. McGraw-Hill. 2004. 428 pp.

113. A Small and Bandwidth-Extended Dipole Antenna With Nonperiodic Left-Handed Transmission Line Loading. Wei-Ping Cao, L. Shafai, Bing-Zhong Wang, Si-Min Li, and Bei-Bei Li. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters (Volume: 13)*. PP. 1019 – 1022. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2326433.

114. At and below the Chu limit: passive and active broad bandwidth metamaterial-based electrically small antennas. R.W. Ziolkowski and A. Erentok. *IET Microw. Antennas Propag.*, 2007, 1, (1), pp. 116 – 128.

115. Efficient Radiation by Electrically Small Antennas made of Coupled Split-ring Resonators. *Sci. Rep.* 6, 33501; doi: 10.1038/srep33501 (2016). Liang Peng, Peiwei Chen, Aiting Wu, Gaofeng Wang.

116. An Investigation Into the Gustafsson Limit for Small Planar Antennas Using Optimization. Morteza Shahpari; David V. Thiel; Andrew Lewis. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation (Volume: 62, Issue: 2, Feb. 2014)*. PP. 950– 955. DOI: 10.1109/TAP.2013.2290794.

117. *Small Antennas: Miniaturization Techniques and Applications*. 2016 Guest Editors: Wenhua Yu, Yingsong Li, and Manos M. Tentzeris, *International Journal of Antennas and Propagation*. *International Journal of Antennas and Propagation*. Volume 2016, Article ID 9410108, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9410108>.

118. D. Poljak, *Advanced Modeling in Computational electromagnetic Compatibility*, John Wiley and Sons, New York. 2007. 520 p.

119. *Computational Methods in Electromagnetic Compatibility. Antenna Theory Approach Versus Transmission Line Models*. Poljak, Dragan / Drissi, Khalil El Khamlichi. John Wiley and Sons, New York. 2018. 432 p.

120. H.C. Pocklington, *Electrical Oscillations in Wires*, Proc. Camb. Phil. Soc., 9, pp. 324-332, 1897.

121. E. Hallén's, "Theoretical investigations into the transmitting and receiving qualities of antennae," *Nova Acta (Uppsala)*, vol. 11, pp. 1–44, 1938.

122. R.P. Silvester, R. L. Ferrari, *Finite Elements for Electrical Engineers*, 3rd edition, Cambridge University Press, 1996. 494 p.

123. Miller, E.K., Poggio, A.J., Burke, G.J., Selden, E.S., *Analysis of wire antennas in the presence of a conducting half-space. Part I. The vertical antenna in free space*, Canadian Journal of Physics, 50, 1972, pp. 879-888.

124. Miller, E.K., Poggio, A.J., Burke, G.J., Selden, E.S., *Analysis of wire antennas in the presence of a conducting half-space. Part II. The horizontal antenna in free space*, Canadian Journal of Physics, 50, 1972, pp. 2614-2627.

125. Sarkar, T.K., *Analysis of arbitrarily oriented thin wire antennas over a plane imperfect ground*, Archiv fur elektronik und ubertragungstechnik, 31, 1977, pp. 449-457.

126. Parhami, P. Mitra, R., *Wire antennas over a lossy half-space*, IEEE Trans. AP, 28, 1980, pp. 397-403.

127. Sarkar, T.K., *Analysis of arbitrarily oriented thin wire antennas over a plane imperfect ground*, Archiv fur elektronik und ubertragungstechnik, 31, 1977, pp 449-457.

128. M. Rancic, P. Rancic, *Horizontal linear antennas above a lossy half-space: A new model for the Sommerfeld's integral kernel*. Int. J. El. Commun. AEU. Vol. 65(10), pp. 879-887, 2011.

129. M. Rancic, S. Aleksic, *Horizontal dipole antenna very close to lossy half space surface*. Electrical Review. Vol.7b, pp. 82-85, 2012.

130. M. Rancic, R. Jankoski, S. Silvestrov, S. Aleksic, *Analysis of Horizontal Thin-Wire Conductor Buried in Lossy Ground: New Model for Sommerfeld Type Integral*,

Engineering Mathematics in electromagnetics, fluid mechanics, material physics and financial engineering, Ch. 3 in Springer Proc. in Mathematics and Statistics, Springer, Heidelberg, 2016. 341 p.

131. D. Poljak and M. Rančić, "On the Frequency Domain Analysis of Straight Thin Wire Radiating Above a Lossy Half-Space : Pocklington equation versus Hallén equation revisited: 80th Anniversary of the Hallén Integral Equation," 2018 26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2018, pp. 1-6, doi: 10.23919/SOFTCOM.2018.8555820.

132. Weiland, T., "A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields," Electronics and Communications AE " U, Vol. 31, No. 3, 116–120, 1977.

133. Van Rienen, U. and T. Weiland, "Triangular discretization method for the evaluation of RF-fields in cylindrically symmetric cavities," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-21, No. 6, pp. 2317–2320, 1985.

134. Schuhmann, R. and T. Weiland, "A stable interpolation technique for FDTD on nonorthogonal grids," International Journal on Numerical Modelling, Vol. 11, pp. 299–306. 1998.

135. Thoma, P. and T. Weiland, "A consistent subgridding scheme for the finite difference time domain method," International Journal of Numerical Modelling, Vol. 9, pp. 359–374, 1996.

136. Chen, W. K., Graph Theory and It's Engineering Applications, Vol. 5, Advanced Series in Electrical and Computer Engineering, World Scientific, Singapore, 1997. 698 p.

137. E. Tonti, "On the Geometrical Structure of Electromagnetism", in Gravitation, Electromagnetism and Geometrical Structures, for the 80th birthday of A. Lichnerowicz, Edited by G. Ferrarese, 1995, Pitagora Editrice Bologna, pp.281-308.

138. Chu L. J. Physical limitations on omni-directional antennas // J. Appl. Phys. 1948. Vol. 19 P. 1163–1175.

139. Kraus, J. D., Antennas: Second Edition, New Delhi // McGraw Hill, Inc., 1997. P.892.

140. Разработка и производство магнитомягких материалов (ферритов) // Санкт-Петербург. ОАО «Завод Магнетон»: Санкт-Петербург, 2021, сайт: URL: http://www.magneton.ru/cat.php?id=134#main_top.

141. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа, 1977. – 448 с.

142. Уолтер, Карлтон Х. Антенны бегущей волны / Перевод с англ. А. Д. Иванова [и др.]; под общ. ред. канд. техн. наук А. Ф. Чаплина. - Москва: Энергия, 1970. - 448 с.

143. В.Г. Веселаго. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // УФН. — 1967. — Т. 92, № 7. — С. 517.

144. В.Г. Веселаго. О формулировке принципа Ферма для света, распространяющегося в веществах с отрицательным преломлением. // УФН. — 2002. — Т. 172, № 10. — С. 1215.

145. В.Г. Веселаго. Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления (Сессия 26.03.03) // УФН. — 2003. — Т. 173, № 7. — С. 790.

146. Pendry, John B. Negative Refraction // Contemporary Physics: journal. — 2004. — Vol. 45, № 3. P. 191-202. doi:10.1080/00107510410001667434.

147. J.B. Pendry et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. – IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1999, № 47, p. 2075–2081.

148. M. Entezami, S. Sadeghi and R. Faraji-Dana, "A Compact Unidirectional Wideband Step Slot Antenna over an Artificial Magnetic Conductor," 2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), 2018, pp. 1-2, DOI: 10.1109/ANTEM.2018.8572978.

149. High-Impedance Electromagnetic Surfaces. D.F. Sievenpiper. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering. University of California, Los Angeles. 1999. 150 pp.

150. X. Song, C. Yang, T. Zhang, Z. Yan, and R. Lian, "Broadband and Gain Enhanced Bowtie Antenna with AMC Ground," Prog. Electromagn. Res. Lett., vol. 61, no. April, pp. 25–30, 2016.

151. Low-Profile Microstrip End-Fire Antennas Based on Metamaterial Substrates. Masoud Ahmadi. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science in the college of graduate studies (electrical engineering) the University of British Columbia (Okanagan). 2018. 86 pp.

152. Broadband and Low-Profile Slot Antenna with AMC Surface for X/Ku Applications. X. Y. Song, T. L. Zhang, and Z. H. Yan. Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 71, 189–197, 2018.

153. A Substrate for Small Patch Antennas Providing Tunable Miniaturization Factors. K. Buell, H. Mosallaei, K. Sarabandi. IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 54, NO. 1, JANUARY 2006. pp. 135-146.

154. Integrated Millimeter-Wave On-Chip Antenna Design Employing Artificial Magnetic Conductor. F. Lin, B.L. Ooi. 2009 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology. Pp. 174-177.

155. The Performance Comparison of Printed Dipole Antenna with Two Different Structures of AMC Ground Plane. M. Abu, M. K. A. Rahim, M. K. Suaidi, I. M. Ibrahim, N.M. Nor. 2011 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM 2011), 12th - 14th December 2011, Seremban, Malaysia. Pp. 157-160.

156. Unidirectional AMC Reflector backed L-band Annular Slot Antenna. Saugata Dutta, Kush Agarwa. IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2015), 2 - 4 November 2015, Tel Aviv, Israel. 5 p.

157. Y. Su and Z. N. Chen, "AMC-based high-isolation SIW slot array antennas for ka-band SAR systems," 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/APCAP.2017.8420391.

158. J. Bang, Y. Hong and J. Choi, "MM-wave slot array antenna backed by AMC reflector for 5G smartwatch applications," 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2018.0999.

159. J. Joubert, J. C. Vardaxoglou, W. G. Whittow and J. W. Odendaal, "CPW-Fed Cavity-Backed Slot Radiator Loaded With an AMC Reflector," in IEEE Transactions on

Antennas and Propagation, vol. 60, no. 2, pp. 735-742, Feb. 2012, doi: 10.1109/TAP.2011.2173152.

160. Банков С. Е. Электромагнитные кристаллы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 349 с.

161. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989. 453 с.

162. Бахвалов Ю.А., Князев С.Ю., Щербаков А.А. Математическое моделирование физических полей методом точечных источников // Известия РАН. Серия физическая, 2008. Т. 72. № 9. С. 1259-1261.

163. Рембовский Ю.А. Теория и методы проектирования сверхширокополосных антенных систем аппаратуры радиопеленгации стационарного и мобильного базирования. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. 434 с.

164. Иванов А.В., Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А. Подземная антенна метровых волн на основе патч-структуры с метаматериальной подложкой // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 8. С. 80–90.

165. Иванов А.В., Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А. Подземная антенна для защищенной системы авиационной радиосвязи. Подземная антенна для защищенной системы авиационной радиосвязи. Телекоммуникации. 2021. № 12. С. 8-15.

166. В.В. Блинов, В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин. Разработка и исследование штыревых антенн с повышенной механической прочностью. Теория и техника радиосвязи. 2021. № 4. С. 28-43.

167. В.В. Блинов, В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин. Использование феррита в качестве импедансно-согласованной среды для уменьшения габаритных размеров антенны УКВ диапазона. Теория и техника радиосвязи. 2021. № 2. С. 66-72.

168. 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.

169. Исследование малогабаритной УКВ антенны вибраторного типа с плечами спиральной формы / Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Федоров С.М. // Вестник ВГТУ. 2022. Т. 18. № 1. С. 91-96.

170. Модифицированный вибратор Пистолькорса с плечами на основе трех цилиндрических спиралей, замкнутых на торцах / Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А. // Вестник ВГТУ. 2022. Т. 18. № 1. С. 123-128.

171. Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Федоров С.М. Методы численного электродинамического моделирования приземных и подземных антенн // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 2. С. 55–63.

172. Исследование возможности использования антенн резонаторно-щелевого типа в качестве подземных излучателей УКВ диапазона. Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Федоров С.М. // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 3. С. 58–64.

173. Методика оценки степени неоднородности диэлектрической среды, используемой для изоляции подземной антенны УКВ диапазона. Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Федоров С.М. // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 2. С. 46–54.

174. Экспериментальные исследования макета подземной антенны дециметрового диапазона волн в виде спирали Архимеда с экраном. Володько А.В., Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А. // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 2. С. 32–38.

175. Варианты реализации подземной антенны УКВ диапазона в виде двухзаходной спирали Архимеда с экраном. Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Федоров С.М. // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 2. С. 68–77.

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

177. А. В. Иванов, В. И. Николаев, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин. Подземная резонаторно-щелевая антенна ультракоротковолнового диапазона волн.

Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVII Международной НТК. Воронеж. 2021 г. Издательский дом ВГУ. Т. 3. С. 359-366.

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

179. Иванов А.В., Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А. Исследование возможности использования резонаторно-щелевой антенны в качестве подземной антенны УКВ диапазона. 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.

180. Иванов А.В., Николаев В.И., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А. Исследование подземной антенны УКВ диапазона в виде патч-излучателя с метаматериальной подложкой. 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.

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

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

Приложение А.



«УТВЕРЖДАЮ»

Научный руководитель АО «Концерн
«Созвездие» (г. Воронеж),
академик РАН, д.т.н., профессор

 Борисов В.И.

« 14 » 04 2022 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации Пендюрина Владимира Андреевича, выполненной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Мы, члены комиссии, назначенной научным руководителем АО «Концерн «Созвездие» Борисовым В.И., в следующем составе: председателя комиссии – начальника отдела к.т.н. Подшиваловой Г.В., и членов комиссии – ведущего научного сотрудника к.т.н. Попова И.В. и руководителя проекта А.Ю. Михина, подтверждаем, что перечисленные ниже результаты, полученные Пендюриным В.А., внедрены в АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж).

Перечень внедренных результатов

№	Наименование внедренных результатов	Итоговая эффективность внедренных результатов
1	Методика проектирования подземных антенн УКВ диапазона на основе модифицированных вариантов спирали Архимеда с экраном. Результаты численного электродинамического моделирования антенны. Результаты натурных экспериментальных исследований макета антенны в масштабе 1:20.	Существенное повышение надежности функционирования аппаратуры связи при мощных механических воздействиях.
2	Методика проектирования подземных антенн УКВ диапазона в виде патч-элемента с метаматериальной подложкой. Результаты численного электродинамического моделирования антенны. Результаты натурных экспериментальных исследований полноразмерного макета антенны.	Уменьшение габаритных размеров антенной системы в более, чем 3 раза, за счет использования метаматериальной подложки. Существенное снижение себестоимости подземной антенной системы, возможность изготовления излучателя в заводских условиях.

Председатель комиссии



Подшивалова Г.В.

Члены комиссии



Попов И.В.



Михин А.Ю.

Приложение Б.



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
**ВОРОНЕЖСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ «ВЕГА»**

Московский пр., д.7 б, г. Воронеж, 394026
телефон: (473) 262-27-03, факс: 262-27-20
E-mail: vega@vniivega.ru
ОКПО 29692071, ОГРН 1053600451013
ИНН/КПП 3662103035/366201001

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

АО «ВНИИ «Вега»

д.э.н., к.т.н., профессор

Штефан В.И.

2022г.



№ _____

на № _____ от _____

Акт внедрения

результатов диссертации Пендюрина Владимира Андреевича на тему «Защищенные приземные и подземные антенны УКВ диапазона», выполненной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Мы, члены комиссии, назначенной генеральным директором АО «ВНИИ «Вега», д.э.н., к.т.н., профессором Штефаном В.И., в следующем составе: председателя комиссии – заместителя генерального директора АО «ВНИИ «Вега» по науке Белозерцева Ю.В., и членов комиссии – заместителя генерального директора АО «ВНИИ «Вега» по качеству, к.т.н. Туровцева М.А. и советника генерального директора АО «ВНИИ «Вега», к.т.н., с.н.с. Нехорошева Г.В., подтверждаем, что перечисленные ниже результаты, полученные генеральным директором АО НПП «Автоматизированные системы связи» Пендюриным В.А., использованы в АО «ВНИИ «Вега» (г. Воронеж) в ходе выполнения плановой СЧ ОКР «Опорник - Вега - КТС РД».

Перечень внедренных результатов

№	Наименование внедренных результатов	Итоговая эффективность внедренных результатов
1	Методика проектирования подземных антенн для аппаратуры беспроводного доступа в сеть	Повышение надежности функционирования аппаратуры беспроводного доступа в сеть в сложных погодных условиях. Снижение себестоимости антенных систем базовых комплексов аппаратуры беспроводного доступа в сеть. Уменьшение габаритных размеров антенных систем за счет использования в их конструкции метаматериалов.
2	Методика проектирования электрически малых антенн для аппаратуры связи мобильного базирования.	Уменьшение габаритных размеров антенн для аппаратуры связи мобильного базирования.

Председатель комиссии

Члены комиссии

Белозерцев Ю.В.

Туровцев М.А.

Нехорошев Г.В.

Приложение В.

УТВЕРЖДАЮ
Директор Центра системных исследований и разработок – филиал АО «Научно-технический центр РЭБ»
кандидат технических наук, доцент
исследований и разработок
А.А. Болкунов
« 19 » января 2022 года



А К Т

о реализации результатов диссертационных исследований
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Пендюрина Владимира Андреевича

Комиссия в составе: председателя – главного инженера ЦСИР, кандидата технических наук, доцента Булычева О.А., членов комиссии – ведущего научного сотрудника, кандидата технических наук, доцента Юшинина С.Ю. и начальника отдела, кандидата технических наук, старшего научного сотрудника Юзвенко С.В. составила настоящий акт о том, что научные результаты:

методика проектирования многолучевых антенн УКВ диапазона с полноазимутальным диаграммообразованием, основанная на синтезе линзы, имеющей форму усеченного конуса, в качестве материала которой используется мраморный или гранитный щебень, облучаемой системой вибраторных элементов;

методика контроля степени влажности диэлектрической среды, используемой в приземных и подземных антеннах, основанная на применении метода вспомогательных дискретных источников поля, измеренного в ряде точек с помощью электрически малых антенн,

представленные в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Пендюрина В.А., использованы в ходе выполнения промышленной НИР «Выбор направлений исследований, обоснование возможных вариантов построения пространственно-распределенной системы определения местоположения мобильных объектов» (шифр «Мобилок», Государственный контракт от 13.06.2017 № 1719187343451452466001998. Заказчик - УПМИ и СП МО РФ. Головной исполнитель – АО «НТЦ РЭБ»).

Председатель комиссии:
Главный инженер
кандидат технических наук, доцент



О.А. Булычев

Члены комиссии:
Ведущий научный сотрудник
кандидат технических наук, доцент



С.Ю. Юшинин

Начальник отдела
кандидат технических наук, старший научный сотрудник



С.В. Юзвенко

Приложение Г.

Основные положения методики проектирования приземных и подземных антенн УКВ диапазона для систем управления

1. Для анализа характеристик антенн используется метод конечного интегрирования Вейланда, реализованный в пространственно-временной и пространственно-частотной областях в пакете численного электродинамического моделирования Microwave Studio CST.

2. Оптимизация характеристик антенн проводилась с использованием двух-этапной процедуры оптимизации с помощью пакета численного электродинамического моделирования Microwave Studio CST: на первом этапе производился поиск глобального минимума целевой функции с помощью генетического алгоритма; на втором этапе значения параметров уточнялись с помощью квази-Ньютоновского метода локальной оптимизации.

3. Критерии оптимизации: минимизация омических и диссипативных потерь в антенне и окружающей ее диссипативной среде для широкого интервала изменения ее материальных параметров (диэлектрической проницаемости и проводимости) для случаев отсутствия и наличия навала слоя грунта на антенну; минимизация чувствительности входных характеристик и параметров диаграммы направленности антенны к изменению величин диэлектрической проницаемости и проводимости грунта, а также – толщине слоя навала грунта на антенну.

4. Ограничения, накладываемые на геометрические параметры антенны в ходе выполнения процедуры оптимизации: габаритные размеры антенны не должны превышать заданные; механическая прочность антенны должна быть не меньше заданной.

5. Первоначальное приближение параметров проектируемых антенн выбирается исходя из их упрощенных физических моделей. В частности: при задании первоначальных параметров приземных антенн не учитывается влияние обтекателя и конечности размеров подстилающей поверхности; при задании первоначальных параметров подземных антенн не учитывается влияние конечности размеров экрана и магистрального кабеля.

6. В процессе оптимизации подземных антенн минимизируется влияние магистрального кабеля на входные характеристики антенны, величину ее коэффициента полезного действия и диаграмму направленности. Также учитываются механические свойства коаксиального кабеля, в частности – величина минимального радиуса его изгиба.

7. При выборе материалов и комплектующих изделий отдается предпочтение сертифицированным для возможности их устойчивого функционирования при нахождении вблизи источника при мощных механических воздействиях, в частности – использования опорных стоек аттестованных антенн СВЧ диапазона для построения на их основе антенн УКВ диапазона; использования гранитного щебня в качестве материала с небольшими потерями и незначительно абсорбирующего влагу, а также – аттестованных коаксиальных кабелей высокой механической прочности.