

**МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

На правах рукописи



Гаджиев Эльчин Вахидович

УКВ антенны малых космических аппаратов

Специальность: Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

ШИФР: 05.12.07

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор Воскресенский Дмитрий Иванович

Москва – 2016

Оглавление

Введение	5
Актуальность темы диссертации	5
Цель работы	8
Основные задачи	8
Методы исследования	9
Научная новизна	9
Практическая значимость результатов работы	9
Реализация и внедрение результатов работы	10
Достоверность полученных результатов	10
Основные положения, выносимые на защиту	10
Апробация результатов работы	10
Публикации	12
Личный вклад	14
Объём и структура работы	14
Глава 1. Состояние и перспективы развития бортовых АФУ КА	16
1.1 Тенденция развития космической техники	16
1.2 Постановка задачи	26
1.3 Специфика бортовых антенн КА	27
1.4 Варианты построения бортовых АФУ КА	28
1.4.1 Применение конструктивных решений	28
1.4.2 Применение печатных технологий при проектировании бортовых антенн	30
1.4.2.1 Спиральные антенны, выполненные по печатным технологиям	30
1.4.2.2 Фрактальные антенны	31
1.4.2.3 Микрополосковые антенны	34
1.4.3 Другие варианты построения антенной системы КА	36
1.5 Требования к характеристикам антенн малых КА	37
1.5.1 Характеристики направленности	38
1.5.2 Согласование	39
1.5.3 Частотные характеристики	41
1.5.4 Массогабаритные требования	42
1.6 Выводы по главе 1	43

Глава 2. Особенности построения малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА	44
2.1 Условия работы бортовых антенн КА	44
2.1.1 Механические воздействия	45
2.1.2 Температурные воздействия	46
2.1.3 Воздействие космического пространства	47
2.2 Требования к конструкции и материалам антенн малых КА	51
2.2.1 Требования к механическим воздействиям	51
2.2.2 Требования к температурным воздействиям	53
2.2.3 Требования к воздействиям космического пространства	54
2.3 Вариант построения малогабаритной, невыступающей бортовой антенной системы малых КА с помощью МПА	55
2.4 Антенные системы КА «Ионосфера»	57
2.5 Основные соотношения построения МПА	63
2.6 Особенности построения УКВ МПА	65
2.6.1 Способы миниатюризации МПА	68
2.6.2 Вариант миниатюризации УКВ МПА	66
2.7 Выбор диэлектрика подложки при построении миниатюрных УКВ МПА	68
2.8 Выводы по главе 2	73
Глава 3. Методика приближённого расчёта характеристик направленности бортовой МПА малых КА	74
3.1 Общая характеристика приближённых методов	74
3.2 Приближенная методика расчёта характеристик направленности бортовых МПА малых КА	75
3.3 Выводы по главе 3	93
Глава 4. Моделирование антенной системы класса малых КА	94
4.1 Моделирование антенной системы малого КА «Ионосфера»	96
4.1.1 Варианты построения МПА с круговой поляризацией	96
4.1.2 Модель МПА 137 МГц	98
4.1.3 Модель МПА 150 МГц	102
4.1.4 Модель МПА 400 МГц	105
4.1.5 Многодиапазонные МПА	108
4.1.5.1 Способы построения многодиапазонных МПА	108
4.1.5.2 Вариант построения многодиапазонных МПА	110

4.1.5.3 Модель МПА 150/400 МГц	111
4.2 Сравнение антенных систем малого КА «Ионосфера»	114
4.3 Моделирование антенной системы сверхмалых КА	117
4.3.1 Моделирование антенной системы сверхмалого КА «CubeSat»	118
4.4 Экспериментальное исследование антенной системы класса малых КА	122
4.4.1 Схема измерительной установки	123
4.4.2 Измерение характеристик направленности бортовой МПА малых КА	124
4.4.3 Измерение характеристик направленности бортовой МПА сверхмалых КА	128
4.4.4. Анализ полученных результатов	131
4.5 Выводы по главе 4	134
Заключение	135
Список сокращений	137
Список литературы	138

Введение

Актуальность темы диссертации

Человечество начало осваивать космическое пространство с 1957 года, когда СССР вывел первый искусственный спутник Земли. С того момента уже прошло более полувека и освоение космоса шагнуло далеко вперёд. На сегодняшний день уже невозможно представить современное технологическое общество без использования сведений и данных с метеорологических, связных, навигационных, телекоммуникационных и других спутниковых систем и комплексов. При этом очевидно, что развитие космической индустрии продолжится активными темпами и в дальнейшем, причём всё больше и больше стран вступают в клуб «космических держав».

Обеспечение обмена информацией между космическим аппаратом (КА) и наземными пунктами управления является одной из главных задач. От качества и непрерывности сеансов связи КА с наземными службами зависит выполнение возложенной целевой задачи на КА [1].

К бортовым антенно-фидерным устройствам (АФУ) КА предъявляются весьма жёсткие требования в виду того, что данный класс антенн обладает спецификой [2], которая заключается:

- в определённом месте установки антенн на поверхности КА;
- во влиянии корпуса самого КА и целевой аппаратуры на характеристики направленности бортовой антенны (коэффициент стоячей волны (КСВ), диаграмма направленности (ДН), коэффициент усиления (КУ) и др.), которое приводит к их ухудшению;
- во влиянии космического пространства, которое снижает работоспособность бортовых антенн (радиационное излучение, резкий перепад температур при движении КА по целевой орбите и т.д.);
- во влиянии условий запуска КА, так как при запуске бортовые антенны подвергаются жёстким механическим нагрузкам (вибрация, удары).

В настоящее время помимо указанных выше требований также предъявляются требования и по массогабаритным показателям бортовых АФУ. Данные требования обусловлены следующим фактором.

Существенно изменились приоритеты в разработке самих КА. Видимое преимущество по ряду направлений космической деятельности получило создание малых КА по сравнению с крупногабаритными и тяжёлыми КА [3–10].

Благодаря ряду преимуществ, например, малый срок разработки (около трёх лет), достаточно низкая стоимость разработки (по сравнению с большими КА) и возможность кластерного выведения на орбиту (не менее четырёх малых КА за один запуск), малые КА стремительно «завоёвывают» космический сектор. Особенно эффективно применение малых КА в составе космических комплексов или систем (в составе четырёх–пяти КА), например, «Канопус–В», «Ионозонд» и др. [11]. Таким образом, появился новый класс КА – малые КА [12]. Причём спектр выполняемых задач данным классом КА весьма широкий: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), мониторинг чрезвычайных ситуаций, метеонаблюдение, связь, навигация и т.д., что в свою очередь свидетельствует о том, что данный класс КА может выполнять те же целевые задачи, что и крупногабаритные и тяжёлые КА.

Учитывая явные преимущества применения малых КА, ведущие отечественные и зарубежные предприятия активно освоили разработку и внедрение малых КА. Данный процесс в настоящее время приобретает всё большую силу, а тенденция разработок малых КА сводится к значительному уменьшению стартовой массы (100 кг и меньше).

Активный процесс миниатюризации космической техники неизбежно привёл и к миниатюризации всех бортовых систем и комплексов КА, в том числе и бортовых АФУ [13].

Традиционно, в качестве бортовых АФУ КА используют различные типы антенн: спиральные, вибраторные, рупорные, волноводы и др. [14]. Однако при разработке антенной системы для малых КА необходимо учитывать следующие факторы.

Так как площадь поверхности КА предназначенной для установки всей бортовой целевой аппаратуры, в том числе и АФУ, как правило, составляет примерно от 0,01 м² до 1 м² (в зависимости от габаритов самого КА), то необходимо использовать такой тип антенн, который удачно размещался бы на такой поверхности.

Несмотря на современную тенденцию, которая заключается в использовании высокочастотных бортовых антенн (2,4 ГГц, 5 ГГц, 8,2 ГГц, 10 ГГц, 25,6 ГГц), в настоящий момент существует острая потребность в миниатюрных антеннах метрового и дециметрового диапазонов (145 МГц, 435 МГц), т.е. УКВ диапазон. Этот факт обусловлен тем, что ввиду доступности данного диапазона для потребителя (особенно при построении антенн для научных комплексов и систем, радиолобительских систем и т.д.), этот диапазон активно применяется как на борту малых КА, так и в наземных пунктах приёма.

В ходе анализа существующих вариантов построения антенных систем КА, выявлено, что указанные ранее типы бортовых антенн КА обладают целым рядом недостатков, которые заключаются в следующем. При традиционном подходе к построению антенн УКВ диапазона они обладают большими массогабаритными показателями, выступающей конфигурацией, что в свою очередь не позволяет размещать их под обтекателем ракетносителя (РН) без

трансформации. А для выведения антенны в рабочее положение требуются дополнительные устройства и механизмы (устройства зачехления, пироболты, механизмы выдвижения и т.д.). Данный подход к построения антенной системы сложен, снижает надёжность, требует дополнительных наземных испытаний, повышает стоимость и т.д.

Класс микрополосковых антенн соответствует предъявляемым требованиям по массогабаритным показателям к антеннам малых КА, обладает невыступающей конфигурацией, надёжной и простой конструкцией, низкой стоимостью изготовления и т.д. Приведённые преимущества достигаются за счёт применения печатных технологий при изготовлении таких антенн. Тем не менее, при разработке УКВ микрополосковых антенн, необходимо обеспечить миниатюризацию массогабаритных показателей антенны в зависимости от отведённой площади для установки на поверхности малого КА.

Значительный вклад в развитие микрополосковых антенн внесли как отечественные учёные и специалисты Б.А. Панченко, Е.И. Нефёдов, В.С. Филиппов, Д.И. Воскресенский, В.В. Чебышев, В.А. Обуховец, А.О. Касьянов и др., так и зарубежные I.J. Bahl, J.R. James, P.S. Hall, C.A. Balanis, F.E. Gardiol и др.

В то же время, помимо жёстких требований по массогабаритным характеристикам и требований к невыступающей конфигурации антенн малых КА, необходимо обеспечить приемлемые характеристики направленности (КСВ, ДН, КУ). Корпус КА оказывает влияние на ДН бортовой антенны вследствие эффекта дифракции, вызванного протеканием токов на поверхности КА, т.е. ухудшаются характеристики направленности бортовых антенн.

В настоящий момент существует много различных способов учёта влияния дифракции на характеристики направленности антенн, которые отражены в работах таких авторов, как Л.А. Вайнштейн, П.Я. Уфимцев, В.А. Фок, Е.Н. Васильев и другие.

Однако большинство из предложенных методов не позволяют провести инженерную оценку характеристик направленности из-за математической сложности в виду того, сам КА обладает сложной геометрической формой, а расположение на поверхности большого количества целевой аппаратуры разнообразной формы и габаритов не способствуют применению строгой теории. Наиболее простым решением поставленной задачи является математическое и численное электродинамическое моделирование. Однако для формирования и анализа сложных структур требуются значительные компьютерные ресурсы и время.

Поэтому возникает необходимость разработки приближённых методик расчёта, применимых для бортовых антенн и позволяющих при минимальных временных затратах и с достаточной степенью точности оценить основные характеристики на ранней стадии разработки бортовой антенной системы малых КА.

Для анализа влияния корпуса малого КА на характеристики направленности бортовой антенны предложено использовать метод собственных функций, и, соответственно, аппроксимация корпуса малого КА.

Таким образом, разработка малогабаритной, невыступающей, надёжной, высокотехнологичной антенной системы для малых КА является современной, актуальной задачей.

С учётом выше изложенного можно сформулировать основные цели и задачи диссертационной работы.

Цель работы

Целью диссертационной работы является изыскание путей построения, методики проектирования и расчёта малогабаритной, невыступающей антенной системы класса малых КА широкого профиля.

Основные задачи

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решены следующие задачи:

- проведение аналитического обзора научно–технической литературы, посвящённой изысканию путей построения малогабаритной, невыступающей антенной системы для малых КА;
- исследование влияния корпуса носителя на характеристики направленности бортовых антенн;
- изучение параметров существующих и применяемых СВЧ–диэлектриков;
- изыскание путей построения миниатюрных УКВ микрополосковых антенн;
- поиск технических решений и разработки малогабаритных, бортовых УКВ микрополосковых антенн;
- разработка приближённой методики оценки влияния поверхности КА на характеристики направленности бортовых микрополосковых антенн;
- определение и исследование направленных свойств и частотных характеристик бортовых микрополосковых антенн;
- предложение технических решений и разработка бортовой, планарной, многодиапазонной микрополосковой антенны (метрового и дециметрового диапазонов) для построения антенной системы малых КА;

- экспериментальное исследование характеристик направленности бортовой микрополосковой антенны и проведение сравнительного анализа, полученного путём строгого численного электродинамического моделирования.

Методы исследования

При исследовании использовались как вычислительные методы электродинамики и теории антенн и устройств СВЧ на ЭВМ, так и известные общие методы решения волновых уравнений.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложен алгоритм оценки влияния корпуса малого КА на характеристики направленности бортовой антенны малого КА;
- определены требования к характеристикам направленности, согласованию, частотным свойствам и массогабаритным параметрам, конструкции, применяемым материалам вследствие воздействия космического пространства, механического и климатического воздействия, обусловленных также спецификой запуска и эксплуатации бортовых антенн малых КА;
- предложен ряд бортовых, многочастотных, с круговой поляризацией, высокотехнологичных микрополосковых антенн для малых КА.

Практическая значимость результатов работы

1. Разработана и запатентована УКВ микрополосковая антенна, обладающая в 2–2,5 раза меньшими габаритами по сравнению с применяемыми антеннами на борту КА.
2. Предложена УКВ микрополосковая антенна круговой поляризации, обладающая более простым способом получения круговой поляризации по сравнению с применяемыми антеннами на борту КА.
3. Предложена многодиапазонная микрополосковая антенна в планарном исполнении, позволяющая уменьшить занимаемый объём.

Реализация и внедрение результатов работы

Основные результаты диссертационной работы использованы и внедрены в ОКР АО «Научно-исследовательского института электромеханики» (АО «НИИЭМ»), а также внедрены в учебный процесс кафедры 406 МАИ (НИУ).

Акты о внедрении приведены в приложении к диссертации.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием общеизвестных методов решения волновых уравнений, а также совпадением полученных результатов с экспериментально измеренными характеристиками.

Основные положения, выносимые на защиту

- Предложена конструкция малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА с использованием малогабаритных УКВ микрополосковых антенн, соответствующих предъявляемым требованиям к антенной системе малых КА.
- Разработан алгоритм нахождения изменений характеристик направленности слабонаправленных бортовых антенн от явления дифракции на поверхности малого КА, позволяющий на начальной стадии проектирования определить необходимые антенные устройства.
- Созданы миниатюрные УКВ микрополосковые антенны, применяемые в системе связи, метеонаблюдения, в научных задачах и др., позволяющие уменьшить в 2–2,5 раза габариты по сравнению с применяемыми бортовыми антеннами на борту при тех же характеристиках.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Миниатюризация бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов. Материалы научно-технического семинара «Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов». Истра, ОАО «НИИЭМ». 2013.

2. Гаджиев Э.В. Разработка модели микрополосковой антенны метрового диапазона (137 МГц) для перспективного использования на малом КА «Ионосфера». Сборник тезисов докладов Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». Москва, МАИ. 2013.
3. Bocharov V.S., Generalov A.G., Gadzhiev E.V. Design of microstrip antennas for dual-frequency on-board transmitter 'МАУАК 150/400'. IEEE Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo). 2013. 23rd International Crimean Conference.
4. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенных систем малых космических аппаратов. Материалы VI Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром, МИ ВлГУ. 2014.
5. Vladimir Bocharov, Alexander Generalov, Elchin Gadzhiev. Application of printing technologies to design on-board antenna systems of spacecrafts. 40th COSPAR Scientific Assembly. 2014.
6. Гаджиев Э.В. Разработка модели микрополосковой антенны для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера». Тезисы докладов Второй международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Москва, ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». 2014.
7. Гаджиев Э.В. Вариант миниатюризации микрополосковых антенн метрового диапазона для применения в качестве бортовых антенн малых космических аппаратов. Тезисы докладов XX научно-технической конференции молодых учёных и специалистов. Королев, РКК «Энергия». 2014.
8. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Миниатюризация антенной системы космического аппарата «Ионосфера». Доклады II Всероссийской Микроволновой конференции. Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2014.
9. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В., Алексеева Н.С. Варианты построения бортовых антенно-фидерных устройств для малых космических аппаратов. Материалы научной сессии секции солнечно-земных связей Совета по космосу РАН «Исследования солнечно-земных связей на микро-, нано и пикоспутниках». Москва, ИКИ РАН. 2015.
10. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Исследование влияния корпуса космического аппарата на характеристики направленности бортовых антенн. Материалы конференции «Иосифьяновские чтения 2015». Истра, АО «НИИЭМ». 2015.

11. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Антенны для малых космических аппаратов. Материалы круглого стола «Создание малых космических аппаратов. Актуальные проблемы и пути их решения». В рамках конференции «Иосифьяновские чтения». Истра, АО «НИИЭМ». 2016.
12. Гаджиев Э.В., Кондратьева С.Г., Овчинникова Е.В. Математическое моделирование бортовых антенн космических аппаратов с учётом дифракции. XLII Международная молодёжная конференция «Гагаринские чтения». Москва, МАИ. 2016.
13. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Построение миниатюрной антенной системы малых и сверхмалых космических аппаратов. VIII Всероссийская научно–техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва, АО «Российские космические системы». 2016.
14. Гаджиев Э.В. Миниатюрные УКВ микрополосковые антенны. VII Молодёжная научно–техническая конференция «Инновационный арсенал молодёжи». 2016.
15. Generalov A.G., Gadzhiev E.V., Pochtouk N.I., Russkin A.B., Tumanov M.V. Design variants of perspective on-board antenna systems nano- and micro-spacecrafts. IEEE Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo). 2016. 26rd International Crimean Conference.

Публикации

Основные положения и результаты работы опубликованы в 13 статьях перечня рецензируемых научных изданий ВАК РФ:

1. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Антенная система космического аппарата «Ионосфера». Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 131. № 6. С. 11–14.
2. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны дециметрового диапазона для применения на космическом аппарате «Ионосфера». Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 65.
3. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны метрового диапазона (150 МГц) для применения на космическом аппарате «Ионосфера». Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т. 136. № 5. С. 15–18.

4. Гаджиев Э.В. Моделирование бортовых антенн СВЧ космических аппаратов. Антенны. 2013. № 9 (196). С. 65–68.
5. Гаджиев Э.В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенно–фидерных систем космических аппаратов. Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 76.
6. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка макета микрополосковой антенны метрового диапазона для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера». Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 4 (16). С. 20–27.
7. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Выбор диэлектрика подложки микрополосковой антенны при построении миниатюрной антенны. Антенны. 2014. № 12 (211). С. 38–44.
8. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка модели двухчастотной микрополосковой антенны для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера». Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 141. С. 23–26.
9. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Миниатюризация антенной системы космического аппарата «Ионосфера». Антенны. 2015. № 3 (214). С. 32–38.
10. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Моделирование бортовых микрополосковых антенн. Антенны. 2016. № 7 (227). С. 10–22.
11. Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г., Гаджиев Э.В. Исследование характеристик направленности бортовых антенн на ранней стадии разработки путём компьютерного моделирования. Электросвязь. 2016. № 7. С. 56–59.
12. Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г., Гаджиев Э.В. Методика приближённого расчёта характеристик направленности бортовой микрополосковой антенны малых космических аппаратов. Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 15–27.
13. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Построение миниатюрной антенной системы малых и сверхмалых космический аппаратов. Ракетно–космическое приборостроение и информационные системы. 2016. № 4. (в печати).

Результаты доложены и опубликованы в 30 тезисах десяти международных, двух всероссийских и одиннадцати молодёжных научно–технических конференциях.

По результатам проведённых работ получено три патента:

1. Патент на полезную модель № 152427 от 16.09.2014 г. Микрополосковая антенна метрового диапазона с круговой поляризацией.
2. Патент на изобретение № 2583334 от 16.09.2014 г. Способ создания микрополосковых антенн метрового диапазона и устройство, реализующее этот способ.
3. Патент на полезную модель № 162204 от 07.09.2015 г. Многодиапазонная микрополосковая антенна.

Личный вклад

Все представленные в диссертации результаты исследований и экспериментальные данные получены лично автором либо при его непосредственном участии.

Объём и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста. Список литературы включает 165 наименований на 15 страницах. Работа содержит 87 рисунков и 16 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов работы.

В **главе 1** проведён обзор научно–технической отечественной и зарубежной литературы, посвящённый состоянию и перспективе развития бортовых антенных систем КА и самой космической техники в целом. В результате обзора выявлена необходимость построения малогабаритной, невыступающей, миниатюрной, бортовой антенной системы для нового класса КА – малых КА. Представлены и рассмотрены применяемые типы бортовых антенн и конструкторские решения для построения антенной системы КА. Учитывая специфику бортовых антенн КА, сформулированы и предложены требования к характеристикам направленности, согласованию, частотным характеристикам, массогабаритным и конструктивным параметрам бортовых антенн класса малых КА.

В **главе 2** рассмотрены особенности построения малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА. Рассмотрены требования к механическому и температурному воздействиям, а также к дестабилизирующим факторам космической среды для бортовых антенн малых КА. Предложено применение микрополосковых антенн в качестве бортовых антенн малых КА. Для построения такой антенной системы на практике рассмотрен вариант

построения антенной системы из микрополосковых антенн для малого КА «Ионосфера». Проведён обзор научно–технической литературы, посвящённый существующим способам миниатюризации УКВ микрополосковых антенн и применяемых в настоящее время материалов диэлектриков. В результате обзора предложен диэлектрик с приемлемыми параметрами и вариант миниатюризации УКВ микрополосковых антенн, позволяющий уменьшить габариты антенны в 2–2,5 раза по сравнению с применяемыми аналогами.

В **главе 3** представлен обзор методов оценки влияния корпуса КА на характеристики направленности бортовых антенн. В ходе обзора показаны преимущества и недостатки рассмотренных методов, а именно сложность математического расчёта при применении строгой теории относительно оценки дифракции бортовых антенн КА в виду того, что КА обладают различной, сложной формой, выносными элементами (солнечные батареи, штанги и др.), а также наличия большого числа целевой аппаратуры, расположенной на поверхности КА, с различными формами и габаритами. Для анализа влияния корпуса малого КА на характеристики направленности бортовых антенн на ранней стадии предложена приближённая методика расчёта, которая позволяет дать инженерную оценку при построении бортовой антенной системы малого КА.

В **главе 4** представлены результаты электродинамического моделирования УКВ микрополосковых антенн для перспективного применения на малом КА «Ионосфера» и сверхмалого КА «CubeSat». Разработаны и предложены бортовые, миниатюрные, одночастотные, многочастотные, с линейной и круговой поляризацией УКВ микрополосковые антенны. Получены и оценены характеристики направленности (КСВ, ДН, КУ) разработанных антенн.

В **главе 4** приведены результаты экспериментального исследования бортовой микрополосковой антенны малого КА «Ионосфера» и сверхмалого КА «CubeSat». Измерены и оценены характеристики направленности (КСВ, ДН, КУ) исследуемых бортовых антенн. Проведено сравнение и анализ полученных результатов с результатами электродинамического моделирования. Результаты эксперимента подтверждают теоретические результаты.

В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

Глава 1. Состояние и перспективы развития бортовых АФУ КА

Прежде чем рассматривать текущее состояние и перспективы развития бортовых АФУ КА, необходимо отметить вектор развития самой космической техники, так как и развитие самих бортовых антенн напрямую зависит от развития КА.

1.1 Тенденция развития космической техники

На сегодняшний день существенно изменились приоритеты в разработке КА. Видимое преимущество по ряду направлений космической деятельности получило создание малых КА по сравнению с крупногабаритными и тяжёлыми КА [3–8].

Данная тенденция особенно заметна при анализе количества запусков за последние несколько десятилетий, приведенных на рисунке 1.1 [9].

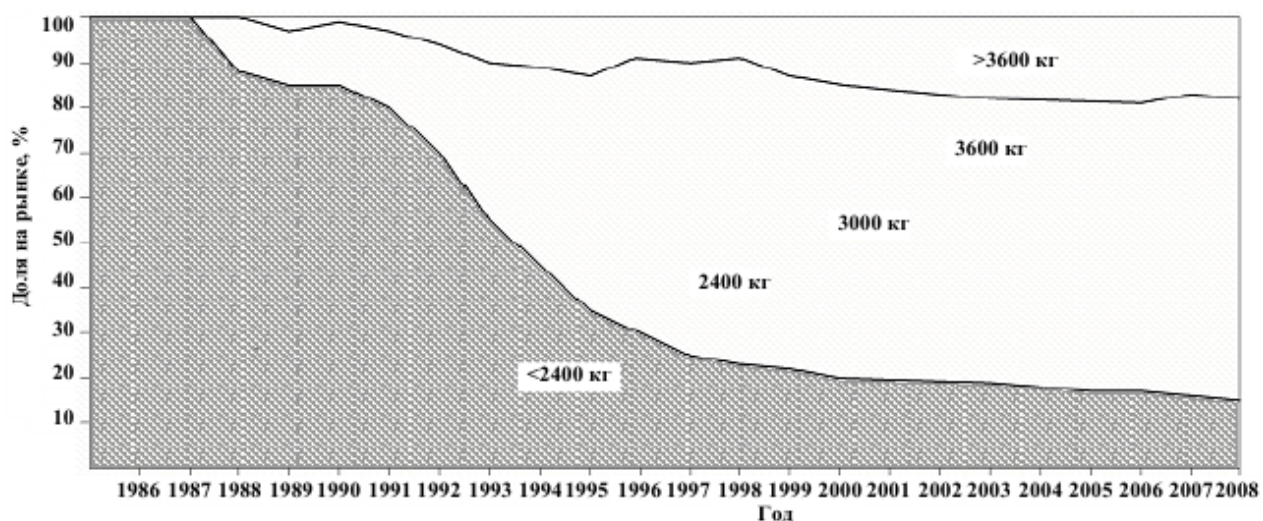


Рисунок 1.1 – Доля запущенных больших КА по годам

Как видно (см. рис. 1.1), доля запущенных больших и тяжёлых КА, начиная с середины 90-х годов, резко падает, а, соответственно, малых КА растёт.

В настоящее время этот процесс ускоряется значительно быстрее и, как показывает практика, на один запущенный большой КА приходится четыре–пять малых КА.

Малые КА — узкоспециализированные аппараты. Они, как правило, обладают негерметичным корпусом, на них используются компактные, не раскрываемые солнечные батареи, а также многофункциональная целевая аппаратура и минимальное количество резервирующих элементов. Для их производства применяются инновационные материалы и достижения микроэлектроники. Благодаря всему выше перечисленному такие аппараты имеют небольшие размеры и массу [10].

В результате начавшегося и интенсивно продолжающегося процесса миниатюризации КА удалось снизить массы некоторых больших и тяжёлых КА и создать новые аппараты аналогичного назначения с массой в несколько сотен килограмм. Согласно сложившейся классификации, к тяжёлым, средним и лёгким КА относятся аппараты массой более 1 т [12].

Таким образом, появился новый класс КА – малые КА, классификация которых приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Классификация класса малых КА по стартовой массе

№ п/п	Класс КА	Масса КА, кг
1	Фемто-	До 0,1
2	Пико-	От 0,1 до 1
3	Нано-	От 1 до 10
4	Микро-	От 10 до 100
5	Мини-	От 100 до 500
6	Малый	От 500 до 1000

Из приведённой классификации малых КА видно, что в первую очередь она ведётся по массе аппарата.

Малые КА обладают рядом преимуществ перед другими классами КА:

- сравнительно малым сроком разработки (от трёх до пяти лет вместо пяти–десяти лет);
- удешевлением вывода на орбиту за счёт кластерных или попутных запусков;
- возможностью оперативного и скрытного запуска из любой точки земного шара с помощью РН подземного, воздушного базирования при высокой оперативности подготовки к запуску [15];
- технологичностью создания, отвечающей стратегии сокращения расходов и риска [16, 17];
- возможностью быстрой модификации для решения широкого круга задач с различным целевым назначением;
- снижением степени влияния спутниковой платформы на работу полезной нагрузки из-за меньшего собственного гравитационного, электромагнитного и газового (внешняя собственная атмосфера) фона;

- экономической эффективностью целевого использования на высотах функционирования до 1000 км и, особенно, на высотах 200–500 км, на которых срок активного существования (САС) других классов КА, например тяжёлых КА, без применения соответствующих средств коррекции орбиты достаточно мал;
- возможностью утилизации в случае выхода из строя, за счёт полного или частичного сгорания КА в верхних слоях атмосферы, т.е. простой способ утилизации объекта, что в свою очередь ведёт к уменьшению космического мусора на орбите и околоземного пространства [18];
- ценовая привлекательность.

Сокращение производственного цикла связано с узкой специализацией малых КА, использованием серийных компонентов, унифицированных платформ, сокращением традиционных конструкторских и технологических требований к разработке, созданию, запуску и эксплуатации. А сжатые сроки создания способствуют скорейшему возврату инвестиций.

Значительную часть средств от общей стоимости проекта по разработке КА составляют затраты на его выведение на целевую (рабочую) орбиту, т.е. запуск КА. Цена запуска КА складывается из высоты орбиты, массы КА, стоимости РН и т.д. В случае малых КА существуют следующие варианты запуска [15]:

- кластерный, т.е. группой из пяти-шести малых КА;
- попутный, т.е. использование малого КА в качестве нагрузки при запуске большого КА (возможен вариант в качестве дополнения);
- запуск с помощью РН лёгкого класса, т.е. применение баллистических ракет и т.д.;
- «воздушный старт», т.е. использование самолётов-носителей в качестве объекта запуска.

Например, при запуске РН «Союз–ФГ» 22 июля 2012 года с космодрома Байконур были выведены одновременно несколько малых КА: КА «Канопус–В» № 1 и КА «МКА–ФКИ» (Россия), Белорусский КА (Республика Беларусь), КА «ADS–1b» (Канада) и КА «ТЕТ» (Германия).

Все перечисленные КА были размещены в космической головной части (КГЧ) РН «Союз–ФГ». Для сравнения построения КГЧ РН на рисунке 1.2 представлен вариант построения КГЧ при запуске малых КА, указанных выше, и вариант построения КГЧ при запуске больших КА (массой около 3 т), например, РН «Союз–2» КА «Метеор–М» № 1 [11, 19].

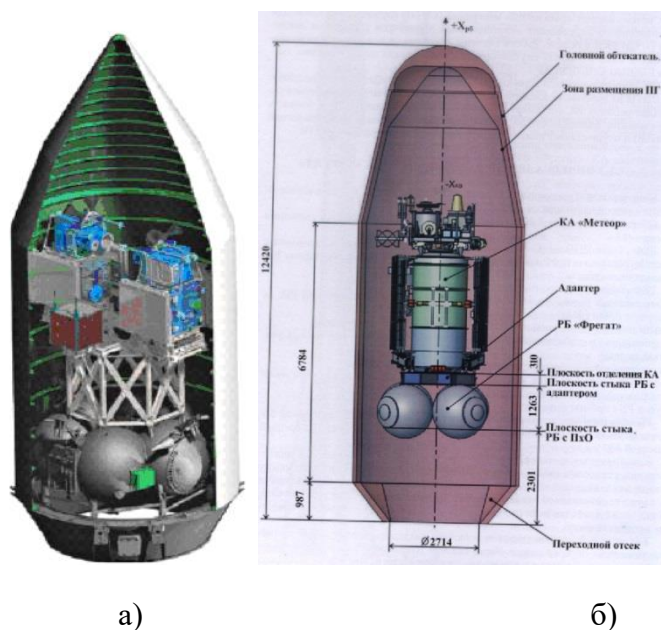


Рисунок 1.2 – Общий вид КГЧ:

а) при запуске малых КА (кластерный запуск); б) при запуске КА «Метеор-М» № 1

Таким образом, в настоящее время существует несколько вариантов запуска малых КА с помощью средств лёгкого, среднего и тяжёлого классов, что способствует снижению стоимости выведения на орбиту КА данного класса.

Создание малых КА позволяет чаще проводить запуски, притом:

- расширить возможности участия в проектах молодых учёных, студенческой молодёжи и широкой научно-технической общественности, т.е. малые КА также предназначены для решения образовательных задач, которые заключаются в моделировании рабочего процесса создания КА с самого начала, от разработки проектной документации до конечного этапа – управления КА на орбите;
- ускорить использование полученных научно-технических результатов.

Общая концепция создания малых КА хорошо согласуется с концепцией «быстрее–лучше–дешевле» [20], которая направлена на оптимальное решение вопросов разработки космической техники без снижения уровня её надёжности.

В целом круг задач, решаемых с помощью малых КА в области народного хозяйства, достаточно широк и включает в себя [7]:

- мониторинг и контроль окружающей среды;
- сбор и передачу данных;
- метеорологию;
- навигацию и связь;
- прогнозирование опасных явлений и оперативный контроль чрезвычайных ситуаций;

- использование в интересах отработки новых технологий, образования и т.д.;
- поиск и спасение людей;
- контроль линий газо- и нефтепроводов;
- поиск полезных ископаемых и т.д.

В таблице 1.2 приведены основные потребители информации с малых КА.

Таблица 1.2 Доля потребителей информации с малых КА

№ п/п	Потребитель	Доля, %
1	Картография	41
2	Сельское хозяйство и лесоводство	22
3	Контроль окружающей среды	12
4	Городское планирование и телекоммуникации	10
5	Геология и горная промышленность	8
6	Прочие	7

Отдельным направлением стало применение малых платформ, на базе которых уже формируется малый КА с определённым целевым назначением, например, «CubeSat» (форматов 1U, 2U, 3U), «TabletSat» (форматов 1U, 2U, 3U, 4U) и др. [21, 22].

Однако говоря о преимуществах малых КА, необходимо отметить, что расширение задач, решаемых с их помощью, не означает необходимости снижения роли тяжёлых КА (массой более 3 т) или полного отказа от них. На тяжёлые КА должно быть возложено решение, главным образом, стратегических задач.

Также необходимо отметить, что:

- снижение массы КА за счёт конструктивных усовершенствований на базе используемых технологий имеет предел по массе;
- выполнение требований непрерывности, оперативности и глобальности, т.е. получение решения целевых задач принципиального качества не может быть осуществлено без создания совершенных космических систем;
- одиночный запуск одного малого КА не рентабелен.

Однако, несмотря на приведённые недостатки малых КА, данное направление космической техники имеет перспективу в дальнейшем своём развитии. Об этом

свидетельствует активность отечественных и зарубежных предприятий по тематике разработок малых КА.

Далее рассмотрим разработанные и эксплуатируемые отечественные и зарубежные малые КА.

В «Научно-производственной корпорации «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ» г. Москва) совместно с «Научно-исследовательским институтом электромеханики (АО «НИИЭМ» г. Истра Московская область) в последнее десятилетие были разработаны следующие малые КА, приведённые на рисунке 1.3 [23].

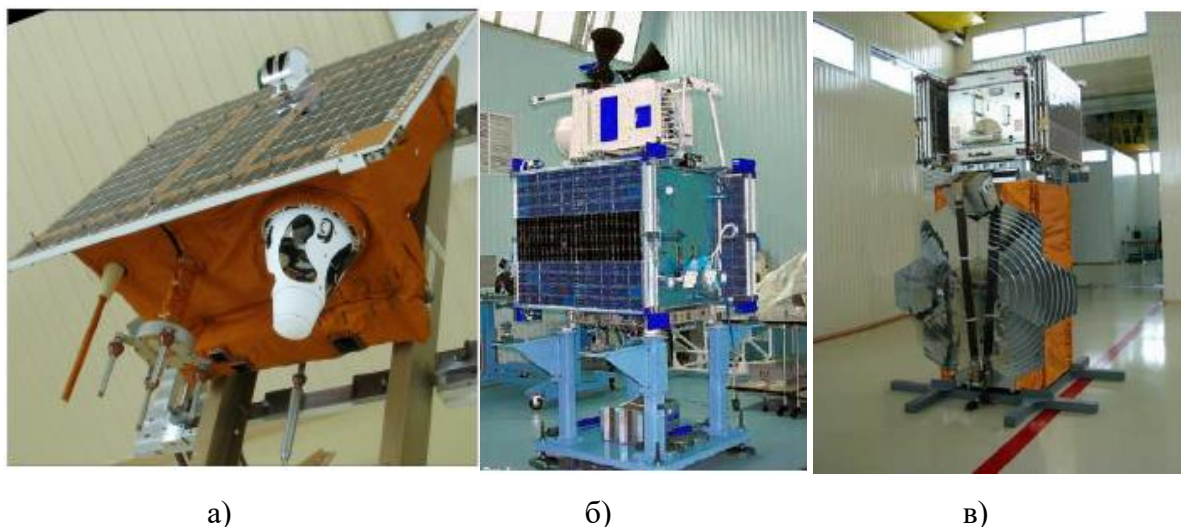


Рисунок 1.3 – Малые КА, разработанные в АО «Корпорации «ВНИИЭМ»:

а) КА «Университетский—Татьяна-2»; б) КА «Канопус–В» № 1;

в) КА «Михайло Ломоносов»

КА «Канопус–В» № 1 и КА «Университетский—Татьяна-2» успешно запущены и выполняют свои целевые задачи, а запуск КА «Михайло Ломоносов» (КА «Ломоносов») был осуществлён 28 апреля 2016 г. с нового космодрома Восточный.

В настоящий момент ведутся работы по созданию малого КА «Канопус–В-ИК» и малого КА «Звезда», представленные на рисунке 1.4 [24].

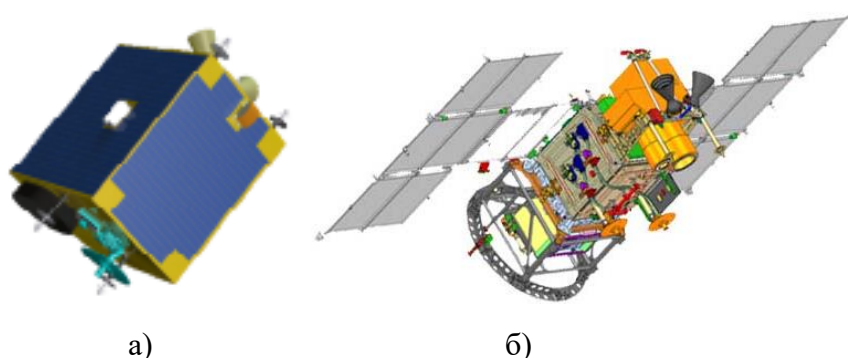


Рисунок 1.4 – Разрабатываемые малые КА: а) КА «Звезда»; б) КА «Канопус–В-ИК»

Активно в этом направлении работают и другие отечественные предприятия.

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва (АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнёва) разработали ряд малых КА, представленные на рисунке 1.5 [25–27].

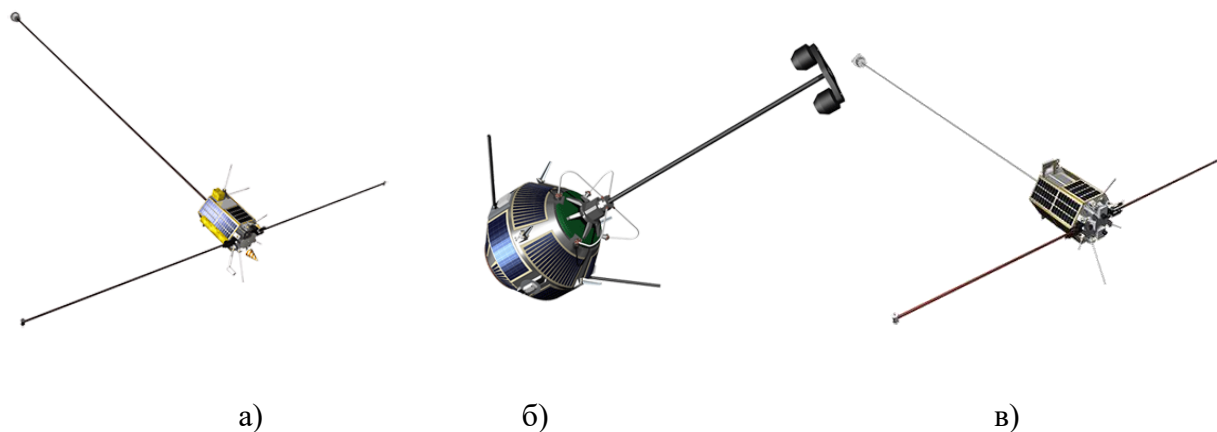
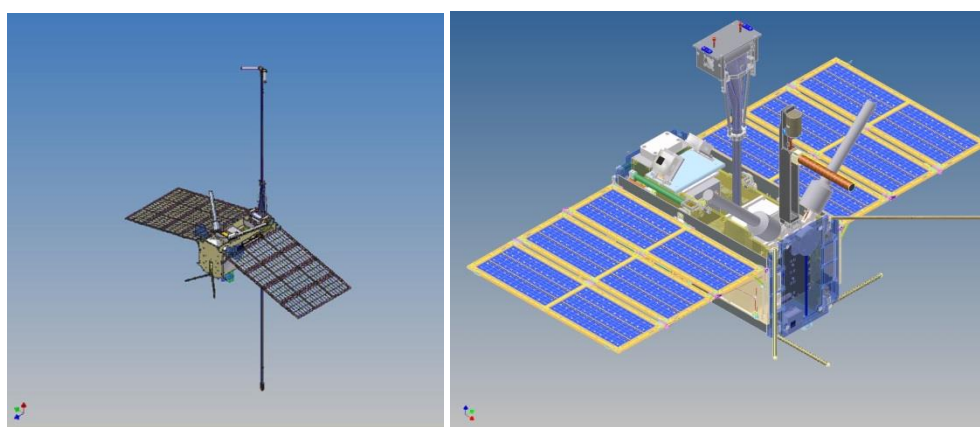


Рисунок 1.5 – Малые КА, разработанные в ИСС им. М.Ф. Решетнёва:

а) КА «МиР»; б) КА «Можжец»; в) КА «Юбилейный»

В институте космических исследований (ИКИ РАН) были разработаны малые КА, представленные на рисунке 1.6 [28, 29].



а)

б)

Рисунок 1.6 – Малые КА, разработанные в ИКИ РАН: а) КА «Чибис»; б) КА «Чибис–М»

Государственным космическим научно-производственным центром имени М.В. Хруничева (ГКНПЦ им. М.В. Хруничева) разработаны унифицированная космическая платформа «Яхта» и другие малые КА, представленные на рисунке 1.7 [30].

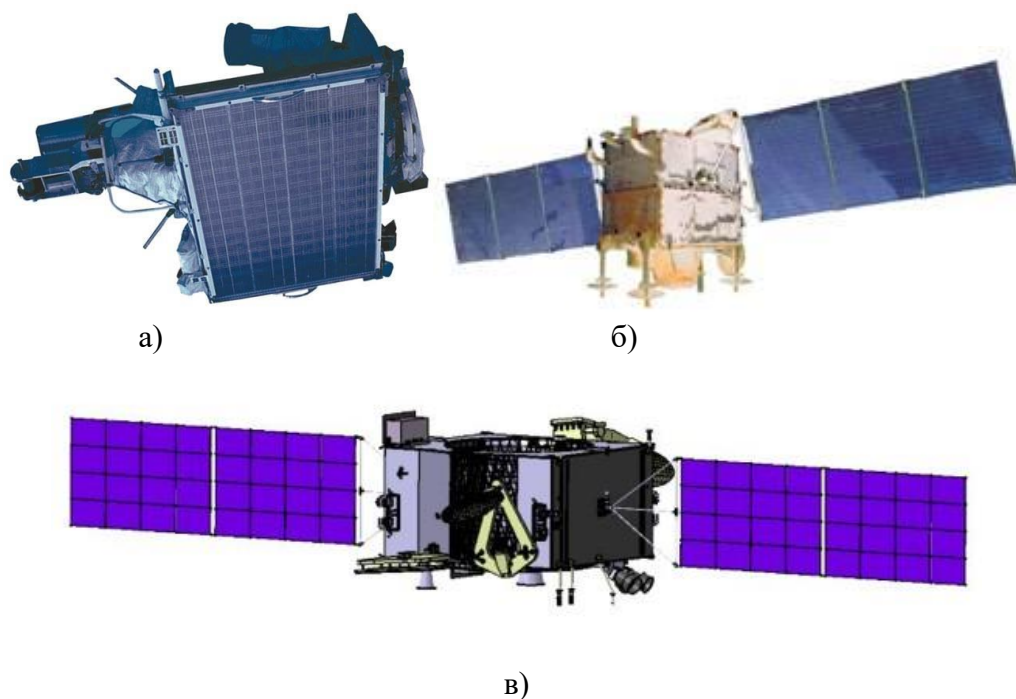


Рисунок 1.7 – Малые КА, разработанные в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева:
а) КА «Можаец-5»; б) КА «Монитор-Э»; в) КА Экспресс – МД-1»

Научно-производственным объединением имени С.А. Лавочкина (НПО им. С.А. Лавочкина) разработан малый КА «Зонд–ПП», представленный на рисунке 1.8, на базе унифицированной платформы «Карат» и др. [31].



Рисунок 1.8 – Малый КА «Зонд–ПП», разработанный в НПО им. С.А. Лавочкина

Помимо указанных выше предприятий есть свои наработки и опыт успешной эксплуатации малых КА на орбите, у таких предприятий как автономная некоммерческая организация «Научно-технический инновационный центр «ТЕХКОМ» (АНО «НТИЦ «ТЕХКОМ»), частная космическая компания «Даурия Аэроспейс» (DAURIA AEROSPACE), ООО «Спутниковые инновационные космические системы» (ООО «СПУТНИКС») и т.д. [22, 32–35]. Малые КА, указанных фирм, представлены на рисунке 1.9.

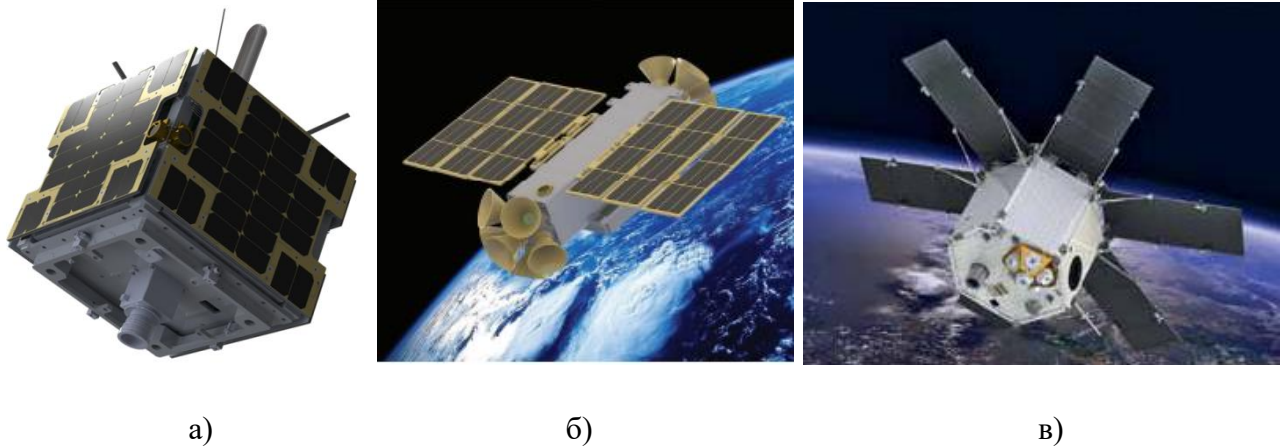


Рисунок 1.9 – Малые КА: а) КА «DX 1» фирмы «Даурия Аэроспейс»; б) КА «ТЕХКОМсмарт» АНО «НТИЦ «ТЕХКОМ»; в) КА «ТаблетСат-Аврора» ООО «СПУТНИКС»

Активное развитие космической индустрии по разработкам и внедрению малых КА идёт и за рубежом.

В настоящий момент одним из лидеров в области создания малых КА является частная британская компания Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL), которая возникла на базе студенческого космического центра университета Суррей [36]. Компанией SSTL разработан целый ряд малых КА ДЗЗ для таких стран как Алжир, Нигерия, Турция, Китай, Испания. Также компания активно сотрудничает с космическим агентством Великобритании. Некоторые разработанные малые КА представлены на рисунке 1.10.

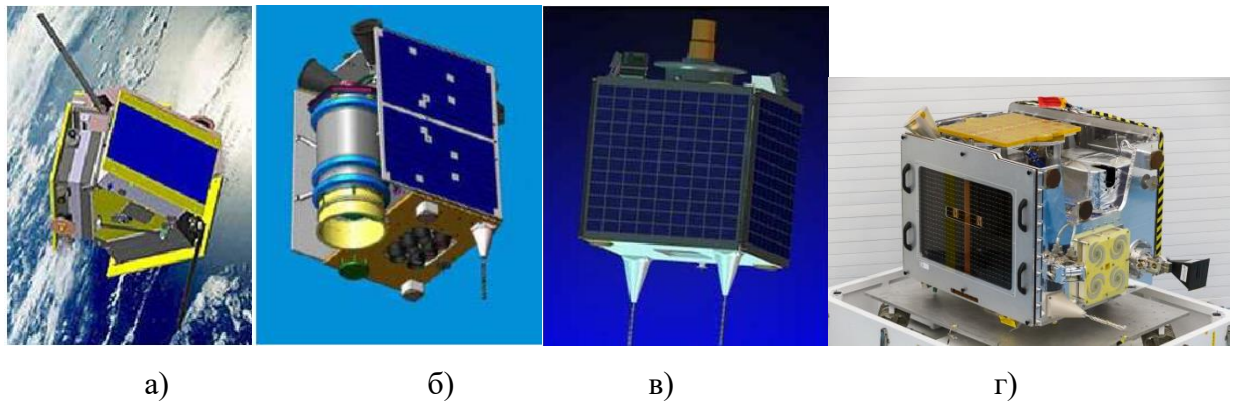


Рисунок 1.10 – Малые КА, разработанные компанией SSTL:
а) КА «SNAP-1»; б) КА «Beijing-1»; в) КА «ALSat-1»; г) КА «TechDemoSat-1»

Американской компанией Skybox Imaging Inc. были разработаны и успешно запущены два малых КА ДЗЗ, представленные на рисунке 1.11 [37].



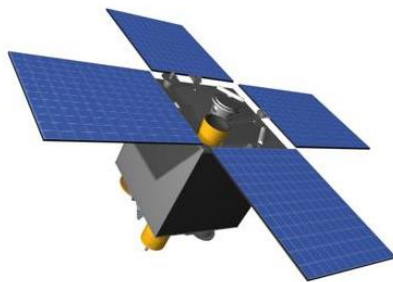
а)



б)

Рисунок 1.11 – Малые КА Skybox Imaging Inc.: а) КА «SkySat»; б) КА «SkySat 2»

ГКБ «Южное» (Украина) является примером государственного предприятия, которое осваивает производство малых спутников на экспорт и за счет полученных средств решает задачи национальной государственной космической программы [38]. В 2007 году был запущен разработанный и созданный по контракту с Египтом КА ДЗЗ «EgyptSat-1», а затем в 2011 году собственный КА ДЗЗ «Сич-2», представленные на рисунке 1.12.



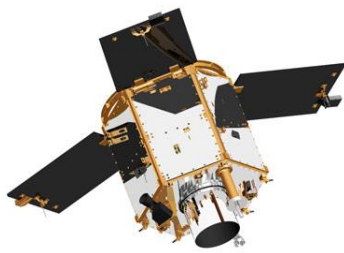
а)



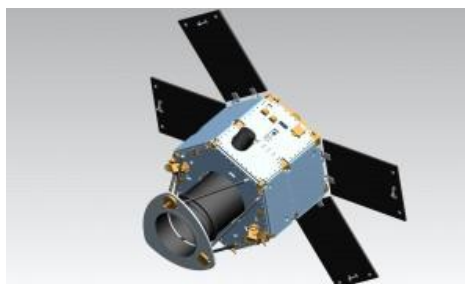
б)

Рисунок 1.12 – Малые КА, разработанные в ГКБ «Южное»: а) КА «EgyptSat-1»; б) КА «Сич-2»

Одиночные спутники ДЗЗ Украины, Малайзии, Турции, Египта и ОАЭ являются первыми экземплярами прототипами последующих КА в планируемых национальных группировках. Так, например, ОАЭ на базе КА «DubaiSat-1» подготовили более современный КА «DubaiSat-2», а затем и КА «DubaiSat-3», которые показаны на рисунке 1.13.



а)



б)

Рисунок 1.13 – Малые КА ДЗЗ ОАЭ: а) КА «DubaiSat-1»; б) КА «DubaiSat-2»

Группировка малых КА «RapidEye» (Германия), выведенная на орбиту в 2008 году, является примером использования сразу нескольких малых КА одновременно. Группировка спутников состоит из пяти аппаратов. Основным применением КА является мониторинг хозяйственной деятельности и съёмка районов чрезвычайных ситуаций. Использование группировки из пяти малых КА обеспечивает возможность глобальной съёмки любого региона Земли. Макет КА представлен на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Малый КА RapidEye

В том же 2008 году заработала китайская национальная группировка (Small Satellite Constellation for Environment and Disaster Monitoring and Forecasting (SSCEDMF)), предназначенная для целей оперативной съёмки районов катастроф, мониторинга окружающей среды и прогнозирования чрезвычайных ситуаций.

Основными заказчиками малых КА, как видно из представленного материала, являются совсем «некосмические» страны. Этот факт обусловлен в первую очередь сравнительно низкой стоимостью КА данного класса, что в свою очередь способствует ряду стран реализовать свои собственные национальные космические программы [39].

1.2 Постановка задачи

Исходя из представленного обзора (см. 1.1), следует, что разработка малых КА широко развито и активно применяется как отечественными, так и зарубежными предприятиями для выполнения различных целевых задач.

При разработке антенной системы перед разработчиками возникает ряд задач:

- синтез антенных систем;
- конструкторско–технологическая;
- автоматизации проектирования, производства и измерений антенных систем;

- минимизация стоимости проектирования производства и эксплуатации антенных систем и др.

Более подробно приведённые задачи антенной техники рассмотрены в [40].

Помимо указанных выше задач, которые необходимо решать при проектировании бортовых АФУ КА, на сегодняшний день возникает ещё одна задача, которая заключается в следующем. Учитывая миниатюризацию космической техники, в том числе и бортовых антенных систем, а также специфику бортовых антенн, возникает потребность *в разработке малогабаритной, невыступающей, надёжной, простой и, в то же время, высокотехнологичной бортовой антенной системы для малых КА.*

Таким образом, задача по построению малогабаритной, невыступающей бортовой антенной системы малых КА является актуальной и современной [13].

1.3 Специфика бортовых антенн КА

Прежде чем рассматривать вопросы построения бортовых АФУ для КА любого класса и целевого назначения, необходимо отметить ряд отличий бортовых антенн от наземных антенн, т.е. их специфику.

Специфика бортовых АФУ КА заключается в ряде особенностей, которые необходимо учитывать при их разработке [2].

Как правило, на поверхности КА заказчиком отводится определённое место для установки антенн. Зачастую этого отведённого места бывает не достаточно для установки того АФУ, которое полностью бы отвечало заданным требованиям. Порой в некоторых случаях допускается даже ухудшение параметров.

При формировании ДН участвует не только собственно антенна, но и часть проводящей поверхности КА. По проводящей поверхности корпуса КА текут поверхностные токи, наводимые электромагнитными полями, создаваемыми самой антенной. Эти высокочастотные токи создают в пространстве, окружающем КА, электромагнитные поля, которые можно назвать вторичными. Вторичные поля взаимодействуют с полями антенн. Вследствие явления интерференции получается суммарное электромагнитное поле. Влияние корпуса КА необходимо всегда принимать во внимание. Это влияние является одним из основных факторов, определяющих специфику работы антенн КА.

Особенность работы бортовых АФУ КА также заключается в том, что им приходится работать с электронными приборами, рассчитанными на выполнение определённых функций в условиях резких перепадов давления и температуры, перегрузки, вибрации, наличие ионизации и т.д. [1]. Всё это усложняет работу антенн, может привести к нежелательным явлениям,

искажающим характеристики антенн, и, безусловно, создаёт дополнительные требования в отношении конструкции и параметров антенн КА.

Таким образом, можно выделить следующие особенности бортовых АФУ КА:

- ограниченное место на поверхности КА для установки;
- влияние корпуса КА на формирование ДН и других характеристик направленности бортовых антенн;
- дестабилизирующие факторы космического пространства, влияющие на целостность конструкции антенной системы и её работоспособность.

Также необходимо обеспечить высокую прочность конструкции антенны. Это особенность, помимо дестабилизирующего влияния космического пространства, возникает ещё и из-за условий запуска КА, так как при запуске бортовые антенны подвергаются жёстким механическим нагрузкам (вибрация, удары и т.д.).

1.4 Варианты построения бортовых АФУ КА

Рассмотрим применяемые в настоящее время типы антенн для построения бортовых антенных систем КА, а также другие возможные конструкторские решения, применяемые при решении задачи по построению бортовой антенной системы КА.

1.4.1 Применение конструктивных решений

Для размещения бортовых АФУ на поверхности КА используют *выносные элементы* (штанги, кронштейны и т.д.) для вынесения антенн за пределы КА. Данный приём активно используется как на больших КА, так и на малых КА, например, как показано на рисунке 1.15.



а)

б)

в)

Рисунок 1.15 – Варианты применения выносных элементов:

а) КА «Метеор–1»; б) КА «Метеор–2»; в) КА «Стерх»

В некоторых случаях удастся разместить все бортовые антенны КА в едином исполнении, например, в виде *антенной стойки*, представленная на рисунке 1.16, которая была реализована на КА «Метеор» [41].

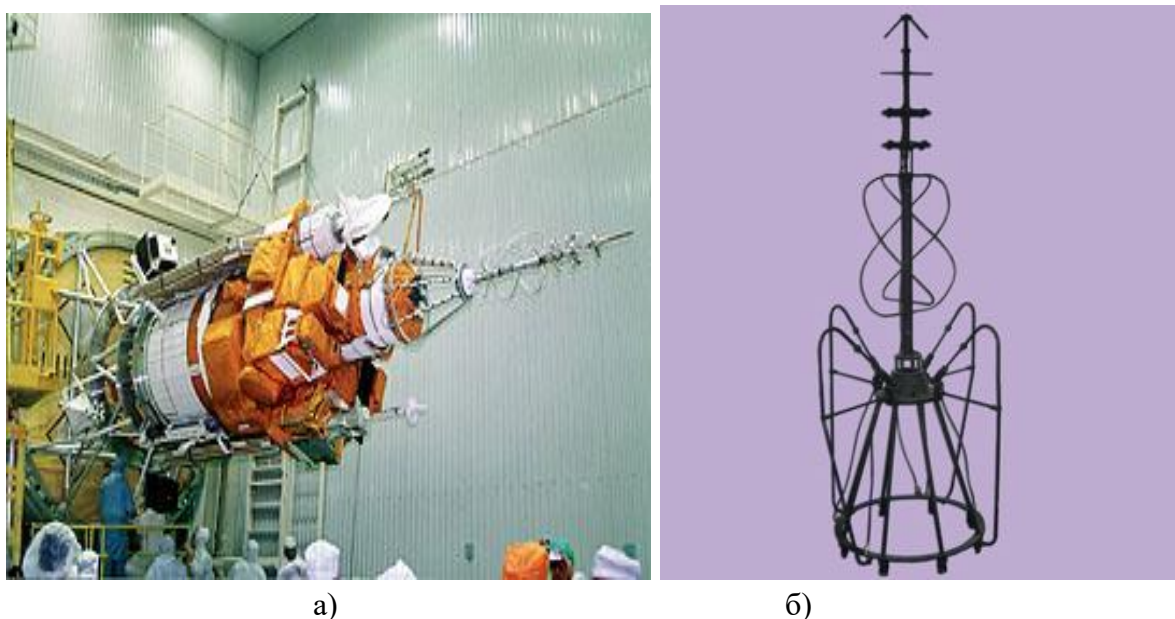


Рисунок 1.16. Вариант построения антенной стойки:

а) в составе КА серии «Метеор»; б) общий вид антенной стойки

На рис. 1.16б) в едином исполнении представлены разные типы антенн. Комплекс представляет собой конструкцию, совмещающую в себе (сверху вниз): вибраторную турникетную антенну дециметрового диапазона бортовой телеметрической системы, рамочную директорную антенну дециметрового диапазона бортовой телевизионной системы, самофазированную четырёхзаходную спиральную антенну метрового диапазона и вибраторные антенны метрового диапазона радиоканалов бортовой командной системы и системы контроля орбиты. Рабочие частоты от 40 МГц до 600 МГц.

Как правило, для обеспечения КА необходимой энергетикой используют не менее одной солнечной батареи в составе КА (см. рис. 1.3а), рис. 1.7в), рис. 1.12а), рис. 1.9в)). Для обеспечения ориентации и стабилизации КА в пространстве часто применяют гравитационную штангу (см. рис. 1.5а–в)). В работе [42] предложен и рассмотрен вариант использования солнечных батарей и гравитационной штанги в качестве бортовых антенн КА, т.е. предложен вариант использования в качестве бортовых антенн различных частей КА. Приведены результаты моделирования таких антенн [42].

Для уменьшения габаритов антенн используют метод включения *сосредоточенных элементов*, который заключается во включении индуктивностей L и емкостей C в структуру антенн, которые соответствуют заданным параметрам антенн.

Данный способ применим в основном по отношению к вибраторным антеннам типа диполей (укороченный диполь с укорачивающими элементами L и C).

В качестве укорачивающей емкости применяются диски или шары, укрепляемые на концах вибратора. Более подробно данный способ рассмотрен в [1].

1.4.2 Применение печатных технологий при проектировании бортовых антенн

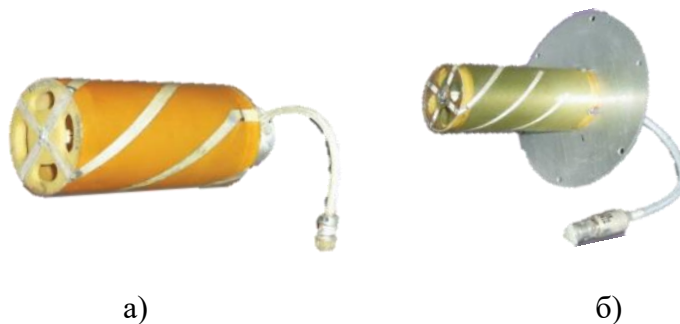
Стремительное развитие технологий производства интегральных схем привело к возможности построения ряда антенн с помощью применения печатных (планарных) технологий. Необходимо отметить ряд преимуществ, которыми обладают антенны, выполненные с помощью печатной технологии [43]:

- высокая повторяемость размеров при серийном производстве;
- точность изготовления;
- малые масса и габариты;
- компланарная конструкция;
- технологичность;
- низкая стоимость при серийном выпуске и т.д.

Методами печатной технологий могут быть выполнены не только излучатели, но и линии передачи, согласующие элементы, фазовращатели, переключатели и т.д. [44].

1.4.2.1 Спиральные антенны, выполненные по печатным технологиям

Класс спиральных антенн широко применяется в качестве бортовых антенн КА [45]. Применение печатных технологий позволяет разрабатывать необъёмные спиральные антенны, которые показаны на рисунке 1.17 а–г) [46].



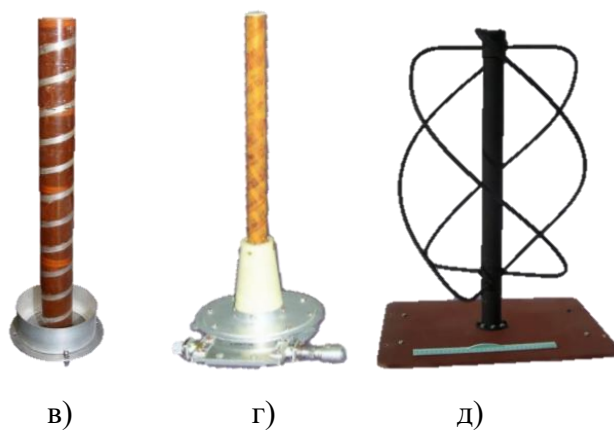


Рисунок 1.17 – Бортовые спиральные антенны: а) антенна дециметрового диапазона телеметрической бортовой системы; б) антенна для приёма сигналов со спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS; в) измерительная спиральная антенна; г) антенна дециметрового диапазона бортового информационного комплекса; д) антенна метрового диапазона для передачи метеорологической информации низкого разрешения

При рассмотрении спиральных антенн, выполненных по печатной технологии (см.рис. 1.17а–г)), очевидны отличия и преимущества таких антенн относительно спиральных антенн, содержащих каркас (см. рис. 1.17д)).

1.4.2.2 Фрактальные антенны

Среди множества типов антенн, используемых сегодня в радиосистемах, фрактальные антенны являются сравнительно новым типом и принципиально отличаются от известных конструкций [47].

Первые публикации, в которых рассмотрены вопросы электродинамики фрактальных структур, появились еще в 80-е годы XX века. Такие антенны благодаря специальной геометрии имели многочастотные характеристики и небольшие размеры.

В работе [48] рассмотрены основные виды фрактальных антенн, принципы и методики, используемые для их проектирования.

Преимущества состоят в минимизации габаритов при сохранении частотных характеристик, в том числе, широкополосности.

Фрактал – класс геометрических форм, не имеющих характерного размера. Они составлены из многократных итераций единственной элементарной формы и используются для того, чтобы описать комплекс моделей, которые заключены в самоподобии и самоподстраиваемости геометрической структуры [49].

Эффект миниатюризации антенн наиболее существенно проявляется лишь для нескольких первых итераций фрактала, асимптотически приближаясь к некоторому пределу.

При комплексном применении фрактальных технологий можно уменьшить расход материалов и массу антенных систем, особенно, если излучатели объединены в антенную решётку.

Рассмотрим некоторые примеры построения фрактальных антенн. На рисунке 1.18 приведена фрактальная антенна Коха.

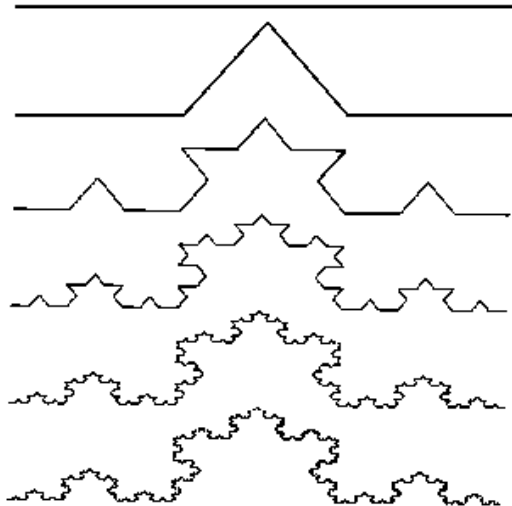


Рисунок 1.18 – Изображение фрактала Коха на нескольких итерациях

Здесь показано для сравнения габаритные размеры проводников в форме нескольких итераций фрактальной кривой Коха.

Весьма близкой по своим свойствам к антенне на основе фрактала Коха является диполь, сформированный по закону ломанной Минковского, представленный на рисунке 1.19.

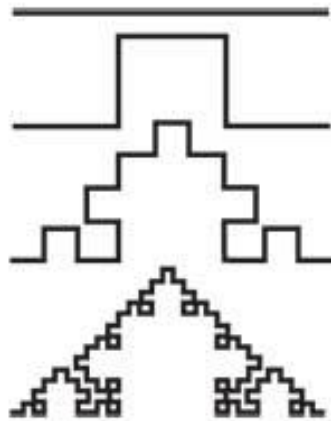


Рисунок 1.19 – Изображение фрактала Минковского на нескольких итерациях

При построении этой антенны вместо системы треугольников на прямой формируют меандры убывающих размеров, как показано на рис. 1.19. При первом изгибе прямолинейного диполя в виде «прямоугольного солитона» его усиление возрастает. Последующие итерации практически не меняют КУ, но полоса рабочих частот диполя расширяется, а сама антенна

становится компактнее. Как и в случае с кривой Коха, эффективными являются лишь первые пять–шесть итераций: чтобы сгибать провод на последующих итерациях придётся уменьшить его диаметр, а это повысит омическое сопротивление проводников антенны и приведет к снижению КУ [50].

Другой вид фрактала, показанный на рисунке 1.20, который можно использовать в качестве диполя – рекурсивное дерево.

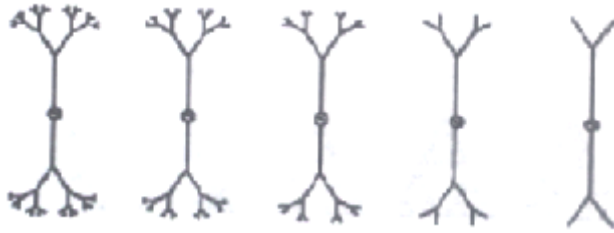


Рисунок 1.20 – Рекурсивное дерево

Фрактал образуют из простого монополя путем последовательного разбиения его вершин на две ветви под заданным углом до 60° . Каждая новая итерация увеличивает число проводящих путей на краях антенны и при неизменной высоте дерева понижает резонансную частоту.

Помимо дипольных структур в качестве узкополосных антенн можно использовать фрактальные рамки, построенные на основе рассмотренных выше кривых Коха и Минковского. Такая антенна представлена на рисунке 1.21.

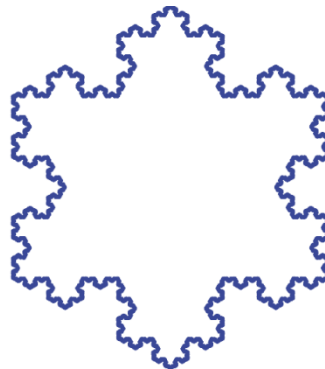


Рисунок 1.21 – Изображение рамочных антенн на основе фракталов Коха и Минковского

Традиционные рамочные антенны при малых габаритных размерах имеют низкое входное сопротивление, что усложняет их согласование с питающим фидером. Фрактальные же технологии позволяют заметно увеличить сопротивление рамочной антенны на частотах ниже резонанса, упрощая её согласование.

Помимо рассмотренных выше узкополосных фрактальных антенн, существуют и широкополосные фрактальные антенны. Так на рисунке 1.22 представлена фрактальная антенна Серпинского.



Рисунок 1.22 – Изображение фрактала Серпинского на нескольких итерациях

Процедура формирования такого фрактала на первой итерации состоит в удалении из исходного треугольника центрального треугольного сегмента с вдвое меньшей высотой. На второй итерации в образующихся новых треугольниках вновь удаляют центральные части. Затем последовательно повторяют процедуру удаления требуемое число раз.

Также известна фрактальная антенна на основе ковра Серпинского, представленная на рисунке 1.23.

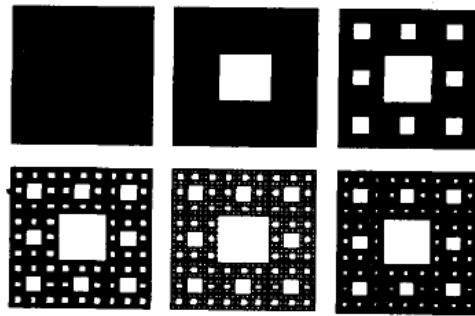


Рисунок 1.23 – Изображение фрактальной антенны в виде ковра Серпинского

Данная антенна формируется изъятием из исходного квадрата убывающих по величине квадратных сегментов. Для изготовления таких антенн, как правило, используют фаббер-технологии, позволяющие прецизионно формировать миниатюрные антенны любой сложности.

1.4.2.3 Микрополосковые антенны

Микрополосковые антенны (МПА), как правило, представляют собой многослойные конструкции, состоящие из проводящей подложки, одного или нескольких слоёв диэлектрика и помещённых на них плоских проводящих излучающих элементов, как показано на рисунке 1.24 [51, 52].

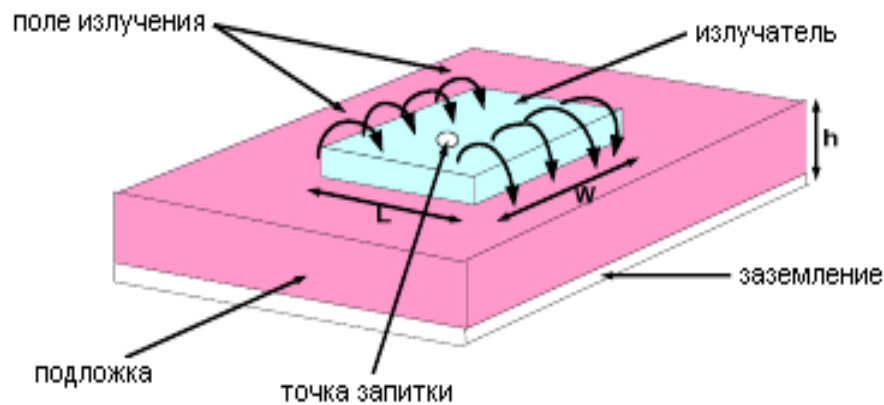


Рисунок 1.24 – Структура МПА

В некоторых случаях подложка может частично или полностью отсутствовать, а излучающие элементы могут быть помещены между диэлектрическими слоями.

Основными преимуществами МПА являются:

- высокая технологичность и повторяемость характеристик;
- низкая стоимость изготовления;
- простая конструкция;
- малая металлоёмкость, габаритные размеры и масса и т.д.

Такие антенны могут быть выполнены с высокой точностью, поскольку для их изготовления может быть использовано прецизионное оборудование, применяемое для производства печатных плат. По этой причине МПА также называют антеннами в печатном исполнении. Кроме этого, собственно излучающие элементы МПА могут быть функционально совмещены с линией питания, устройствами симметрирования и согласования сопротивлений, которые выполняются в этом случае на основе полосковых линий различных типов.

МПА способны излучать энергию с линейной, круговой и эллиптической поляризацией, допускают удобные конструктивные решения для обеспечения одно-, двух- и многочастотных режимов, позволяют легко объединить несколько излучателей в антенную решётку и разместить их на поверхности сложной формы. Также МПА обладают высокими аэродинамическими, механическими и температурными характеристиками.

В настоящее время применяется большое число типов элементарных излучателей полосковой конструкции и антенных структур на основе объединения однотипных и разнотипных элементарных излучателей в единой антенной системе.

Общим недостатком МПА является их узкополосность. В литературе приведены способы для расширения полосы рабочих частот в зависимости от предъявляемых требований [53].

1.4.3 Другие варианты построения антенной системы КА

Помимо рассмотренных выше вариантов построения малогабаритной, невыступающей антенной системы для малых КА, возможны и другие варианты.

Широкое применение в качестве бортовых АФУ КА нашли и вибраторные антенны. В литературе представлены разнообразные модификации такого класса антенн: симметричные и несимметричные, полуволновые и четвертьволновые, турникетные вибраторы.

Вибраторные антенны характеризуются сравнительно малой массой, возможностью получения произвольной поляризации и т.д. [44, 53].

На рисунке 1.25 представлены некоторые варианты таких антенн [54–56].

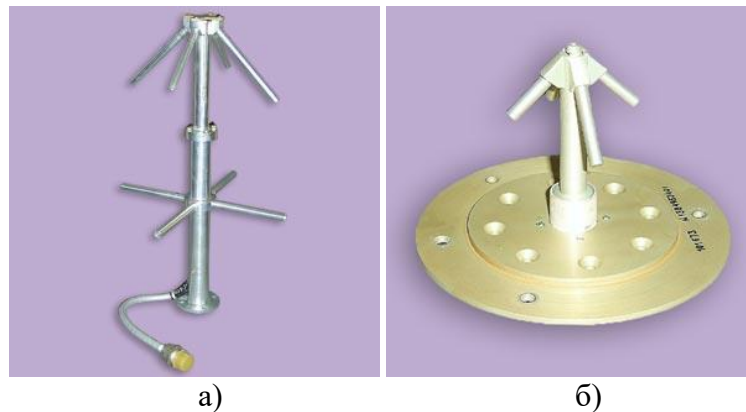


Рисунок 1.25 – Варианты построения вибраторных антенн:

- а) антенна дециметрового диапазона бортовой системы телесигнализации КА «Коронас-Фотон»; б) антенна телекомандной системы КА «Канопус–В» № 1

Излучатель Вивальди, представленный на рисунке 1.26, представляет собой сверхширокополосный печатный излучатель, построенный на основе расширяющейся щели, который также широко применяется на практике в качестве элементов антенных решёток и бортовых антенн [47, 53, 57].

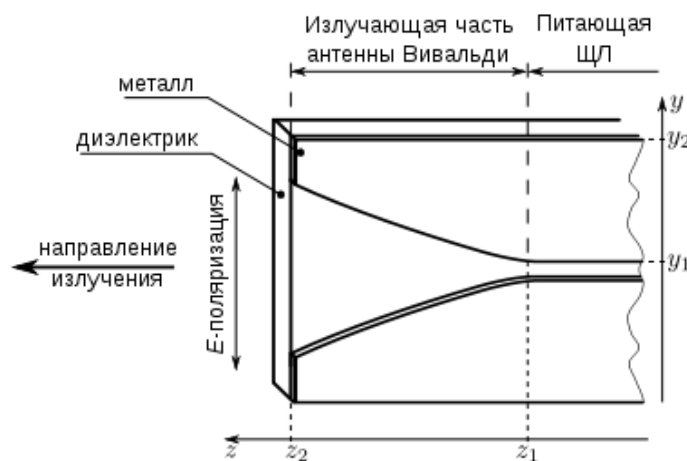


Рисунок 1.26 – Структура антенны Вивальди

В работе [58] предложены печатные излучатели на основе антенны «бабочка».

Широкое применение в качестве бортовых АФУ КА нашли и рупорные антенны. Рупорная антенна представляет собой металлическую конструкцию, состоящую из волновода переменного сечения с открытым излучающим концом. Для возбуждения антенны, как правило, используют волновод, прикрепленный к узкому концу рупора. По форме различают *E*-секториальные, *H*-секториальные, пирамидальные и конические рупорные антенны [36, 44, 47].

На рисунке 1.27 представлен макет бортовой рупорной антенны с круглым раскрывом сантиметрового диапазона [46].



Рисунок 1.27 – Бортовая рупорная антенна

Щелевые антенны также применяются в качестве бортовых антенн [59].

Часто на практике применяются в составе одной антенной системы КА разные типы антенн (см. рис. 1.3а–в), рис.1.10г)), например:

- спиральная антенна;
- штыревая антенна;
- рупорная антенна;
- вибраторная антенна;
- микрополосковая антенна;
- зеркальная антенна и др.

1.5 Требования к характеристикам антенн малых КА

Разработка любой антенной системы осуществляется в ходе выполнения технического задания, в котором представлены все требования к её параметрам. Такая задача, а именно *синтез антенной системы*, является основной задачей при разработке любой антенной системы. Для решения данной задачи необходимо рассмотреть теоретическую (математическую) часть и практическую (конструкторско-технологическую) часть [59].

Учитывая специфику бортовых АФУ определим требования к основным характеристикам антенн малых КА (см. 1.3) [60].

1.5.1 Характеристики направленности

В теоретической части разработчиками находятся решения внешней задачи, которая заключается в определении токов (полей) по заданным характеристикам, и внутренней задачи, которая в свою очередь заключается в определении элементов конструкции антенны, устройства возбуждения, распределительных систем и т.д.

Заданным требованиям могут удовлетворять различные классы антенн, что иногда либо усложняет, либо упрощает поиск их оптимального варианта, так как найденное решение должно полностью удовлетворять заданным техническим требованиям.

Главными характеристиками направленности бортовых антенн являются ДН, КУ и поляризация поля излучения антенной.

Для обеспечения надёжной связи с КА по всей траектории его движения необходимо иметь широкую ДН. В случае неориентированного полёта КА необходимо обеспечить ДН близкую к полусфере. А в случае ориентированного полёта – ДН специальной формы как показано на рисунке 1.28 (см. рис. 1.17Г).

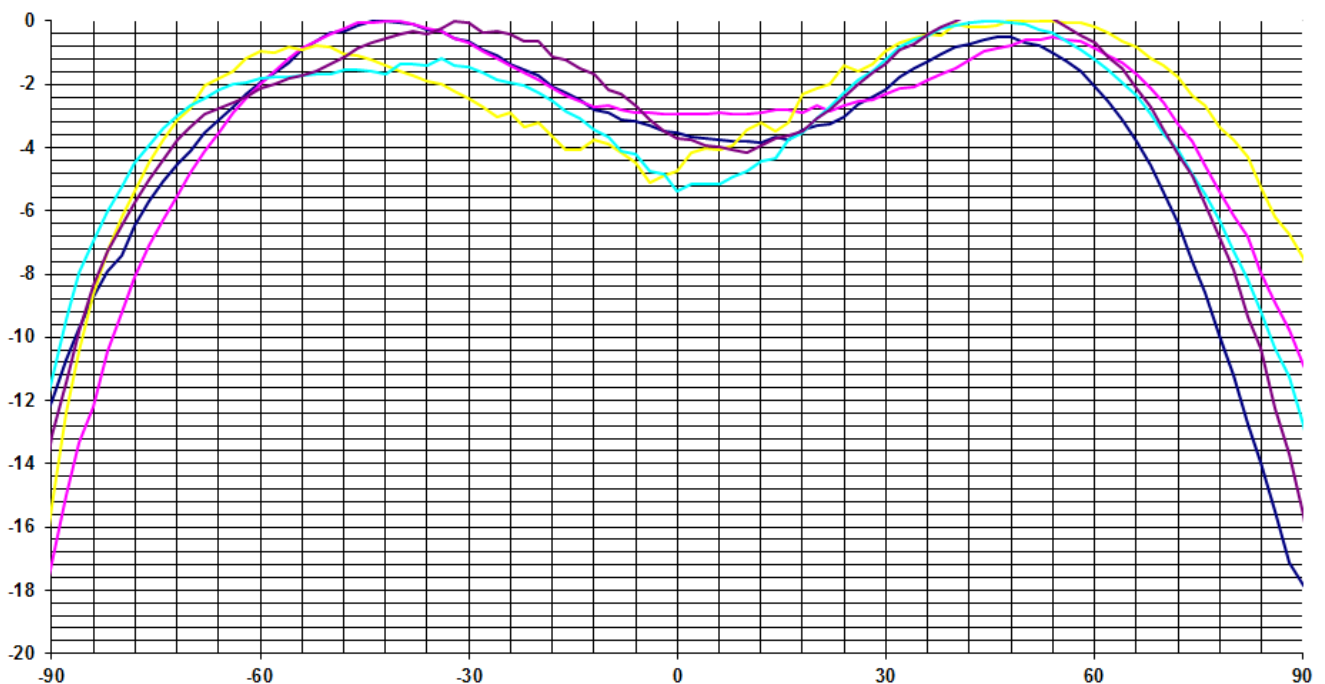


Рисунок 1.28 – Нормированная ДН специальной формы бортовой спиральной антенны дециметрового диапазона

Порой необходимо обладать изотропной ДН, например, в случае применения двух антенн с ДН близкой к полусфере, работа между которыми осуществляется с помощью переключателя.

Однако в виду наличия на поверхности КА большого количества целевой аппаратуры (эффект затенения), различных выступающих частей самого КА (солнечные батареи, гравитационные штанги и т.д.), влияния корпуса КА на формирование ДН (см. 1.3) невозможно обеспечить широкую ДН. Она представляет собой изрезанный, искажённый вид, отличающийся от известной (теоретической) ДН того, или иного типа антенн в виду перечисленных выше факторов. Также бортовая антенна не должна излучать в обратном направлении, т.е. поверхность КА служит экраном при формировании ДН.

КУ антенны, как известно, желательно иметь максимальным. Однако, как и в случае с ДН, из-за эффекта затенения возможно уменьшение КУ. В некоторых случаях допускаются значения КУ равные минус 10 дБ (на краях ДН).

Учитывая выше сказанное, как правило, бортовые АФУ обладают ДН с провалом по центру и низким КУ и максимальным КУ по углу максимальной дальности (см. рис. 1.28).

Порой на борту КА применяют приводы (одно и/или двух координатные) для обеспечения поставленной целевой задачи перед антенной системой КА.

Не менее важным параметром излучения является поляризационная характеристика антенны. Бортовые АФУ КА должны излучать поля, как с линейной, так и круговой поляризацией в зависимости от целевой задачи антенной системы КА.

Таким образом, к характеристикам направленности антенн, входящих в состав антенной системы малых КА, предъявляются следующие требования:

- ширина ДН $\pm 180^\circ$ (в случае неориентированного полёта КА) и $\pm 60^\circ$ (в случае ориентированного полёта КА);
- КУ не менее минус 1 дБ в рабочем секторе углов;
- излучение поля с линейной или круговой поляризацией.

1.5.2 Согласование

При разработке антенной системы возникает необходимость согласования излучателя с фидером (трактом СВЧ) в рабочем диапазоне частот. В случае с бортовыми антеннами, проблема согласования усугубляется влиянием условий размещения антенны относительно бортового передатчика или приёмника. Исходя из этих соображений, формируются требования к бортовой кабельной сети.

В соответствии с предъявляемыми требованиями выбираются:

- марка кабеля
- длина кабеля;
- массогабаритные параметры.

Стремление разработчиков уменьшить массу бортовой кабельной сети, а также применение длинных кабелей приводит к дополнительным потерям в фидерном тракте, а, следовательно, к снижению коэффициента полезного действия (КПД) антенной системы КА [40–62].

КПД линии зависит от согласования линии с передатчиком (приёмником) и антенной [61]. В случае идеально согласованной линии, КПД зависит только от потерь, имеющих в линии передачи. При рассогласовании линии с передатчиком (приёмником) и антенной в линии распространяется отраженная волна, амплитуда которой определяется коэффициентом отражения от нагрузки, а выражение для КПД в режиме смешанных волн примет вид:

$$\text{КПД} = \frac{(1 - |\Gamma|^2)e^{-2\alpha l}}{(1 - |\Gamma|^2)e^{-4\alpha l}}, \quad (1.1)$$

где $|\Gamma|$ – модуль коэффициента отражения, α – коэффициент затухания в линии передачи, обусловленный наличием потерь, l – длина линии.

На рисунке 1.29 представлена зависимость КПД линии от потерь [61].

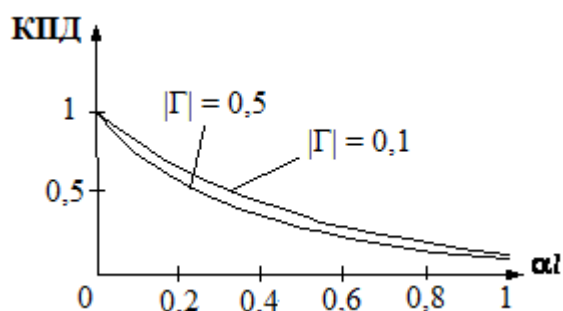


Рисунок 1.29 – Зависимость КПД линии от потерь при различном согласовании

Из рисунка 1.29 следует, что КПД линии слабо зависит от модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$, если потери в линии малы. Если же потери в линии значительны, то КПД существенно зависит от степени согласования линии.

Модуль коэффициента отражения определяется соотношением:

$$|\Gamma| = \frac{\text{КСВ} - 1}{\text{КСВ} + 1}, \quad (1.2)$$

где КСВ – коэффициент стоячей волны.

Анализируя выше сказанное, видно, что при проектировании бортовой антенной системы КА необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на степень согласования фидерного тракта с бортовой антенной, а именно:

- размещение антенны относительно приёмника или передатчика на борту КА;
- потери в разъёмах;

- потери в кабеле.

Очевидно, что любое рассогласование приёмопередающего тракта приводит к дополнительным потерям и ухудшению частотных характеристик системы.

Таким образом, для бортовых антенн, входящих в состав антенной системы малых КА, предъявляются следующие требования по значению КСВ:

- для связанных антенн не более 1,35;
- для передающих, приёмных, научных и др. антенн не более 2.

1.5.3 Частотные характеристики

Частотные характеристики определяют изменение основных параметров антенн с частотой. Например, с изменением частоты меняются направленность действия и энергетические характеристики АФУ. При рассмотрении частотных свойств, следует определить требования, предъявляемые к рабочему диапазону и полосе частот.

Частотное свойство определяется в зависимости от целевого назначения антенной системы КА [19], например:

- телеметрическая система (1,7 ГГц);
- телекомандная система (2,2–2,4 ГГц);
- навигационная система (ГЛОНАСС, GPS);
- радиолиния передачи целевой информации (137 МГц, 1,7 ГГц, 8.2 ГГц);
- межспутниковая связь (2,4 ГГц, 10 ГГц);
- научные системы и комплексы (137 МГц, 150 МГц, 400 МГц и др.).

Наблюдается общая тенденция, которая заключается в переходе на более высокие частоты, например 25–27 ГГц, т.е. миллиметровый диапазон. Однако есть потребность и в разработке бортовых антенн низких радиоловительских частот (145 МГц и 435 МГц).

В зависимости от целевой задачи требуются как узкополосные, так и широкополосные одночастотные и многочастотные бортовые антенны.

Учитывая, что на борту КА размещено большое количество различных систем, то возникает еще одно требование к бортовым антеннам – обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС). Данное требование заключается в следующем. Разработчикам необходимо обеспечить условия работы антенных систем, при которых между антеннами не возникают электромагнитные связи, оказывающие ухудшающее влияние на их работу, и функционирование антенных систем с требуемым качеством и надёжностью [63].

Таким образом, к частотным характеристикам бортовых антенн малых КА предъявляются следующие требования – работа в одночастотном (метровый, дециметровый диапазоны) и/или

многочастотном (метровый и дециметровый диапазоны) режимах с узкой (3%) и/или широкой (10%) полосой рабочих частот.

1.5.4 Массогабаритные требования

Вопрос практического построения антенных систем приводит к возникновению *конструкторско-технологической задачи антенностроения* [40]. Решение данной задачи должно включать в себя учёт особенностей конструкции, технологий изготовления антенных систем и т.д. В тоже время необходимо учитывать целый ряд ограничений, которые обусловлены располагаемой элементной базой, технологий изготовления и т.д.

В случае размещения антенной системы на поверхности малого КА необходимо учитывать следующий фактор. Вся рабочая поверхность, на которой возможно размещения как целевой аппаратуры (оптика, модуль научной аппаратуры, служебная аппаратура и др.), так и бортовой антенной системы, составляет примерно 1 м^2 и меньше (в зависимости от габаритов малого КА).

Таким образом, учитывая выше сказанное, к антеннам малых КА предъявляются весьма жесткие требования по массогабаритным показателям, которые определяются допустимыми габаритами самого малого КА и отведённого места для установки бортовых антенн, которое составляет не более 10×10 см для сверхмалых КА (стартовой массой менее 10 кг, например, КА «CubeSat») и не более 30×30 см для малых КА (стартовой массой от 10 кг до 500 кг).

1.6 Выводы по главе 1

1. Проведён обзор состояния и перспективы развития бортовых антенн КА, который показал, что активно развивается новый класс малых КА (стартовой массой менее 500 кг).

2. Сформулирована и приведена специфика бортовых АФУ КА, которая заключается в ограниченном пространстве для их размещения на борту КА, влияния корпуса КА и бортовой аппаратуры на характеристики антенн, вредное влияние космического пространства. Указанные факторы необходимо учитывать при проектировании бортовых АФУ КА.

3. Показана необходимость миниатюризации бортовой антенной системы вследствие миниатюризации космической техники.

4. Проведён обзор существующих путей построения бортовых антенных систем КА.

5. Определены требования к характеристикам антенн малых КА, а именно к характеристикам направленности (ДН, КУ, поляризации), согласованию фидерного тракта, частотным свойствам, массогабаритным и конструктивным параметрам.

6. Выявлена, помимо основных задач антенной техники, актуальная, современная задача по разработке малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА, возникшая в ходе миниатюризации космической техники.

Глава 2. Особенности построения малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА

В предыдущей главе определены требования к таким характеристикам антенн малых КА как характеристики направленности (ДН, КУ и др.), согласование, частотные свойства и массогабаритные показатели (см. 1.4.1–1.4.4). Однако прежде чем сделать выбор в пользу того или иного типа антенны для её применения в качестве бортовой при построении антенной системы малых КА, необходимо уделить внимание тем требованиям, которые предъявляются к космической технике в целом, и тем условиям, в которых они функционируют.

Бортовые антенны подвергаются ряду серьёзных воздействий, способных привести к потере работоспособности антенны. Это обусловлено способом выведения КА на целевую (рабочую) орбиту. Своё влияние оказывает и космическое пространство (см. 1.3).

Учитывая выше сказанное, определим основные виды нагрузок, которым подвергаются бортовые АФУ малых КА, а также сформулируем требования к применяемым материалам и конструкции бортовых антенн малых КА.

2.1 Условия работы бортовых антенн КА

Вследствие внешних факторов при выведении КА на орбиту, показанного на рисунке 2.1, нагрузки при старте РН делятся на несколько категорий, обусловленных разными этапами полёта.

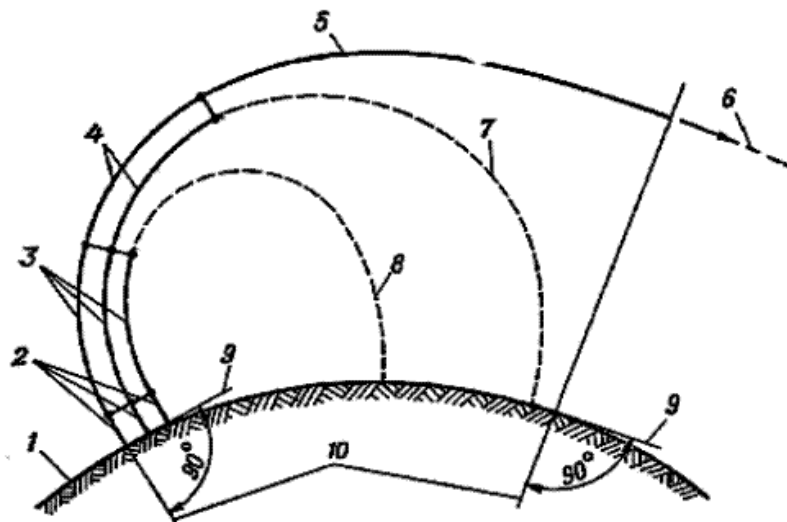


Рисунок 2.1 – Траектория движения РН: 1 – Земля, 2 – вертикальный участок полёта, 3 – активный участок полёта I ступени, 4 – активный участок полёта II ступени, 5 – активный участок полёта III ступени, 6 – орбита КА, 7 – пассивный участок полёта ракетного блока II ступени; 8 – пассивный участок полёта ракетного блока I ступени; 9 – местный горизонт; 10 – направление радиуса Земли

После вертикального старта РН выходит на криволинейный участок траектории полёта, обеспечивающий постепенное уменьшение угла наклона её оси по отношению к местному горизонту. Для уменьшения потерь скорости РН от аэродинамического сопротивления желательно как можно более быстрое прохождение ею плотных слоёв атмосферы и приближение её траектории полёта к горизонтальной только после выхода из этих слоёв. В плотных слоях атмосферы РН, как правило, движется по траектории, близкой к траектории с нулевой подъёмной силой, что обеспечивает снижение нагрузок, вызываемых аэродинамическими силами при больших углах атаки, на её корпус.

2.1.1 Механические воздействия

Рассмотрим *механические воздействия* на конструкцию бортовых антенн [64, 65].

Бортовые АФУ подвергаются разным механическим воздействиям, которые возникают в следующих случаях:

- при старте РН с КА (см. рис. 1.2);
- во время выведения КА на целевую орбиту с помощью РН (см. рис. 2.1);
- в момент отделения КА от РН после вывода на целевую орбиту.

Квазистатическая нагрузка создаётся при ускорении, проходит через весь КА и может присутствовать на протяжении нескольких моментов. К ней относится, например, вибрация (преходящий компонент), однако её частный компонент отличается от естественной частоты КА и, следовательно, не вызывает существенного ускорения по всему КА. Максимум нагрузки возникает на уровне сверхзвуковой неустойчивости и при выключении основного двигателя, а не в момент отрыва. Непосредственно перед выключением двигателя уровень тяги удерживается на максимуме, в то время как масса топлива РН становится минимальной, благодаря чему ускорение КА достигает максимума. Квазистатические нагрузки критически важны для основных несущих элементов конструкции, таких как центральная камера ракетного двигателя.

Синусоидальная вибрация представляет собой набор низкочастотных преходящих вибраций, возникающих во время взлёта. Любой КА имеет резонансную частоту, способную повлиять на состояние КА и усилить вибрационное воздействие.

Акустический шум достигает предела в точке отрыва от Земли в момент, когда уровень шума, отражённого от стартовой площадки, и давление окружающего воздуха доходят до максимума. Для распределения спектра используются октавные (удвоенные) поддиапазоны частот. Ускорение акустического шума может оказаться важнейшим фактором, определяющим компоновку лёгких конструкций с большой площадью и малым весом, таких как антенные

рефлекторы типа «тарелок», солнечные батареи и боковые панели КА, которые не имеют дополнительной нагрузки по массе.

Испытания на *случайную вибрацию* позволяют убедиться разработчикам в том, что на относительно поздних этапах акустических испытаний или испытаний на случайную вибрацию интегрированного КА не будут выявлены никакие проблемы.

Ударные нагрузки возникают в интерфейсе КА после отделения разгонного блока и сброса обтекателя. Ускорение на данном этапе крайне высокое. Однако оно влияет лишь на жёстко закреплённые элементы, резонансные частоты которых близки к частотам источников ударов. Энергия высокочастотной ударной нагрузки быстро затухает при удалении от источника ударов и в структурных соединениях между источником ударов и отвечающими на нагрузку элементами.

Учитывая приведённые выше виды механических воздействий, возникает необходимость в формировании определённых требований по жёсткости конструкции бортовых антенн. Данное требование можно трактовать как ответную реакцию на квазистатическую и переходную вибрацию.

2.1.2 Температурные воздействия

Во время движения КА на орбите по заданной траектории происходит климатическое воздействие. Это воздействие обусловлено особенностью движения КА. Примеры траекторий движения КА приведены на рисунке 2.2.

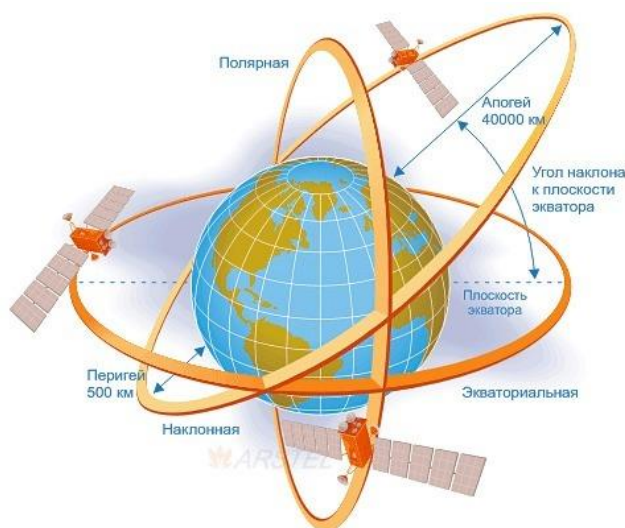


Рисунок 2.2 – Траектории движения КА по целевой орбите

Как правило, во время движения КА по заданной траектории он оказывается либо в тени, которая создается самой Землёй, либо подвергается воздействию Солнца. Причем такое явление наблюдается во время всего САС КА и носит циклический характер.

Отсюда следует, что весь КА и в том числе бортовая антенная система, подвергаются воздействию как *повышенной температуры* в случае нахождения КА на освещённой траектории движения, так и *пониженной температуры* в случае нахождения в теневой части траектории движения КА.

Учитывая выше сказанное, возникает необходимость в формировании определённых требований к температуростойкости применяемых материалов в конструкции бортовых антенн.

2.1.3 Воздействие космического пространства

После выведения РН КА на заданную орбиту на КА происходит воздействие космического пространства, которое заключается в следующем.

Одной из особенностей космического пространства является наличие высокого вакуума, т.е. фактическое отсутствие атмосферного давления. Изменения давления над любой фиксированной точкой могут быть приближённо аппроксимированы следующим выражением [66]:

$$\Delta P = -P_0 \frac{Mg}{kT} \Delta h, \quad (2.1)$$

где ΔP – уменьшение атмосферного давления; P_0 – атмосферное давление в основании рассматриваемого столба атмосферы; M – средний молекулярный вес атмосферы в данном интервале высот; g – среднее ускорение силы тяжести в данном интервале высот, см/сек²; Δh – интервал высот, см; k – постоянная Больцмана; T – средняя кинетическая температура в интервале высот, К.

Окружающая нас воздушная среда, а именно сухой воздух, состоит по объёму примерно из 78% азота, 21% кислорода, 0,9% аргона и ряда других газов, в сумме составляющих 0,1%. Исследования, проведённые с помощью метеорологических ракет, показывают, что основной состав воздуха практически не изменяется до высоты ≈ 85 км.

В таблице 2.1 приведены данные по изменению состава атмосферы Земли в зависимости от высоты [67].

Таблица 2.1 Характеристики атмосферы Земли

№ п/п	Высота h , км	Давление, мм рт. ст.	Температура, °С	Число частиц остаточного газа в 1 см ³	Состав
1	0	760	+ 15	$2,5 \times 10^{19}$	N ₂ , O ₂ , Ar
2	11	177	- 56	$4,5 \times 10^{18}$	N ₂ , O ₂ (O ₃), Ar
3	20	42	- 56	2×10^{18}	N ₂ , O ₂ (O ₃), Ar
4	30	9	- 42	4×10^{17}	N ₂ , O ₂ (O ₃), Ar

Продолжение таблицы 2.1

5	46	1	0	3×10^{16}	$N_2, O_2(O_3), Ar$
6	64	10^{-1}	- 33	10^{15}	N_2, O_2, Ar
7	79	10^{-2}	- 85	10^{14}	N_2, O_2, Ar
8	102	10^{-4}	- 60	10^{12}	N_2, O_2, O
9	200	10^{-6}	+ 630	10^{10}	N_2, N_1, O, O^+, He
10	800	10^{-9}	+ 3040	10^6	O, O^+, H
11	6500	10^{-12}	+ 10^3-10^4	10^3	H, H^+
12	>22000	10^{-13}	+ 10^3-10^5	10	H^+, He^{++}

Таким образом, очевидно, что с изменением высоты происходит изменение давления и состава атмосферы, а также её плотность и температура.

Влияние высокого вакуума на КА проявляется:

- в потерях, обусловленных конвективной теплопередачей;
- в коронном разряде;
- в сублимации материала;
- в изменениях прочности материалов;
- в потере смазки.

Рассмотрим подробнее указанные выше факторы.

При оценке *потерь, обусловленных конвективной передачей*, необходимо учитывать следующее. Теплопроводность земной атмосферы на высотах ниже 90 км зависит от атмосферных температурных градиентов и не зависит от колебаний давления или плотности. На высоте более 90 км средний свободный пробег молекул становится сопоставим с расстоянием, при котором температурный градиент значительно изменяется и теплопроводность перестаёт быть независимой от давления. А начиная с высоты около 300 км, конвективная теплопередача становится незначительной.

Явление *коронного разряда* в электроаппаратуре изменяется обратно пропорционально давлению. Это явление выражает закон Пашена, согласно которому потенциал пробоя зависит от давления газа, от просвета между электронами и от их геометрии. Например, при просвете между плоскими электродами в 1 см минимальный потенциал пробоя равен 173 В/мм при давлении около 2 мм рт. ст., что соответствует высоте 60 км. Таким образом, явление коронного разряда существенно только на малой высоте, во время запуска и может быть предотвращено герметизацией или вакуумированием электрических подсистем.

Сублимация материала связана с молекулярным весом материала, температурой окружающей среды и давлением паров материала при данной температуре. Скорость сублимации выражается эмпирически следующим уравнением [68]:

$$G = 5,84 \times 10^{-2} P \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (2.2)$$

где G – скорость сублимации, г/(см²×с); M – молекулярный вес материала; T – абсолютная температура, К; P – давление паров при температуре T , мм рт. ст.

В условиях высокого вакуума наблюдается *изменение прочности материалов и потери смазки*.

Отдельного рассмотрения требует влияние *радиации*. Вокруг Земли расположены радиационные пояса, представленные на рисунке 2.3.

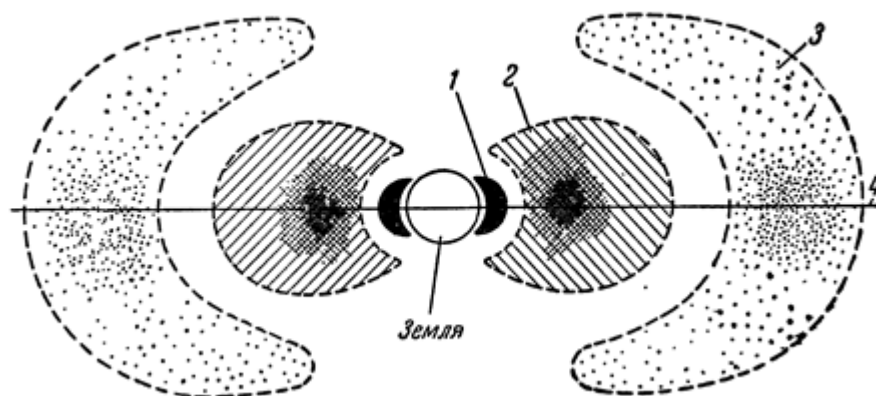


Рисунок 2.3 – Схема расположения радиационных поясов вокруг Земли: 1 – внутренний пояс; 2 – внешний пояс; 3 – самый внешний пояс; 4 – геомагнитный экватор

Одним из факторов, ограничивающих применение электротехнических материалов, проводов и кабелей на борту КА, а также целевой аппаратуры и других систем КА, является их радиационная стойкость, поскольку они оказываются под воздействием космических ионизирующих излучений в течение всего САС КА. Особенно актуальна проблема радиационной стойкости материалов и кабелей, предназначенных для использования на его внешней поверхности. Обычно большая часть поверхности КА закрыта матами экранно–вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), которые дополнительно выполняют и роль защиты от космических ионизирующих излучений с низкой проникающей способностью. Но в ряде случаев эта защита отсутствует, и тогда материалы и кабели оказываются в непосредственном контакте с космической средой (высокий вакуум, термоциклирование, ультрафиолетовая радиация Солнца и, конечно, весь спектр энергий заряженных частиц космического пространства) [69].

Как известно, существующие справочные данные по радиационной стойкости материалов и кабелей получены при их облучении гамма–квантами [70] или быстрыми электронами [71] в

нормальных условиях на образцах, в которых поглощённая доза однородна по объёму и используется в качестве показателя радиационной стойкости [72].

Радиационные условия в околоземном космическом пространстве определяются:

- потоками частиц естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ) [73];
- частицами солнечных космических лучей (СКЛ) [74];
- частицами галактических космических лучей (ГКЛ) [75].

На рисунке 2.4 и 2.5 соответственно приведены интегральные энергетические спектры протонов ЕРПЗ, протонов СКЛ и электронов ЕРПЗ в период максимума солнечной активности (СА) для трёх орбит, наиболее типичных для КА [69].

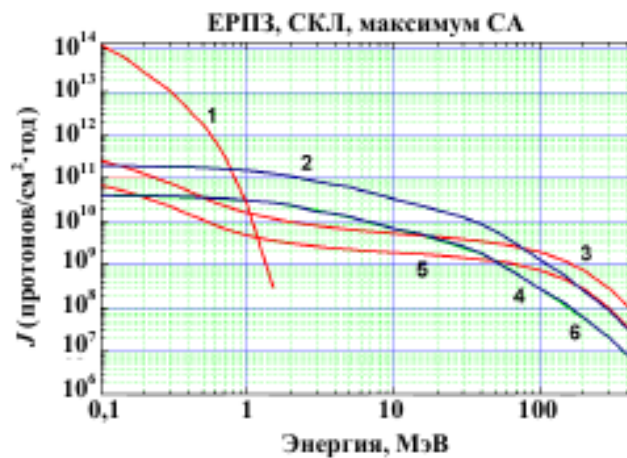


Рисунок 2.4 – Интегральные потоки протонов ЕРПЗ (красный цвет) и СКЛ (синий цвет) на орбите геостационарных спутников (1, 2) и на солнечно-синхронной орбите с высотами на экваторе и 832 км (3, 4) и 652 км (5, 6) в максимуме СА

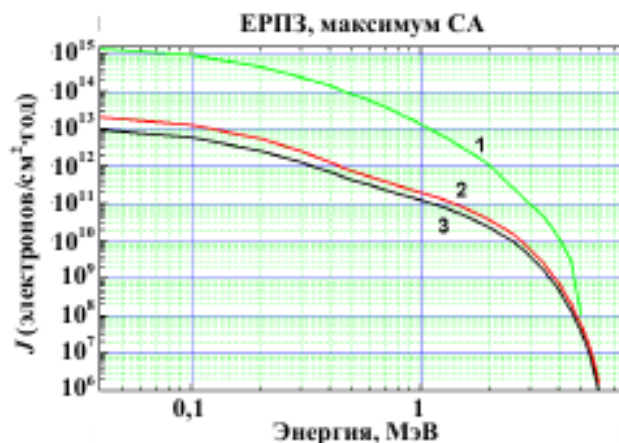


Рисунок 2.5 – Интегральные потоки электронов ЕРПЗ на орбите геостационарного спутника(1) и на солнечно-синхронной орбите с высотами на экваторе 832 км (2) и 652 км (3) в максимуме СА

Характерным отличием периода минимума СА от периода максимума состоит в том, что в минимуме отсутствуют потоки СКЛ.

Помимо радиации существует вероятность воздействия на КА *метеоритов, метеоритной пыли, космического мусора и т.д.* [76].

Степень влияния космического пространства на КА зависит еще и от рабочей орбиты спутника. На рисунке 2.6 представлены варианты орбит КА.

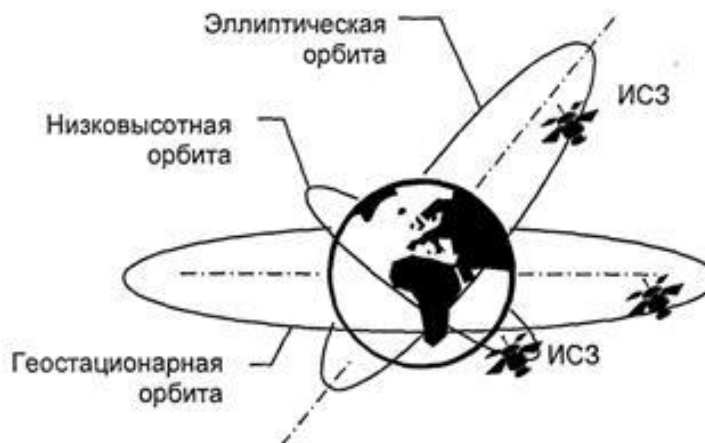


Рисунок 2.6 – Варианты орбит КА

Учитывая выше сказанное, возникает необходимость в формировании определённых требований к применяемым материалам, кабелям и конструкции бортовых антенн КА из-за вредного влияния космического пространства, например, влияние радиации.

2.2 Требования к конструкции и материалам антенн малых КА

Рассмотрев основные типы воздействия на антенны малых КА, определим основные требования к конструкции антенн и используемым материалам с учётом этих воздействий.

2.2.1 Требования к механическим воздействиям

Антенны КА должны обладать большой механической прочностью, устойчиво работать при воздействии механических ударов и выдерживать перегрузки. Кроме того, не должны быть механические резонансы конструкций антенн и существенное изменение их электрических параметров при воздействии вибраций. В противном случае наличие перечисленных выше факторов может привести к потере работоспособности бортовой антенной системы КА.

Диапазон и характер механических требований может изменяться в широких пределах в зависимости от типа КА, его орбиты и места установки антенн на поверхности КА [77].

Как правило, бортовые антенны должны выдерживать следующие виды механического воздействия: вибрационные перегрузки, линейные перегрузки, ударные нагрузки, акустический шум.

В таблицах 2.2–2.4, соответственно, приведены эксплуатационные значения приведённых выше видов механического воздействия, которые должны выдерживать антенны, составляющие антенную систему малых КА [78–80].

Таблица 2.2 Воздействие синусоидальной вибрацией

Диапазон частот f , Гц	Амплитуда виброускорения g , m/s^2	Длительность воздействия	Направление воздействия
2–2000	0,2–9,5	до 13 мин	в трёх направлениях

Таблица 2.3 Воздействие линейным ускорением

Ускорение g , m/s^2	Длительность воздействия	Направления воздействия
10	10 мин	В трех взаимно перпендикулярных направлениях

Таблица 2.4 Воздействие механическим ударом

Ускорение g , m/s^2	Длительность воздействия	Число ударов	Направления воздействия
100	2 мс	6	В трёх взаимно перпендикулярных направлениях

Для отработки механического воздействия проводят испытания [81]. Цель испытаний заключается в проверке механической прочности антенн и в случае необходимости предпринять меры по устранению выявленных недостатков конструкции на ранних стадиях разработки.

Испытания на механические воздействия бортовые антенн проходят как автономно, так и в составе КА, как показано на рисунке 2.7 [7, 46].



а)



б)

Рисунок 2.7 – Механические испытания малых КА:

а) КА «Университетский–Татьяна-2», б) КА «Канопус–В» № 1

Для обеспечения приведённых выше требований, используют в конструкции антенн высокопрочные металлы и диэлектрики. Также придают жесткость конструктиву антенн.

Таким образом, определены требования по механическому воздействию на антенны малых КА.

2.2.2 Требования к температурным воздействиям

Стоит уделить особое внимание тому факту, который заключается в резком изменении температурного воздействия, вызванного постоянным движением КА по заданной орбите с прохождением части траектории, находящейся под воздействием Солнца (повышенная температура), либо другой части траектории, находящейся в тени Земли (пониженная температура). Наблюдается циклическое температурное воздействие на бортовые антенны КА. При значительном перепаде температур может произойти заметное изменение размеров антенны и элементов её настройки (конденсаторов, индуктивностей, отрезков линий и т.д.). Некоторые материалы из-за температурного воздействия становятся хрупкими. Это может привести к расстройке антенны, а также к потере работоспособности.

Для недопущения потери работоспособности бортовых антенн малых КА необходимо применять для конструкции антенн и элементов настройки материалов с малым температурным коэффициентом линейного расширения. Может быть применён компенсационный метод, состоящий в применении элементов настройки и согласования антенн, имеющие температурные коэффициенты разного знака. Для уменьшения температурного коэффициента антенного контура он может заливаться диэлектриком.

Как и в случае с механическими воздействиями (см. 2.2.1), бортовые антенны подвергаются климатическим испытаниям в климатических камерах, приведённых на рисунке 2.8, с целью выявления влияния на их работоспособность воздействие повышенной и пониженной температур, а также в случае необходимости проведения их дальнейшей доработки [46].



Рисунок 2.8 – Климатические камеры

Таким образом, определены температурные требования к антеннам малых КА:

- пониженная температура от минус 50°C до минус 100°C;
- повышенная температура от плюс 50°C до плюс 100°C;
- количество циклов не менее 5.

2.2.3 Требования к воздействиям космического пространства

АФУ должно нормально функционировать в условиях воздействия ЕРПЗ в течение всего САС КА. Значения поглощенных доз радиации в зависимости от САС, вида воздействующего фактора и места размещения бортовых антенн на поверхности КА приведены в таблице 2.5 [69].

Таблица 2.5 Суммарные поглощённые дозы в кремнии за год за различными защитами из алюминия для трёх орбит в максимуме и минимуме СА

Толщина Al		Полная поглощённая доза радиации (рад)					
		Геостационарная орбита		832 км		652 км	
мм	г/см ²	max	min	max	min	max	min
0,050	0,014	6,408E+07	6,403E+07	9,715E+05	4,366E+05	4,731E+05	1,998E+05
0,100	0,027	3,795E+07	3,793E+07	5,435E+05	2,297E+05	2,597E+05	1,042E+05
0,200	0,054	1,900E+07	1,899E+07	2,476E+05	9,720E+04	1,193E+05	4,553E+04
0,300	0,081	1,122E+07	1,120E+07	1,329E+05	5,401E+04	6,685E+04	2,641E+04
0,400	0,108	7,300E+06	7,289E+06	7,975E+04	3,532E+04	4,252E+04	1,790E+04
0,500	0,135	5,022E+06	5,013E+06	5,234E+04	2,514E+04	2,964E+04	1,311E+04
0,600	0,162	3,615E+06	3,607E+06	3,724E+04	1,900E+04	2,210E+04	1,013E+04
0,800	0,216	2,124E+06	2,117E+06	2,328E+04	1,252E+04	1,457E+04	6,859E+03
1,000	0,270	1,372E+06	1,366E+06	1,687E+04	9,197E+03	1,084E+04	5,107E+03
1,500	0,405	5,350E+05	5,291E+05	9,529E+03	5,206E+03	6,304E+03	2,905E+03
2,000	0,540	2,405E+05	2,350E+05	6,317E+03	3,358E+03	4,241E+03	1,844E+03
2,500	0,675	1,203E+05	1,154E+05	4,482E+03	2,339E+03	3,035E+03	1,251E+03
3,000	0,810	6,561E+04	6,140E+04	3,294E+03	1,736E+03	2,237E+03	9,000E+02
4,000	1,080	2,187E+04	1,851E+04	2,030E+03	1,112E+03	1,385E+03	5,399E+02
5,000	1,350	9,289E+03	6,265E+03	1,479E+03	8,237E+02	1,022E+03	3,784E+02
6,000	1,620	5,530E+03	2,744E+03	1,214E+03	6,879E+02	8,445E+02	3,034E+02

Продолжение таблицы 2.5

7,000	1,890	3,859E+03	1,465E+03	1,032E+03	6,149E+02
8,000	2,160	2,970E+03	9,238E+02	9,080E+02	5,710E+02
9,000	2,430	2,530E+03	6,991E+02	8,345E+02	5,431E+02
10,000	2,700	2,222E+03	6,033E+02	7,674E+02	5,186E+02
12,000	3,240	1,709E+03	5,167E+02	6,474E+02	4,842E+02
14,000	3,780	1,386E+03	4,617E+02	5,651E+02	4,536E+02
16,000	4,320	1,202E+03	4,188E+02	5,147E+02	4,283E+02
18,000	4,860	1,054E+03	3,824E+02	4,744E+02	4,075E+02
20,000	5,400	9,165E+02	3,516E+02	4,345E+02	3,855E+02
10,000	2,700	2,222E+03	6,033E+02	7,674E+02	5,186E+02
12,000	3,240	1,709E+03	5,167E+02	6,474E+02	4,842E+02

По приведённым данным в таблице 2.5 проводится оценка радиационной стойкости антенн малых КА, в которой учтены тип орбиты КА и необходимая толщина защитного слоя.

2.3 Вариант построения малогабаритной, невыступающей бортовой антенной системы малых КА с помощью МПА

Рассмотрим возможные варианты построения антенной системы малых КА. При поиске путей построения малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА, необходимо учитывать требования к характеристикам применяемых антенн (КСВ, ДН, КУ и т.д.), которые были определены в предыдущей главе (см. 1.4.1–1.4.4), а также требования к конструкции антенны и применяемым материалам (см. 2.2.1–2.2.3).

Учитывая специфику, которой обладают бортовые АФУ КА, проведём анализ возможности применения рассмотренных вариантов тех или иных типов антенн в качестве бортовых (см. 1.2.1–1.2.3) в качестве бортовых антенн малых КА [82].

Конструктивное решение поставленной задачи несёт за собой ряд трудностей, которые заключаются в следующем.

Применение выносных элементов на борту КА приводит к возможности нераскрытия этих элементов, что в свою очередь способствует к не выведению бортовой антенны в рабочее положение. Тем самым есть вероятность невыполнения целевой задачи АФУ. Все это ведёт к снижению надёжности.

Применение антенной стойки не всегда может решить поставленную задачу, так как достаточно сложно разместить все бортовые антенны КА в едином конструктивном

исполнении, что в свою очередь снижает надёжность и повышает сложность конструкции АФУ КА.

Метод включения сосредоточенных элементов применим не ко всем типам антенн, а также несёт за собой усложнение конструктива АФУ.

Вариант применения различных частей КА в качестве бортовых антенн в основном может закрыть вопрос по разработке низкочастотных бортовых АФУ (20 МГц).

Фрактальные антенны обладают достаточно сложной конструкцией и требуют определённых итераций при их производстве. Все это приводит к усложнению конструкции и снижению надёжности.

Рассмотренные другие типы антенн также имеют свои недостатки в части выступающей конструкции и т.д.

Учитывая все выше сказанное, возник интерес к применению МПА в качестве бортовых антенн для построения малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА [83]. Данный тип антенн обладает рядом неоспоримых преимуществ для построения указанной антенной системы малых КА, а именно:

- малогабаритной, невыступающей конструкцией;
- обеспечивают заданные требования к бортовым антеннам, составляющим антенную систему малых КА;
- высокой технологичностью благодаря применению печатных технологий при изготовлении;
- простой конструкцией из-за минимального количества элементов, входящих в конструкцию самой антенны, что в свою очередь повышает надёжность;
- возможностью быстрого изготовления при серийном производстве благодаря простой конструкции, повторяемости характеристик и т.д.;
- низкой стоимости благодаря малой металлоёмкости и возможности быстрого изготовления.

МПА нашли широкое применение в навигационных и связных системах [84–86].

Таким образом, для построения малогабаритной, невыступающей, высокотехнологичной, надёжной антенной системы малых КА предложен вариант применения МПА в качестве бортовых АФУ.

Для практического применения рассмотрен вариант построения указанной выше антенной системы для малого КА «Ионосфера».

2.4 Антенные системы малого КА «Ионосфера»

КА «Ионосфера», входящий в состав космического комплекса (КК) «Ионозонд», создается в АО «Корпорации «ВНИИЭМ» по заказу Федерального космического агентства.

Данный КК разрабатывается с целью получения регулярной и достоверной информации с помощью измерений космическими средствами характеристик и параметров процессов, явлений в ионосфере, верхних слоях атмосферы, околоземного космического пространства и магнитосферы.

Задачами КК «Ионозонд» являются:

- мониторинг состояния ионосферы;
- наблюдение и контроль Солнца и солнечной активности;
- наблюдение и контроль верхней атмосферы;
- контроль состояния магнитосферы;
- диагностика волновой акустики (электромагнитные, акустические волны);
- диагностика корпускулярных ионизирующих излучений;
- диагностика состояния озона.

Данные, полученные от приборов КА, могут быть использованы для решения широкого спектра задач контроля и прогнозирования обстановки в интересах заказчиков и потребителей: Росгидромета, Роскосмоса, МЧС РФ, Минсвязи, Минтранса и др.

К моменту создания комплекса орбитальная группировка, представленная на рисунке 2.9, должна включать в себя пять КА: четыре КА «Ионосфера» и один КА «Зонд» [87].

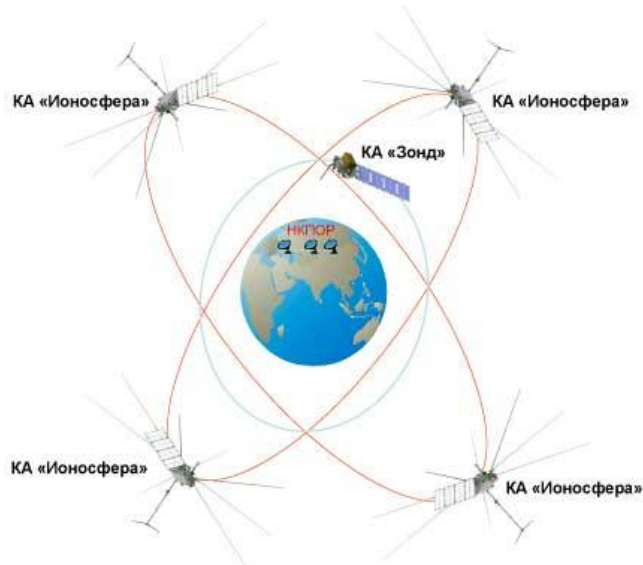


Рисунок 2.9 – Орбитальная группировка КК «Ионозонд»

КА «Ионосфера» и КА «Зонд» представлены на рисунке 2.10 соответственно.

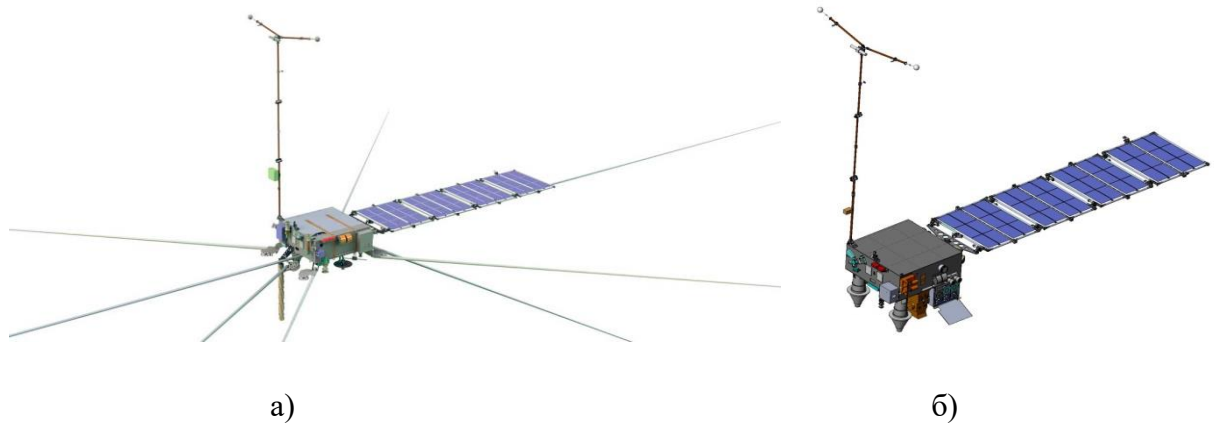


Рисунок 2.10 – Состав КК «Ионозонд»: а) КА «Ионосфера», б) КА «Зонд»

Все КА выводятся на орбиту попутно. КА «Ионосфера» — однотипные. КА «Зонд» создается на той же платформе, что и КА «Ионосфера». Задачи, решаемые ими, несколько различаются. КА «Ионосфера» предназначены для получения данных об околоземном пространстве, а КА «Зонд» для получения информации о состоянии Солнца. Отсюда и разные требования к ориентации КА: у КА «Ионосфера» — орбитальная, а у КА «Зонд» — солнечная.

КА «Зонд» располагается на эллиптической орбите с апогеем 1200 км, перигеем 400 км, причем наклонение плоскости орбиты должно быть таким, чтобы обеспечивалось максимальное время наблюдения северных широт (полярной «шапки» Земли).

Такое орбитальное расположение КА «Зонд» и КА «Ионосфера» (см. рис. 2.9) позволяет выполнять задачи контроля состояния верхней атмосферы, магнитосферы, озоносферы, а также обеспечивать получение регулярной и достоверной информации с помощью измерений космическими средствами характеристик и параметров процессов и явлений в ионосфере, верхней атмосфере и магнитосфере в спокойный период и в условиях активных воздействий природного и антропогенного характера.

Технические характеристики КА «Ионосфера» и КА «Зонд» приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 Технические характеристики КА «Ионосфера» и КА «Зонд»

Параметры	КА «Ионосфера»	КА «Зонд»
Тип орбиты	Солнечно-синхронная орбита	Солнечно-синхронная орбита
Период обращения	≈101 мин	98 мин
Средняя высота	820 км	650 км
Наклонение	98,8 град	98 град
Масса	≈ 400 кг	≈ 400 кг
Масса целевой аппаратуры (с радиолинией)	до 100 кг	до 100 кг

Продолжение таблицы 2.6

Габаритные размеры (транспортные), мм	1200×1200×800 мм	1200×1200×800 мм
Мощность солнечной батареи	не менее 700 Вт	не менее 700 Вт
Расчётный САС	8 лет	8 лет
Выведение	Попутно	Попутно

В [88] подробно представлен и описан состав целевой аппаратуры КА «Зонд» и КА «Ионосфера».

Антенная система малого КА «Ионосфера» УКВ диапазона состоит из следующих антенн.

Одна антенна предназначена для передачи данных с бортовой аппаратуры научной информации в составе радиолинии спутникового ионозонда «ЛАЭРТ» на рабочей частоте 137 МГц для комплексного глобального зондирования Земли с борта КА. А две другие антенны предназначены для обеспечения функционирования бортового двухчастотного передатчика «МАЯК 150/400» с двумя независимыми каналами, который представлен на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Внешний вид бортового двухчастотного передатчика «МАЯК 150/400»

Передатчик предназначен для высокоточных радиотомографических измерений регулярной, волновой и стохастической структуры распределения электронной концентрации в подспутниковой толще ионосферной плазмы с целью выявления аномальных явлений и характерных признаков изменений в ионосфере, связанных с естественными и искусственными возмущениями ионосферы (вулканическая, сейсмическая, циклоническая и грозовая активность, техногенные воздействия), а также для мониторинга ионосферы с целью изучения физических процессов в ионосферной плазме и уточнения существующих моделей ионосферы.

Технические характеристики передатчика приведены в таблице 2.7

Таблица 2.7 Технические характеристики передатчика «МАЯК 150/400»

Рабочая частота первого канала, МГц	$400 \pm 2,7$
Рабочая частота второго канала, МГц	150 ± 1
Выходная мощность первого и второго канала, Дбм	27
Выходное сопротивление первого и второго канала, Ом	50
Мощность потребления в режиме передачи, Вт	6
Мощность потребления в режиме молчания, Вт	0,7
Габариты модуля передатчика, мм	191×140×58
Масса модуля передатчика, кг	0,98
Средняя наработка изделия на отказ, ч	не менее 10 000
Срок службы, лет	не менее 3
Допустимый срок хранения, лет	не менее 2

К АФУ бортового ионозонда «ЛАЭРТ» предъявляются следующие требования:

- антенна должна обеспечивать передачу на наземные пункты научной информации с КА;
- вид поляризации правая круговая с коэффициентом эллиптичности не менее 0,2 по полю в пределах углов $\pm 70^\circ$ относительно оси антенны;
- КСВ антенны не более 1,4 при волновом сопротивлении тракта АФУ 50 Ом;
- КУ не менее 3 дБ по мощности в направлении центра Земли и не менее минус 1 дБ в пределах $\pm 70^\circ$ от направления на центр Земли.

К АФУ двухчастотного бортового передатчика «МАЯК 150/400» предъявляются следующие требования:

- антенны должны обеспечивать передачу на наземные пункты приёма сигналов бортового передатчика, обеспечивающих проведение измерений ионосферно–электромагнитным комплексом;
- вид поляризации антенн — линейная;
- ДН – имеет преимущественное направление на центр Земли в пределах 0° – 45° от надира и 0° – 360° по азимуту;
- волновое сопротивление тракта 50 Ом при КСВ на входах АФУ — не более 2.

Учитывая принятую общую компоновку КА «Ионосфера», а также возможные места расположения антенн, параметры орбиты и ориентацию КА относительно Земли в полёте по орбите и технические требования к АФУ, для КА «Ионосфера» № 1, № 2 АО «НИИЭМ» г. Истра была разработана следующая антенная система, представленная на рисунке 2.12 [88].

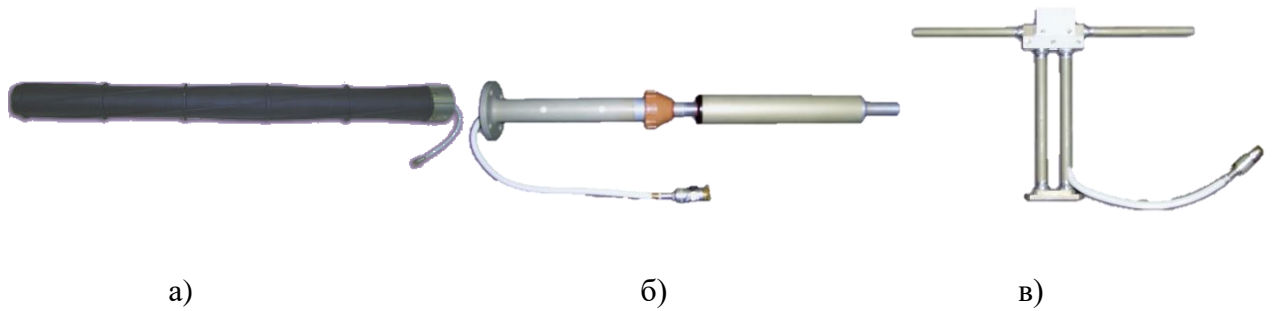


Рисунок 2.12 – Антенная система малого КА «Ионосфера» № 1, № 2:
 а) спиральная антенна; б) штыревая антенна; в) вибраторная антенна

Для передачи данных с бортовой аппаратуры научной информации в составе радиолинии спутникового ионозонда «ЛАЭРТ» на рабочей частоте 137 МГц была разработана четырёхзаходная спиральная антенна (см. рис.2.12а)).

Антенна представляет собой резонансную, четырёхзаходную, полувитковую спираль, излучатели которой последовательно запитаны с фазовым сдвигом 90° , что обеспечивает излучение антенной поля с поляризацией, близкой к круговой. Направление намотки излучателей обеспечивает правостороннюю поляризацию. Излучающие части спирали (витки) выполнены в виде изогнутых медных трубок. Длины витков близки к $\lambda/2$.

Питание витков спирали происходит с помощью коаксиальных кабелей, проходящих внутри двух соседних витков спирали и обеспечивающих питание двух пар противоположных витков спирали. Данная схема питания позволяет получить широкополосное симметрирование токов, питающих витки спирали. Фазовый сдвиг токов в кабелях 90° , что и обеспечивает питание излучающих элементов спирали фазовым сдвигом $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ [89].

Для обеспечения функционирования бортового двухчастотного передатчика «МАЯК 150/400» с двумя независимыми каналами были разработаны штыревая (рабочая частота 150 МГц) и вибраторная антенны (рабочая частота 400 МГц).

Антенна (см. рис. 2.12б)) выполнена в виде четвертьволнового несимметричного вибратора, установленного вертикально на панели корпуса КА, обращенной к Земле. Для уменьшения размеров антенны и согласования с входным сопротивлением питающего кабеля, вибратор имеет внутри короткозамкнутую коаксиальную линию и поднятую над основанием точку питания.

Антенна (см. рис. 2.12в)) представляет собой полуволновый симметричный вибратор, установленный параллельно панели КА, обращенной к Земле.

В таблице 2.8 приведены характеристики указанных выше бортовых УКВ антенн малого КА «Ионосфера» № 1, № 2.

Таблица 2.8 Характеристики УКВ антенн малого КА «Ионосфера» № 1, № 2

№ п/п	Характеристики	Тип антенны		
		Спиральная антенна	Штыревая антенна	Вибраторная антенна
1	Рабочий диапазон частот	$137 \pm 0,1$ МГц	$150 \pm 1,92$ МГц	$400 \pm 5,12$ МГц
2	КСВ в диапазоне рабочих частот	не более 1,4	не более 2,0	не более 2,0
3	ДН	Преимущественно в направлении $\pm 45^\circ$ от надира и 360° по азимуту	Преимущественно в направлении $\pm 45^\circ$ от надира (ось «-Z» КА) и с нулевым провалом в направлении «-Z»	Преимущественно в направлении $\pm 45^\circ$ от надира (ось «-Z» КА)
4	КУ	2,0 дБ в направлении оси «-Z» КА и не менее 1,0 дБ в конусе рабочих углов $\pm 60^\circ$ относительно оси «-Z»	КУ не менее -3,5 дБ с неравномерностью не более 6 дБ в конусе рабочих углов $\pm 45^\circ$ от надира и 360° по азимуту	КУ не менее -3,5 дБ с неравномерностью не более 6 дБ в конусе рабочих углов $\pm 45^\circ$ от надира и 360° по азимуту
5	Поляризация	Эллиптическая, правого направления вращения	Линейная	Линейная
6	Выходная мощность передатчика	не более 20 Вт	не более 1,0 Вт	не более 1,0 Вт
7	Рабочий диапазон температур	от минус 50°C до плюс 80°C		
8	Масса	1,64 кг	0,26 кг	0,5 кг
9	Габариты	1031×96×96 мм	366×25×25 мм	346×244×35 мм

Общий вид антенной системы КА «Ионосфера» представлен на рисунке 2.13.

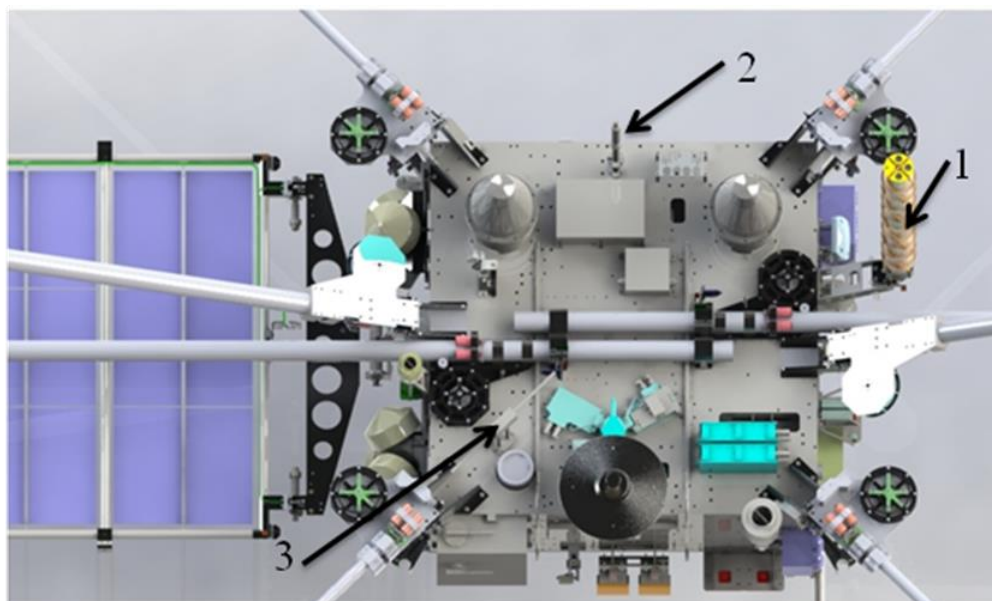


Рисунок 2.13 – Объёмная модель малого КА «Ионосфера» № 1, № 2:

1 – спиральная антенна, 2 – штыревая антенна, 3 – вибраторная антенна

Таким образом, для КА «Ионосфера» №1, № 2 УКВ антенная система сформирована из рассмотренных выше антенн.

2.5 Основные соотношения построения МПА

Учитывая конфигурацию малого КА «Ионосфера» (см. рис. 2.13), определим структуру МПА.

Как уже отмечено (см. 1.2.2.3), МПА, как правило, состоят из излучателя, расположенного на диэлектрическом слое с проводящей подложкой. В связи с этим необходимо при разработке устройства определить форму излучателя, конфигурацию подстилающей диэлектрической структуры, тип используемого СВЧ-диэлектрика, а также геометрические размеры МПА. На рисунке 2.14 представлены существующие варианты излучателей [44].

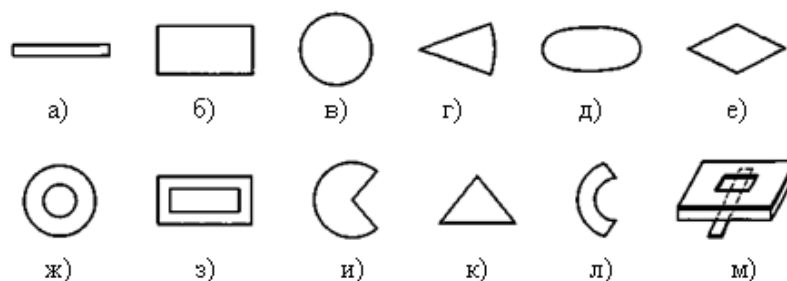


Рисунок 2.14 – Элементарные микрополосковые излучатели: а), б) прямоугольные; в) круглые; г), и) секторные; д) эллиптический; е) ромбовидные; ж) кольцевые; з) полый прямоугольник; к) треугольный; л) в виде части кольца; м) щелевой

На рисунке 2.15 представлены возможные варианты подстилающей поверхности [44], на котором 1 – излучатель, 2 – диэлектрическое основание, 3 – экран.

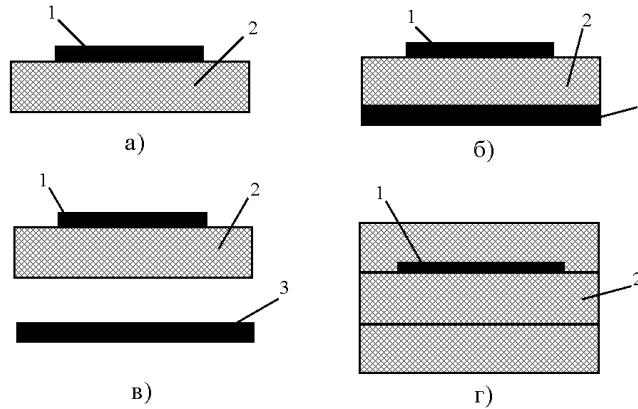


Рисунок 2.15 – Виды подстилающей диэлектрической структуры: а) диэлектрическая пластина, б) диэлектрическая экранированная подложка, в) экранированная подвешенная подложка, г) многослойная структура

Учитывая общую компоновку КА «Ионосфера», а именно прямоугольную форму самого спутника, предложена прямоугольная форма излучателя МПА и диэлектрическая экранированная подложка в качестве подстилающей поверхности.

Предложенный вариант подстилающей поверхности и формы излучателя позволят обеспечить простую конструкцию антенны, и в тоже время надёжную и легко устанавливаемую на поверхности КА «Ионосфера». В качестве экрана используется также поверхность самого КА.

После выбора формы излучателя и подстилающей диэлектрической поверхности, необходимо оценить геометрические параметры разрабатываемой бортовой МПА, используя следующие соотношения [47].

Ширина излучателя w определяется по следующей формуле:

$$w = \frac{c}{2f_p} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon + 1}}, \quad (2.3)$$

где c – скорость света; f_p – резонансная частота излучения; ε – диэлектрическая проницаемость подложки.

Длина излучателя L определяется по следующей формуле:

$$L = \frac{c}{2f_p \sqrt{\varepsilon_{эфф}}}, \quad (2.4)$$

где $\varepsilon_{эфф}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость.

Эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{эфф}$ определяется по следующей формуле:

$$2\varepsilon_{эфф} = \varepsilon + 1 + (\varepsilon - 1)\left(1 + 10\frac{h}{w}\right)^{-1/2}, \quad (2.5)$$

где h – толщина подложки.

При выборе толщины подложки h нужно исходить из предъявляемых требований к бортовым АФУ по электрическим и механическим параметрам [51].

2.6 Особенности построения УКВ МПА

При разработке МПА сантиметрового диапазона волн ($0,1 \text{ м} < \lambda < 0,03 \text{ м}$), габариты таких антенн приемлемы для их применения в качестве бортовых антенн КА (примерно от $0,03 \text{ м}$ до $0,015 \text{ м}$ при построении МПА квадратной формы), в виду того, что используемые рабочие частоты достаточно высоки, а влияние используемого диэлектрика с любым значением диэлектрической проницаемости ε на габариты антенн минимально (см. 2.6).

Однако, при разработке МПА в метровом и дециметровом диапазонах волн получаемые габариты антенн не приемлемы, например (примерно от $0,4$ до $0,6 \text{ м}$ при построении МПА квадратной формы). Данный факт приводит к отказу от применения МПА указанных диапазонов волн в качестве бортовых антенн малых КА в виду того, что, как правило, поверхность малого КА, на которой возможно размещение бортовых АФУ и всей целевой аппаратуры, составляет площадь не более в 1 м^2 ($1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$), а в некоторых случаях и меньше.

Поэтому использование МПА метрового и дециметрового диапазонов волн с такими габаритами не приемлемо для их применения в качестве бортовых антенн малых КА.

Таким образом, необходимо рассмотреть возможные способы миниатюризации МПА дециметрового и метрового диапазонов для применения таких антенн в качестве бортовых антенн малых КА.

2.6.1 Способы миниатюризация УКВ МПА

Рассмотрим возможные способы миниатюризации УКВ МПА.

В работе [90] описан способ укорочения антенн за счёт увеличения диэлектрической проницаемости подложки. А в [91] описан способ укорочения антенн за счёт увеличения толщины h и значения коэффициента диэлектрической проницаемости ε материала подложки.

Недостатком данных способов является то, что с увеличением значения диэлектрической проницаемости подложки растёт добротность антенны, а, следовательно, сужается полоса рабочих частот. А увеличение толщины антенны несёт за собой конструктивные сложности размещения на поверхности КА и увеличение массогабаритных показателей.

В работе [92] рассмотрены другие варианты миниатюризации:

- использование многосвязных структур;

- формирование в металлизации антенного элемента вырезов (щелей).

Недостатками приведённых способов являются усложнение конструктива антенны и сложность её изготовления.

Ещё один способ, использующий продольную свёртку топологии антенны для миниатюризации габаритов, описан в работе [93].

Недостатком данного способа является сложность исполнения антенны на практике.

Известен способ создания миниатюрной антенны за счет использования многослойной структуры подложки [94]. В данном способе для уменьшения габаритов МПА предлагается применение не менее трёх слоев диэлектрической подложки, причем все слои должны быть согласованы по волновому сопротивлению. Общая толщина слоев должна быть равной четверти длины волны излучения, а каждый слой выполнен с уменьшающимся от плоскости экрана к плоскости излучателя волновым сопротивлением. Этот способ обеспечивает работу антенны в широком диапазоне частот при габаритных размерах, меньших длины волны.

Недостатком данного способа является его сложность применения из-за многослойности структуры подложки, необходимости согласования волнового сопротивления между слоями, сложностью изготовления.

2.6.2 Вариант миниатюризации УКВ МПА

Из представленных формул (2.3) и (2.4), видно, что на габариты МПА влияют два параметра:

- рабочая (резонансная) частота антенны;
- диэлектрическая проницаемость подложки.

В нашем случае рабочая частота задана, поэтому для изменения габаритов МПА можно использовать изменение значения диэлектрической проницаемости подложки.

В настоящий момент существует широкая линейка материалов, которые можно использовать в качестве материала подложки МПА. Значение ϵ в пределах от 2,8 до 32.

Однако необходимо учитывать, что значительное увеличение значения диэлектрической проницаемости материала подложки значительно повышает концентрацию электрического поля ближней зоны антенны, что приводит к низкой интенсивности излучения из-за большого реактивного поля и узкой полосы пропускания, а это является существенным недостатком. Целесообразно использовать оптимальный диапазон значений ϵ от 8 до 16. Также необходимо учитывать тот факт, что немаловажную роль играет такой параметр материала подложки как тангенс угла диэлектрических потерь $tg \delta$. Этот параметр влияет на КПД антенны и его оптимальное значение должно находиться в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-5} .

Таким образом, учитывая выше сказанное, в качестве материала подложки МПА метрового диапазона целесообразно использовать металлизированный диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε в пределах от 8 до 16 и тангенсом угла диэлектрических потерь $tg \delta$ от 10^{-3} до 10^{-5} .

При выборе толщины диэлектрика h нужно исходить из предъявляемых требований по электрическим и механическим параметрам к бортовым АФУ КА. В данном случае оптимально использовать толщину антенны h в пределах $(0,1-0,01) \lambda$, где λ — длина рабочей волны.

Для миниатюризации МПА дециметрового диапазона предложен вариант с применением материала диэлектрической подложки с оптимальными характеристиками (диэлектрической проницаемостью ε от 8 до 16) и тангенсом угла диэлектрических потерь $tg \delta$ от 10^{-3} до 10^{-5}), а также толщину диэлектрика h в пределах $(0,1 - 0,01) \lambda$.

Предложенный способ позволяет уменьшить габариты МПА дециметрового диапазона в тоже время, не усложняя её конструкцию.

Однако данный способ не обеспечивает существенную миниатюризацию МПА метрового диапазона.

Для удобства анализа перепишем формулы (2.3) и (2.4), используя соотношение $c = \lambda \times f$ (где λ — длина волны):

$$w = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2}{(\varepsilon + 1)}}, \quad (2.6)$$

$$L = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}, \quad (2.7)$$

Из полученных выражений видно, что применение полуволновых МПА метрового диапазона не приемлемо в качестве бортовых антенн малых КА из-за полученных габаритов.

Предложен вариант изменения конструкции МПА за счёт введения закорачивающего элемента. На рисунке 2.16 приведены варианты построения закороченных МПА [95].

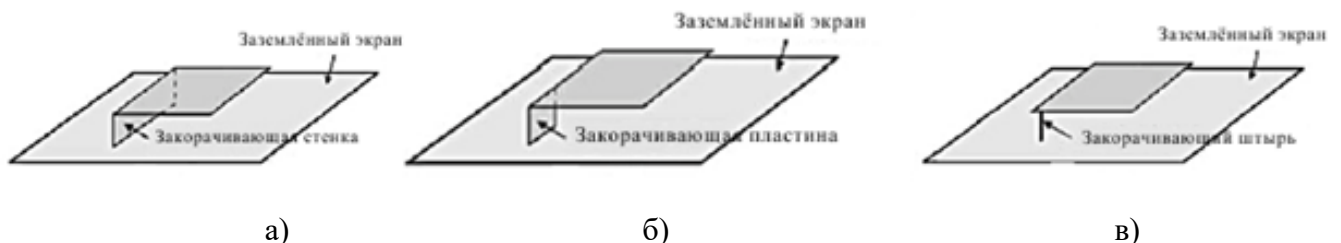


Рисунок 2.16 – Варианты построения закороченных МПА: а) с помощью закорачивающей стенки; б) с помощью закорачивающей пластины; в) с помощью закорачивающего штыря

Предложен вариант построения закороченной антенны с закорачивающей стенкой. Данный вариант наиболее простой, надёжный и не ухудшает прочность конструкции антенны.

Предложенный вариант построения МПА позволяет разрабатывать четвертьволновые МПА метрового диапазона. Как известно [61], четвертьволновые антенны имеют меньшие габариты по сравнению с полуволновыми антеннами.

Учитывая вариант построения закороченных микрополосковых антенн, формулы (2.6) и (2.7) преобразуются:

$$\omega \approx \frac{c}{4f_p} \sqrt{\frac{2}{(\varepsilon + 1)}}, \quad (2.8)$$

$$L \approx \frac{c}{4f_p \sqrt{\varepsilon_{эфф}}}, \quad (2.9)$$

Т.е. при сравнении формул (2.8) и (2.9) с формулами (2.6) и (2.7) очевидно, что линейные размеры закороченной четвертьволновой МПА примерно в 2–2,5 раза меньше, чем у полуволновой МПА

Таким образом, предложен способ миниатюризации МПА метрового диапазона, который заключается в создании четвертьволновой МПА, а в качестве материала подложки используется металлизированный диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε в пределах от 8 до 16 и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ от 10^{-3} до 10^{-5} [96].

Использование данного способа миниатюризации позволяет разрабатывать МПА с габаритами от 0,18 м до 1,1 м, а также обеспечит высокие показатели по энергетическим параметрам антенны (КСВ, ДН, КУ, КПД и т.д.). В свою очередь, данный способ применим и для миниатюризации МПА дециметрового диапазона.

2.7 Выбор диэлектрика подложки при построении миниатюрных УКВ МПА

Для выбора оптимального диэлектрика для использования в качестве материала подложки был проведен анализ существующих диэлектриков. На сегодняшний день представлена достаточно широкая линейка СВЧ диэлектриков, которые можно использовать в качестве подложки МПА [97–101]. Рассмотрим наиболее применяемые материалы в антенной технике.

Фольгированный арилокс листовой наполненный (ФЛАН) представляет собой листовой высокочастотный материал, изготовленный из композиции на основе наполненного полифениленоксида, облицованного с двух сторон электролитической гальваностойкой медной фольгой толщиной 18 или 35 мкм (ТУ 16-503.148-75). Основные параметры данного материала приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9. Основные характеристики ФЛАН

Характеристика материала	Обозначение материала					
	ФЛАН-2,8	ФЛАН-3,8	ФЛАН-5,0	ФЛАН-7,2	ФЛАН-10	ФЛАН-16
Диэлектрическая проницаемость ϵ	2,8±0,1	3,8±0,1	5,0±0,2	7,2±0,3	10±0,5	16±0,8
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Плотность без фольги, г/см ³	1,2±0,1	1,8±0,1	1,55±0,1	1,85±0,1	2,1±0,1	2,6±0,1

Брикор представляет собой листовой композиционный материал, изготовленный из композиции на основе арилокса, облицованного с обеих сторон медной электротехнической фольгой толщиной 0,035 мм (ГОСТ 21000-81). Основные параметры данного материала сведены в таблицу 2.10.

Таблица 2.10. Основные характеристики брикора

Характеристика материала	Обозначение материала	
	Брикор АА-2,0	Брикор АА-2,2
Диэлектрическая проницаемость ϵ	2,0 ± 0,1	2,2 ± 0,1
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$	0,0050	0,0050
Плотность без фольги, г/см ³	0,7 ± 0,05	0,82 ± 0,05

ФАФ-4Д представляет собой листовой материал, изготавливаемый на основе слоев лакоткани Ф-4Д-Э01-А первого сорта облицованных медной электролитической гальваностойкой фольгой (ГОСТ 21000-81). Основные параметры ФАФ-4Д приведены ниже:

- диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2,8 \pm 0,2$;
- тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,002$.

Материал марки *СФВЧ* представляет собой высокочастотный армированный ламинат с малыми потерями, предназначенный для изготовления двухсторонних, многослойных печатных плат и печатных плат со смешанными диэлектриками. Основные свойства СФВЧ перечислены ниже:

- диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3,87$;
- тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,0061$.

В полосковых линиях передач в качестве подложек используют диэлектрик на основе оксида алюминия – *поликор*, основные свойства которого приведены далее:

- диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 9,7 \pm 0,25$;
- тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 10^{-4}$.

Стеклотекстолит фольгированный (СФ) представляет собой листы, изготовленные на основе стеклотканей, пропитанных связующим на основе эпоксидных смол и облицованные с одной или двух сторон медной электролитической гальваностойкой фольгой толщиной 35 мкм (ГОСТ 10316-78). СФ имеет высокие механические и электроизоляционные свойства, хорошо поддается механической обработке резкой, сверлением, штамповкой.

Стеклотекстолит нагревостойкий фольгированный (СФН) представляет собой слоистый прессованный материал, облицованный с одной или двух сторон медной электролитической фольгой толщиной 18 или 35 мкм (ГОСТ 10316-78). СФН имеет высокие механические и электроизоляционные свойства, хорошо поддается механической обработке резкой, сверлением, штамповкой.

Стеклотекстолит фольгированный (СОНФ-У) имеет улучшенные диэлектрические показатели, повышенную устойчивость к воздействиям расплавленного припоя, хорошую штампуемость (ТУ 16-90 И79.0102.002ТУ). Благодаря использованию бромсодержащих добавок, стеклотекстолит СОНФ-У относится к классу негорючих пластиков. СОНФ-У предназначается для производства практически любой радиоаппаратуры.

Основные характеристики материалов СФ, СФН и СОНФ-У сведены в таблицу 2.11.

Таблица 2.11. Основные свойства СФ, СФН и СОНФ-У

Характеристика материала	Обозначение материала		
	СФ	СФН	СОНФ-У
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$	0,035	0,035	0,025
Диэлектрическая проницаемость ϵ	5,5	5,5	5,4
Прочность на отслаивание фольги (на ширину полоски 3 мм) h , не менее	4,5	4,5	4,6
Время устойчивости к воздействию теплового удара при температуре $260\pm 5^\circ\text{C}$, с, не менее	20	20	60

Помимо традиционных диэлектриков существует класс «искусственных диэлектриков» — метаматериалы.

В 1967 г. российский физик В.Г. Веселаго теоретически исследовал базовые свойства сред с отрицательными значениями ϵ и μ , назвав их левосторонними в отличие от традиционных — правосторонних [102]. Их практическая реализация началась с 1996 г. в работе Дж. Пендри с соавторами [103], а исследование их характеристик продолжается до сегодняшнего дня [104, 105].

В антенной технике применение нашли следующие типы метаматериалов:

- дважды отрицательные материалы (левовинтовые) (double negative materials (lefthanded));

- материалы с электронной запрещённой зоной (Elektromagnetic Bandgap Structure), представляющие собой периодические структуры, которые препятствуют распространению электромагнитных волн в определённом направлении (поверхностные волны);
- искусственные комплексные земляные плоскости, обеспечивающие заданную фазу отражения электромагнитной волны;
- частотно-селективные поверхности (Frequency Selective Surface).

По способу исполнения антенны на основе метаматериалов можно разделить на следующие категории:

- окружённые метаматериалом;
- расположенные под слоем метаматериала (с покрытием в виде метаматериала);
- расположенные над слоем метаматериала;
- выполненные на подложке из метаматериала (печатные);
- выполненные непосредственно из метаматериала.

Возможен вариант применения различных типов метаматериалов в структуре одной антенны.

Проведенный анализ работ, в которых представлены используемые материалы в качестве подложки, показал следующее.

Активное применение нашел СВЧ диэлектрик ФЛАН, причем с использованием всего набора различных значений диэлектрической проницаемости от 2,8 до 10. Данный факт подтверждается целым рядом работ, в которых был использован этот диэлектрик [106–111].

Диэлектрик марки ФАФ-4Д с $\epsilon = 2,5$ также достаточно широко применяется на практике, например [112].

В ряде работ встречается упоминание о таких диэлектриках как FR-4 [113, 114], Rogers [115–118].

Применение нашел и поликор [119].

В работе [120] представлена двухслойная микрополосковая решетка, у которой одна подложка обладает значением $\epsilon = 2,8$, а другая с $\epsilon = 3,38$, а в работе [121] использованы диэлектрики с $\epsilon=4,5$ и $\epsilon=1,05$.

В работе [122] широко представлены антенны с применением метаматериалов в качестве материала подложек.

Во всех указанных выше работах авторам (разработчикам) удалось достичь поставленных задач с применением разных типов диэлектриков.

Применительно к решаемой задаче в данной работе, при выборе материала подложки необходимо учитывать следующие.

Так как МПА будет работать в условиях космоса, то необходимо при выборе диэлектрического материала учитывать влияние космического излучения, а именно:

- ионизирующего излучения, которое состоит из первичного излучения, поступающего из космического пространства, и вторичного излучения, возникающего в результате взаимодействия первичного излучения с атмосферой Земли [70];
- больших перепад температур, которым подвергается КА, а, следовательно, вся бортовая аппаратура, при движении в космосе по заданной траектории;
- нагрузки при старте и движении РН до выхода на заданную рабочую высоту, при движении аппарата по заданной орбите и отделения КА от РН (вибрации и удары).

Материал подложки должен обладать высокой механической прочностью, устойчивостью к температурному воздействию, радиационной стойкостью и т.д., что в свою очередь обеспечивает стабильность энергетических параметров антенны, а, следовательно, её работоспособность во время всего САС КА.

Проанализировав выше приведённые результаты по обзору применяемых и существующих в настоящий момент диэлектриков и предъявляемые требования к используемому материалу бортовых антенн малых КА, следует, что для решения задачи по построению миниатюрных МПА в УКВ диапазоне предложено применение в качестве диэлектрика материал ФЛАН [123].

ФЛАН обладает следующими важными свойствами [124]:

- большим диапазоном значений диэлектрической проницаемости ϵ (от 2,8 до 16);
- низким значением тангенса диэлектрических потерь $tg\delta$ (0,0015);
- высокой механической прочностью;
- высокая температуростойкость;
- радиоационностойкий и т.д.

Таким образом, при построении миниатюрных бортовых УКВ МПА предложен вариант применения ФЛАН в качестве материала диэлектрика антенны.

2.8 Выводы по главе 2

1. Рассмотрены условия работы бортовых антенн КА, а именно механическое, температурное и воздействие космического пространства.
2. Определены требования к конструкции бортовых антенн малых КА, а также к применяемым материалам бортовых антенн малых КА с учётом механического, температурного и воздействия космического пространства.
3. Предложен вариант построения малогабаритной, невыступающей антенной системы малых КА с помощью МПА.
4. Проведён обзор существующих способов построения миниатюрных УКВ МПА.
5. Предложен вариант миниатюризации УКВ МПА, позволяющий уменьшить габариты антенны в 2–2,5 раза по сравнению с существующими аналогами при сохранении приемлемых показателей по энергетическим параметрам (КСВ, ДН, КУ).
6. Проведён обзор применяемых в настоящее время материалов в качестве диэлектрика подложки МПА.
7. Предложено применение ФЛАН в качестве материала диэлектрика для построения миниатюрных бортовых УКВ МПА малых КА.

Глава 3. Методика приближённого расчёта характеристик направленности бортовых микрополосковых антенн малых КА

Как известно, корпус КА, как и его составные части (откидные элементы конструкции, бортовая целевая аппаратура, солнечные батареи, гравитационные штанги и т.д.), в случае слабонаправленных антенны, а в ряде случаев и остронаправленных антенн, активно участвуют в процессе формирования излучённого поля. Следовательно, оказывают заметное влияние, как на входное сопротивление антенны, так и на её направленные свойства. Поэтому необходимо учитывать влияние самого КА на характеристики антенн при их разработке.

Поскольку при заданных габаритно-массовых требованиях масса и место, отводимое для АФУ, весьма ограничены, неизбежно возникают трудности с размещением антенн так, чтобы их электродинамическое взаимодействие друг с другом и с участками поверхности объекта, на котором они расположены, были минимальным. Таким образом, данная задача является актуальной для бортовых АФУ КА [125].

3.1 Общая характеристика приближённых методов

В настоящее время существуют различные методы расчёта характеристик направленности бортовых антенн КА [126–131].

Из рассмотренных выше методов следует, что необходимо точное определение поля излучения антенны, а, следовательно, и расчёт её характеристик требует решения электродинамической задачи. Данная задача заключается в том, что граничным условием является равенство нулю касательной составляющей электрического поля ввиду того, что обычно корпус КА изготавливается из хорошо проводящего металла и при решении проводимость металла можно считать равной бесконечности ($\sigma = \infty$).

На практике, в большинстве своём случаев, данная электродинамическая задача не может быть решена. Это объясняется тем, что:

- поверхность КА, как правило, обладает сложной геометрической формой и часто не совпадает по форме с координатными поверхностями ни одной из трёх систем координат, в которых известно решение электродинамической задачи;
- на поверхности КА расположено большое количество бортовой целевой аппаратуры различной формы и конфигурации, наличие которой также усложняет решение электродинамической задачи.

Поэтому порой часто оказывается достаточным приближённое (упрощённое) определение электрических параметров антенны. Например, на раннем этапе проектирования антенной системы КА при выборе типа применяемой антенны и её месторасположения на поверхности

КА, важно иметь ориентировочные данные об ожидаемых электрических параметрах бортовой антенны.

Приближённо определить электрические параметры антенн можно опытным или расчётным методами.

Расчётный метод основан на том, что корпус КА может быть с достаточным приближением аппроксимирован поверхностью правильной геометрической формы. Такая замена имеет смысл лишь в том случае, когда для аппроксимирующей поверхности известно решение соответствующей граничной задачи электродинамики.

На выбор аппроксимирующей поверхности могут оказать влияние следующие факторы:

- геометрическая форма корпуса КА;
- расположение излучателя на корпусе КА;
- относительные (в длинах волн) размеры той части корпуса, на которой расположен излучатель;
- сектор углов, в котором определяется поле излучения;
- тип излучателя, его относительные размеры и распределение тока на нём.

3.2 Приближённая методика расчёта характеристик направленности бортовой микрополосковых антенн малых КА

Для определения направленных свойств антенной системы необходимо определить влияние проводящей поверхности КА на поле, излучаемое бортовой антенной на поверхности носителя. Можно далее определить зависимости характеристик направленности источника от расстояния между источником и вершиной. При размещении источника на достаточно большом расстоянии от вершины, для которого выполняется условие $R \gg \lambda$, результаты решения дифракционной задачи будут близки к дифракции электромагнитной волны, излучаемой диполем на плоской проводящей поверхности. Кроме того, при большом радиусе кривизны излучение происходит только в полупространстве. Если источник находится вблизи вершины и радиус, на котором происходит дифракция, мал по сравнению с длиной волны, то излучение происходит во всем пространстве.

Учитывая соотношения между размерами КА и излучателя, можно излучатель считать элементарным. Электромагнитное поле, возбуждаемое элементарным излучателем на сферической поверхности должно удовлетворять уравнениям Максвелла, учитывающим ток стороннего источника вблизи источника:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = j\omega \varepsilon \vec{E} + \vec{J}^{\text{э}} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} - \vec{J}^{\text{м}} \end{cases}, \quad (3.1)$$

и однородным уравнениям Максвелла, на достаточном удалении от источника:

$$\begin{cases} \text{rot}\vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} \\ \text{rot}\vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \end{cases} \quad (3.2)$$

Полученное решение должно также удовлетворять граничным условиям на проводящей поверхности сферы:

$$\begin{cases} \vec{E}_t = 0 \\ \vec{H}_n = 0 \end{cases}$$

где \vec{E}_t - касательная составляющая вектора напряжённости электрического поля, \vec{H}_n - нормальная составляющая вектора напряжённости магнитного поля.

Решение также должно удовлетворять условиям излучения. Рассмотрим электромагнитные волны, распространяющиеся при свободных колебаниях проводящей сферы. Для этого введём сферическую систему координат, так, чтобы поверхность $\theta=\gamma$ совпадала с центром сферы, как показано на рисунке 3.1.

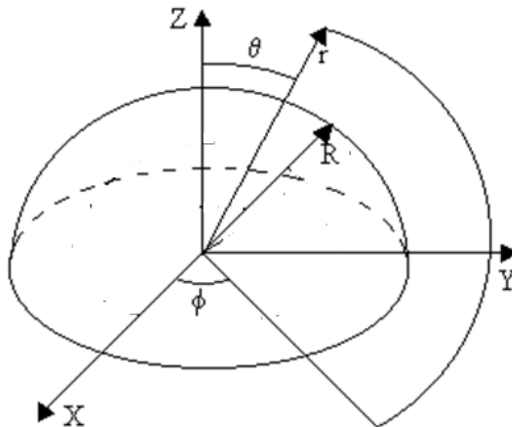


Рисунок 3.1 – Проводящая сфера в сферической системе координат

Электромагнитное поле распределено в пространстве:

$$0 < \theta < \gamma \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi$$

При исследовании электромагнитного поля сферы следует считать, что угол $\gamma < \frac{\pi}{2}$. При

$\gamma = \frac{\pi}{2}$ приходим к простому случаю распространения электромагнитных волн в

полупространстве, ограниченном плоскостью $\theta = \gamma = \frac{\pi}{2}$.

При отсутствии источников уравнения (2) преобразуются в однородные волновые уравнения:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad (3.3)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0, \quad (3.4)$$

где $k = \omega^2 \varepsilon \mu$ - волновое число.

Очевидно, что свободные колебания сферы удобно анализировать в сферической системе координат:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta E_\phi) - \frac{\partial}{\partial \phi} (E_\theta) &= -j\omega\mu r \sin \theta H_r \\ \frac{\partial E_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} (r \sin \theta E_\phi) &= -j\omega\mu r \sin \theta H_\theta \\ \frac{\partial}{\partial r} (r E_\theta) - \frac{\partial E_r}{\partial \theta} &= -j\omega\mu r H_\phi \\ \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta H_\phi) - \frac{\partial H_\theta}{\partial \phi} &= j\omega\varepsilon \sin \theta E_r \\ \frac{\partial H_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} (r \sin \theta H_\phi) &= j\omega\varepsilon \sin \theta E_\theta \\ \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} &= j\omega\varepsilon E_\phi. \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Уравнение (3.3) принимает вид:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\cos \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) E_r - \\ &- \frac{2}{r^2} E_r - \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta E_\theta) - \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} (E_\phi) + k^2 E_r = 0 \\ &\left(\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\cos \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) E_\theta - \\ &- \frac{E_\theta}{r^2 \sin^2 \theta} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial E_r}{\partial \theta} - \frac{2 \cos \theta}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} (E_\phi) + k^2 E_\theta = 0 \\ &\left(\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\cos \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) E_\phi - \\ &- \frac{E_\phi}{r^2 \sin^2 \theta} + \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial E_r}{\partial \phi} + \frac{2 \cos \theta}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} (E_\theta) + k^2 E_\phi = 0. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Аналогично записываются выражения для компонент вектора напряжённости магнитного поля (3.4). Компоненты электромагнитного поля определяются интегрированием волновых уравнений (3.3), (3.4).

В [127] показано, что однородные уравнения Максвелла (3.2) допускают решения в виде электрических и магнитных волн, причём все шесть компонент поля $E_r, E_\theta, E_\phi, H_r, H_\theta, H_\phi$, входящие в эти уравнения, можно выразить через вспомогательные функции U и V , удовлетворяющие волновому уравнению (или уравнению, приводящему к волновому). Как известно [132, 133], соотношения, связывающие компоненты поля со вспомогательной функцией будут легко разрешимы, если выполняются условия Бромвича, т.е. коэффициент Ламе компоненты разделения волн на электрические и магнитные должен быть $h = 1$. Поэтому для сферической системы координат в качестве компоненты разделения можно выбрать продольную (угломестную) компоненту, используя замену переменной [133], чтобы удовлетворить условию Бромвича, но удобнее выбрать радиальную компоненту без замены переменной.

Таким образом, электрические волны имеют только электрическую радиальную компоненту, а магнитные – только магнитную радиальную компоненту. Рассмотрим поле электрических волн, примем $H_r = 0$. Тогда система уравнений (3.5) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta E_\phi) - \frac{\partial}{\partial \phi} (E_\theta) &= 0 \\ \frac{\partial E_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} (r \sin \theta E_\phi) &= -j\omega\mu r \sin \theta H_\theta \\ \frac{\partial}{\partial r} (r E_\theta) - \frac{\partial E_r}{\partial \theta} &= -j\omega\mu r H_\phi \\ \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta H_\phi) - \frac{\partial H_\theta}{\partial \phi} &= j\omega\epsilon \sin \theta E_r \\ -\frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) &= j\omega\epsilon E_\theta \\ \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) &= j\omega\epsilon E_\phi \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Из равенства нулю радиальной компоненты напряжённости магнитного поля следует соотношение:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta E_\phi) = \frac{\partial E_\theta}{\partial \phi}. \quad (3.8)$$

Используя алгоритм [129] для решения системы уравнений (3.7) удобно ввести вспомогательную функцию U . В соотношении (3.8) составляющие E_θ и E_ϕ можно выразить через вспомогательную функцию U :

$$\begin{aligned} E_\phi &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U'}{\partial \phi} \\ E_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial U'}{\partial \theta}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

где $U' = \frac{\partial U}{\partial r}$

$$\begin{aligned} E_\phi &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi \partial r} \\ E_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta \partial r}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Подставляя (3.10) в систему уравнений (3.7), можно выразить компоненты H_ϕ и H_θ :

$$\begin{aligned} H_\phi &= -\frac{j\omega\varepsilon}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \\ H_\theta &= \frac{j\omega\varepsilon}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \phi}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Подставив выражения (3.10) и (3.11) в третье уравнение системы (3.7), получаем выражение для радиальной составляющей вектора напряжённости электрического поля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 U}{\partial \theta \partial r^2} - \frac{\partial E_r}{\partial \theta} &= -\frac{k^2 \partial U}{\partial \theta} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + k^2 U &= E_r. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Вспомогательную функцию U можно получить, выразив компоненты поля через U в четвёртом уравнении системы (3.7):

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} = -r^2 \sin \theta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + k^2 U \right),$$

и придать вид:

$$\frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial^2 U}{(r \sin \theta)^2 \partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + k^2 U = 0. \quad (3.13)$$

Аналогично можно рассмотреть поле магнитных волн. Примем $E_r = 0$. Тогда система уравнений (3.5) примет вид:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta E_{\phi} \right) - \frac{\partial}{\partial \phi} \left(E_{\theta} \right) &= -j \omega \mu r \sin \theta H_r \\
\frac{\partial}{\partial r} \left(r \sin \theta E_{\phi} \right) &= j \omega \mu r \sin \theta H_{\theta} \\
\frac{\partial}{\partial r} \left(r E_{\theta} \right) &= -j \omega \mu r H_{\phi} \\
\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta H_{\phi} \right) &= \frac{\partial H_{\theta}}{\partial \phi} \\
\frac{\partial H_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} \left(r \sin \theta H_{\phi} \right) &= j \omega \varepsilon r \sin \theta E_{\theta} \\
\frac{\partial}{\partial r} \left(r H_{\theta} \right) - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} &= j \omega \varepsilon r E_{\phi}.
\end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Из равенства нулю радиальной компоненты напряжённости электрического поля следует соотношение:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta H_{\phi} \right) = \frac{\partial H_{\theta}}{\partial \phi}. \quad (3.15)$$

Используя алгоритм [129] для решения системы уравнений (3.14) удобно ввести вспомогательную функцию V . В соотношении (3.15) составляющие H_{θ} и H_{ϕ} можно выразить через вспомогательную функцию V :

$$\begin{aligned}
H_{\phi} &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V'}{\partial \phi} \\
H_{\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial V'}{\partial \theta},
\end{aligned} \quad (3.16)$$

где $V' = \frac{\partial V}{\partial r}$

$$\begin{aligned}
H_{\phi} &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi \partial r} \\
H_{\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta \partial r}.
\end{aligned} \quad (3.17)$$

Подставляя (3.17) в систему уравнений (3.14), можно выразить компоненты E_{ϕ} и E_{θ} :

$$\begin{aligned}
E_{\phi} &= \frac{j \omega \mu}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \\
E_{\theta} &= -\frac{j \omega \mu}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi}.
\end{aligned} \quad (3.18)$$

Подставив выражения (3.17) и (3.18) в шестое уравнение системы (3.14), получаем выражение для радиальной составляющей вектора напряжённости магнитного поля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 V}{\partial \theta \partial r^2} - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} &= -\frac{k^2 \partial V}{\partial \theta} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + k^2 V &= H_r. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Вспомогательную функцию V можно получить, выразив компоненты поля через V в первом уравнении системы (3.14):

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = -r^2 \sin \theta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + k^2 V \right),$$

и придать вид:

$$\frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial^2 V}{(r \sin \theta)^2 \partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} V + k^2 V = 0. \quad (3.20)$$

Функция U однозначно определяет электромагнитное поле электрического типа, а функция V – магнитного типа:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + k^2 U &= E_r \\ E_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta \partial r} \\ E_\phi &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi \partial r} \\ H_r &= 0 \\ H_\theta &= \frac{j\omega \varepsilon}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \phi} \\ H_\phi &= -\frac{j\omega \varepsilon}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \end{aligned} \right\} (3.21a)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + k^2 V &= H_r \\ H_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta \partial r} \\ H_\phi &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi \partial r} \\ E_r &= 0 \\ E_\theta &= -\frac{j\omega \mu}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \\ E_\phi &= \frac{j\omega \mu}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \end{aligned} \right\} (3.21b)$$

Проведём интегрирование уравнения (3.13) методом Фурье, а интеграл уравнения представим в виде произведения трёх сомножителей:

$$U = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\phi)$$

Подставив это выражение в уравнение (3.7) и разделив на $R(r)\Theta(\theta)\Phi(\phi)$, получаем уравнение в полных производных:

$$\frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta(\theta)}{d\theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{1}{\Phi(\phi)} \frac{d^2 \Phi(\phi)}{d\phi^2} + \frac{1}{R(r)} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} = -k^2. \quad (3.22)$$

Так как в уравнении (3.22) сумма трёх функций независимых переменных равна постоянной величине, то его можно разбить на три уравнения аналогично [134]. Умножаем уравнение (3.22) на $r^2 \sin^2 \theta$:

$$\sin \theta \frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta(\theta)}{d\theta} \right) + \frac{1}{\Phi(\phi)} \frac{d^2 \Phi(\phi)}{d\phi^2} + \frac{r^2 \sin^2 \theta}{R(r)} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + k^2 r^2 \sin^2 \theta = 0,$$

и приравниваем полученное выражение постоянной величине m^2 :

$$\sin \theta \frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta(\theta)}{d\theta} \right) + \frac{r^2 \sin^2 \theta}{R(r)} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + k^2 r^2 \sin^2 \theta = -\frac{1}{\Phi(\phi)} \frac{d^2 \Phi(\phi)}{d\phi^2} = m^2.$$

В результате получаются два уравнения:

$$\frac{d^2 \Phi(\phi)}{d\phi^2} + m^2 \Phi(\phi) = 0, \quad (3.24)$$

$$\sin \theta \frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta(\theta)}{d\theta} \right) + \frac{r^2 \sin^2 \theta}{R(r)} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + k^2 r^2 \sin^2 \theta - m^2 = 0. \quad (3.25)$$

Интеграл уравнения (3.24) имеет вид:

$$\Phi(\phi) = A_1 \sin(m\phi) + A_2 \cos(m\phi). \quad (3.26)$$

Для определения $R(r)$ и $\Theta(\theta)$ разделим уравнение (3.25) на $\sin^2 \theta$:

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta(\theta)}{d\theta} \right) + \frac{r^2}{R(r)} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + k^2 r^2 - \frac{m^2}{\sin^2 \theta} = 0. \quad (3.27)$$

Приравниваем уравнение (3.27) к новой постоянной a^2 и разбиваем его на два уравнения аналогично (3.23):

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta(\theta)}{d\theta} \right) - \frac{m^2}{\sin^2 \theta} = -\frac{r^2}{R(r)} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} - k^2 r^2 = -a^2,$$

$$\frac{d^2 \Theta(\theta)}{d\theta^2} + \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \frac{d\Theta(\theta)}{d\theta} + \left(a^2 - \frac{m^2}{\sin^2 \theta} \right) \Theta(\theta) = 0, \quad (3.28)$$

$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \left(k^2 - \frac{a^2}{r^2} \right) R(r) = 0. \quad (3.29)$$

Уравнение (3.29) приводится заменой переменной $R(r) = \sqrt{kr} F(r)$ к уравнению цилиндрических функций (Бесселя):

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left(k^2 - \frac{4a^2 + 1}{4r^2} \right) F(r) = 0. \quad (3.30)$$

Введём новое обозначение для преобразования уравнения (3.30):

$$a^2 = \nu(\nu + 1). \quad (3.31)$$

Подставляя (3.29) в (3.30) получаем уравнение Бесселя для $F(r)$:

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left(k^2 - \frac{\left(\nu + \frac{1}{2} \right)^2}{r^2} \right) F(r) = 0. \quad (3.32)$$

Изменение поля по радиусу определяется цилиндрической функцией Бесселя, описывающей стоячую волну или цилиндрической функцией Ханкеля, определяющей волну, расходящуюся от начала координат:

$$R(r) = c_1 \sqrt{kr} J_{\left(\nu + \frac{1}{2} \right)}(kr), \quad (3.33)$$

$$R(r) = c_1 \sqrt{kr} H_{\left(\nu + \frac{1}{2} \right)}^2(kr). \quad (3.34)$$

Решение уравнения (3.32) удобно представить в виде сферических функций Бесселя или Ханкеля с помощью формул [135]:

$$j_{\nu}(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} J_{\nu + \frac{1}{2}}(x),$$

$$h_{\nu}^2(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} H_{\nu + \frac{1}{2}}^2(x).$$

При большом значении r , сферические функции могут быть заменены асимптотическими выражениями [136]:

$$j_{\nu}(x) = \frac{1}{x} \cos\left(x - \frac{\nu + 1}{2} \pi \right),$$

$$h_{\nu}^2(x) = \frac{i^{\nu + 1}}{x} e^{-ix}.$$

Подставляя асимптотические выражения в выражения (3.33) и (3.34), получаем решение уравнения (3.32) для больших значений r :

$$R(r) = c_1 \sqrt{kr} J_{\left(\nu + \frac{1}{2}\right)}(kr) \approx c_1 \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} \sin\left(kr - \frac{\nu\pi}{2}\right).$$

При большом значении аргумента, что соответствует условию данной задачи, асимптотические выражения функций Бесселя и Ханкеля с достаточной точностью описывают эти функции.

Уравнение (3.28) приводится к уравнению Лежандра заменой переменной $z = \cos\theta$ и заменой постоянной разделения (3.31):

$$\left(1 - z^2\right) \frac{d^2\Theta(z)}{dz^2} - 2z \frac{d\Theta(z)}{dz} + \left(\nu(\nu + 1) - \frac{m^2}{1 - z^2}\right) \Theta(z) = 0.$$

Если m – целое число, то решение этого уравнения можно записать в виде присоединённой функции Лежандра первого рода:

$$\Theta(\theta) = c_2 P_\nu^m(\cos\theta), \quad (3.35)$$

$$R(r) = c_1 \sqrt{kr} H_{\left(\nu + \frac{1}{2}\right)}^2(kr) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{-\left(kr - \frac{(\nu + 1)\pi}{2}\right)}.$$

где $P_\nu^m(\cos\theta)$ – присоединённая функция Лежандра первого рода, ν – степени и m – порядка, c_2 – коэффициент.

Интеграл волнового уравнения (3.22) определяется произведением решений (3.26), (3.34) и (3.35):

$$U = \left(c_1 \sqrt{kr} H_{\left(\nu + \frac{1}{2}\right)}^2(kr) \right) c_2 P_\nu^m(\cos\theta) \left(A_1 \sin(m\phi) + A_2 \cos(m\phi) \right) \quad (3.36)$$

Определение переменных (по другой терминологии постоянных) разделения должно соответствовать физическому процессу. При определении постоянной разделения по азимуту m поле должно изменяться с периодом 2π . Поэтому m принимает только целочисленные значения $m=0,1,2,3\dots$. Однако, индексы ν в общем случае не будут целыми: они определяются из граничных условий:

$$U = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 \quad \text{при} \quad \theta = \gamma.$$

Индексы для электрических волн определяются из уравнения:

$$P_\nu^m(\cos\theta) = 0.$$

Здесь через функцию $P_V^m(\cos\theta)$ обозначена присоединённая функция Лежандра, принимающая при $\theta = 0$ конечные значения. Она выражается через функцию Лежандра $P_V(\cos\theta)$, удовлетворяющую условию:

$$P_V(1) = 1.$$

Поскольку ν не является целым числом, то функция P_V не будет полиномом, поэтому уравнению $P_V^m(\cos\theta) = 0$ удовлетворяет последовательность чисел $\nu_{m1}, \nu_{m2}, \dots, \nu_{mn}$, зависящих от угла γ .

Первоначально определим общее решение, получающееся для волн типа E_{mn} и H_{mn} . Если возьмём число $\nu = \nu_{mn}$ и соответствующую функцию U , то по формуле (3.36) получим электрическую волну E_{mn} . Если возьмём число $\mu = \mu_{mn}$ и соответствующую функцию V , то получим магнитную волну H_{mn} .

Компоненты поля типа E определяются из уравнений (3.21a). Для записи компонент векторов электрического и магнитного поля удобно принять обозначения $A_{mn} = c_1 c_2 A_1$ $B_{mn} = c_1 c_2 A_2$:

$$E_{\phi, mn} = \frac{A_{mn} m(\cos(m\phi))}{r \sin \theta} \frac{d}{dr} \left[\sqrt{kr} H^2_{\nu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \left(P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) \right) - \right. \\ \left. - \frac{B_{mn} m(\sin(m\phi))}{r \sin \theta} \frac{d}{dr} \left[\sqrt{kr} H^2_{\nu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \left(P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) \right), \right. \right. \\ E_{\theta, mn} = \frac{A_{mn} \sin(m\phi)}{r} \frac{d}{dr} \left[\sqrt{kr} H^2_{\nu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right] \frac{d}{d\theta} \left[P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) \right] + \\ \left. + \frac{B_{mn} \cos(m\phi)}{r} \frac{d}{dr} \left[\sqrt{kr} H^2_{\nu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right] \frac{d}{d\theta} \left[P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) \right], \right.$$

$$E_{r,mn} = \frac{A_{mn} \nu_{mn} (\nu_{mn} + 1)}{r^2} (\sin(m\phi)) \left(\sqrt{kr} H^2_{\nu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right) \left(P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) \right) +$$

$$+ \frac{B_{mn} \nu_{mn} (\nu_{mn} + 1)}{r^2} (\cos(m\phi)) \left(\sqrt{kr} H^2_{\nu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right) \left(P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) \right).$$

$$H_{\theta,mn} = \frac{jkmA_{mn}}{r \sin\theta} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (\cos(m\phi)) \left(\sqrt{kr} H^2_{\nu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right) \left(P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) \right) -$$

$$- \frac{jkB_{mn}}{r \sin\theta} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (\sin(m\phi)) \left(\sqrt{kr} H^2_{\nu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right) \left(P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) \right),$$

$$H_{\phi,mn} = \frac{-jkA_{mn}}{r} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (\sin(m\phi)) \left(\sqrt{kr} H^2_{\nu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right) \frac{d}{d\theta} \left[P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) \right] +$$

$$+ \frac{-jkB_{mn}}{r} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (\cos(m\phi)) \left(\sqrt{kr} H^2_{\nu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right) \frac{d}{d\theta} \left[P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) \right],$$

$$H_{r,mn} = 0.$$

Обозначим индексы для магнитных волн μ , тогда из граничных условий следует:

$$\frac{d}{d\theta} P_{\mu}^m(\cos\theta) = 0.$$

Здесь присоединённая функция Лежандра также выражается через функцию Лежандра $P_{\mu}(\cos\theta)$, удовлетворяющую условию:

$$P_{\mu}(1) = 1.$$

Поскольку μ не является целым числом, то функция P_{μ} не будет полиномом, поэтому уравнению $\frac{d}{d\theta} P_{\mu}^m(\cos\theta) = 0$ удовлетворяет последовательность чисел $\mu_{m1}, \mu_{m2} \dots \mu_{mn}$, зависящих от угла γ .

Следует также отметить, что индексы ν и μ могут быть и целочисленными в некоторых частных случаях. При этом все полученные выше выражения для функций Лежандра остаются без изменений.

Аналогично можно записать поле для магнитных волн:

$$\begin{aligned}
H_{\phi,mn} &= \frac{A_{mn} m(\cos(m\phi))}{r \sin \theta} \frac{d}{dr} \left[\sqrt{kr} H^2_{\mu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right] \left(P_{\mu_{mn}}^m(\cos \theta) \right) - \\
&- \frac{B_{mn} m(A_2 \sin(m\phi))}{r \sin \theta} \frac{d}{dr} \left[\sqrt{kr} H^2_{\mu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right] \left(P_{\mu_{mn}}^m(\cos \theta) \right), \\
H_{\theta,mn} &= \frac{A_{mn} \sin(m\phi)}{r} \frac{d}{dr} \left[\sqrt{kr} H^2_{\mu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right] \frac{d}{d\theta} \left[P_{\mu_{mn}}^m(\cos \theta) \right] + \\
&+ \frac{B_{mn} \cos(m\phi)}{r} \frac{d}{dr} \left[\sqrt{kr} H^2_{\mu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right] \frac{d}{d\theta} \left[P_{\mu_{mn}}^m(\cos \theta) \right], \\
H_{r,mn} &= \frac{\mu_{mn}(\mu_{mn} + 1)}{r^2} (A_{mn} \sin(m\phi)) \left[\sqrt{kr} H^2_{\mu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right] \left(P_{\mu_{mn}}^m(\cos \theta) \right) + \\
&+ \frac{\mu_{mn}(\mu_{mn} + 1)}{r^2} (B_{mn} \cos(m\phi)) \left[\sqrt{kr} H^2_{\mu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right] \left(P_{\mu_{mn}}^m(\cos \theta) \right), \\
E_{\theta,mn} &= \frac{jkm}{r \sin \theta} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (A_{mn} \cos(m\phi)) \left[\sqrt{kr} H^2_{\mu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right] \left(P_{\mu_{mn}}^m(\cos \theta) \right) - \\
&- \frac{jkm}{r \sin \theta} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (B_{mn} \sin(m\phi)) \left[\sqrt{kr} H^2_{\mu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right] \left(P_{\mu_{mn}}^m(\cos \theta) \right),
\end{aligned}$$

$$E_{\phi, mn} = \frac{-jk}{r} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (A_{mn} \sin(m\phi)) \left(\sqrt{kr} H^2_{\mu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right) \frac{d}{d\theta} \left[P_{\mu_{mn}}^m(\cos\theta) \right] +$$

$$+ \frac{-jk}{r} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (B_{mn} \cos(m\phi)) \left(\sqrt{kr} H^2_{\mu_{mn} + \frac{1}{2}}(kr) \right) \frac{d}{d\theta} \left[P_{\mu_{mn}}^m(\cos\theta) \right],$$

$$E_{r, mn} = 0.$$

Функции Лежандра, а также присоединённые функции Лежандра являются табулированными функциями и встроенными в вычислительные программные продукты.

При большом радиусе сферы функции Лежандра можно также заменить асимптотическими приближениями:

$$P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta) = (-\nu_{mn})^m \sqrt{\frac{2}{\pi \nu_{mn} \sin\theta}} \left[\sin\left(\left(\nu_{mn} + \frac{1}{2} \right) \theta + \frac{(2m+1)\pi}{4} \right) \right]. \quad (3.37)$$

При наличии некоторого стороннего источника (антенны) вблизи или на проводящем теле результирующее поле E и H может быть найдено как $\sum_p C_p E_p, \sum_p C_p H_p$, причём суммирование распространяется на все электрические и магнитные волны с комплексной амплитудой C_p . Амплитуды C_p выбираются такой величины, что на поверхности тела удовлетворены граничные условия, а также выполнены условия возбуждения.

Пусть излучатель размещается в точке (R_0, θ_0, ϕ_0) , как показано на рисунке 3.2 [137, 138].

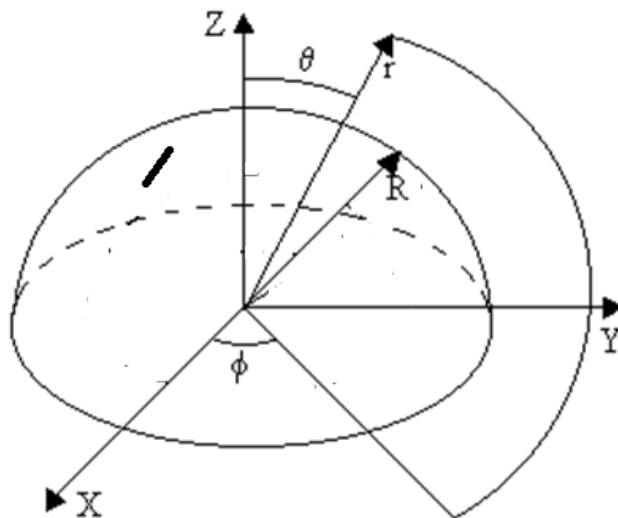


Рисунок 3.2 – Месторасположения излучателя на сфере

Если на сфере размещается электрический диполь, находящийся в точке (R_0, θ_0, ϕ_0) , с объёмной плотностью тока $\vec{J}^{\text{э}}$, то поле диполя над сферой должно удовлетворять неоднородным уравнениям Максвелла:

$$\begin{cases} \text{rot}\vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} + \vec{J}^{\text{э}} \\ \text{rot}\vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \end{cases}.$$

Решение неоднородной системы уравнений Максвелла должно стремиться к решению однородной системы уравнений при большом удалении от источника возбуждения. Поэтому решение однородной системы, описывающее свободные колебания сферы, можно рассматривать как частное решение поставленной задачи.

Поле диполя над сферой также должно удовлетворять граничным условиям: $E_r = E_\phi = 0$ при $\theta = \gamma$. Из уравнений (3.21а) и (3.21б) следует, что $U = 0$ и $\frac{\partial V}{\partial \theta} = 0$ при $\theta = \gamma$. Эти условия и условие излучения достаточны для того, чтобы рассматриваемая задача имела однозначное решение. Условие излучения заключается в том, что существуют только волны, уходящие от источника излучения.

Решение неоднородных волновых уравнений можно представить в виде ряда электрических волн и магнитных волн, распространяющихся от диполя (3.38), и стоячих волн, возникающих между диполем и полюсом сферы (3.39). Аналогичную систему функций можно записать для волн, распространяющихся в противоположном направлении.

$$\left. \begin{aligned}
 U = \sum_n \sum_m & \left(A_{mn} \sqrt{kr} H^2 \left(\nu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\nu_{mn}}^m (\cos \theta) (\sin(m\phi)) + \right. \\
 & \left. + B_{mn} \sqrt{kr} H^2 \left(\nu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\nu_{mn}}^m (\cos \theta) (\cos(m\phi)) \right) \\
 V = & \left(\bar{A}_{mn} \sqrt{kr} H^2 \left(\mu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\mu_{mn}}^m (\cos \theta) (\sin(m\phi)) + \right. \\
 & \left. + \bar{B}_{mn} \sqrt{kr} H^2 \left(\mu_{mn} + \frac{1}{2} \right) (kr) P_{\mu_{mn}}^m (\cos \theta) (\cos(m\phi)) \right) \\
 & \text{при } r > R.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.38)$$

где $A_{mn}, \bar{A}_{mn}, B_{mn}, \bar{B}_{mn}$ – комплексные амплитуды системы собственных волн.

Выражение (3.38), описывающее структуру поля, возбуждаемого диполем и распространяющегося от него, может быть существенно упрощено, если заменить цилиндрические и сферические функции их асимптотиками.

Волна, распространяющаяся в противоположном направлении, дойдя до полюса сферы, отражается от неё и распространяется снова к источнику, т.е. будет стоячей цилиндрической волной. Поле такой волны получается путём замены в (3.38) функции Ханкеля второго рода функцией Бесселя первого рода.

$$\begin{aligned}
 U = \sum_n \sum_m & \left\{ \begin{aligned} & C_{mn} \left(\sqrt{kr} J_{\left(\nu_{mn} + \frac{1}{2} \right)}(kr) \right) P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta)(\sin(m\phi)) + \\ & + D_{mn} \left(\sqrt{kr} J_{\left(\nu_{mn} + \frac{1}{2} \right)}(kr) \right) P_{\nu_{mn}}^m(\cos\theta)(\cos(m\phi)) \end{aligned} \right\} \\
 V = & \left\{ \begin{aligned} & \bar{C}_{mn} \left(\sqrt{kr} J_{\left(\mu_{mn} + \frac{1}{2} \right)}(kr) \right) P_{\mu_{mn}}^m(\cos\theta)(\sin(m\phi)) + \\ & + \bar{D}_{mn} \left(\sqrt{kr} J_{\left(\mu_{mn} + \frac{1}{2} \right)}(kr) \right) P_{\mu_{mn}}^m(\cos\theta)(\cos(m\phi)) \end{aligned} \right\} , \quad (3.39) \\
 \text{при } & r > R.
 \end{aligned}$$

$C_{mn}, \bar{C}_{mn}, D_{mn}, \bar{D}_{mn}$ – комплексные амплитуды системы собственных волн.

На рисунке 3.3. приведена зависимость угломестной компоненты поля от пространственных координат, рассчитанная с помощью приведенной выше методики.

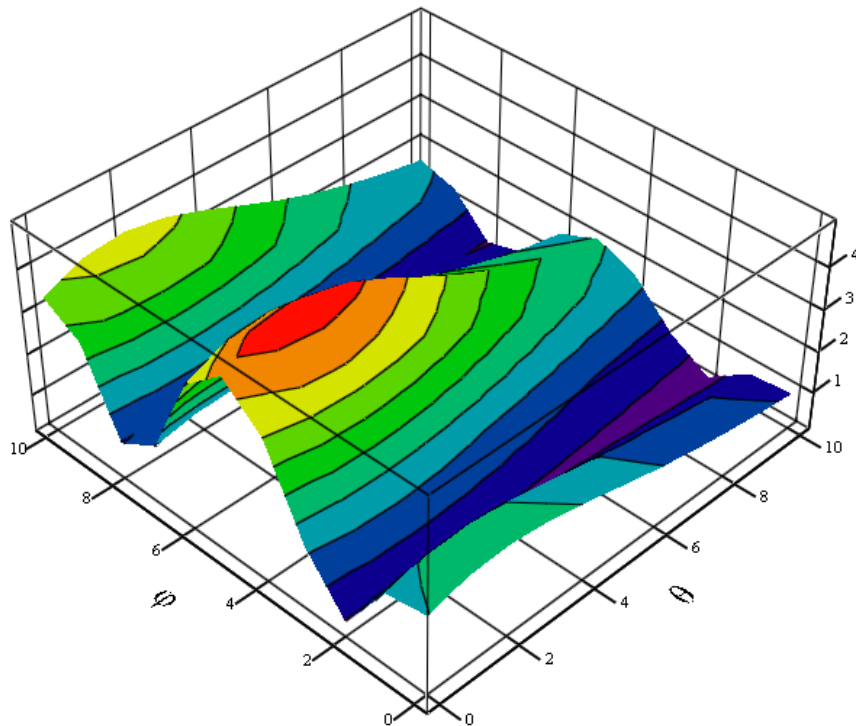


Рисунок 3.3. – Зависимость угломестной компоненты поля от пространственных координат

Сечение этой зависимости плоскостью XOZ ($\phi=0$) показано на рисунке 3.4.

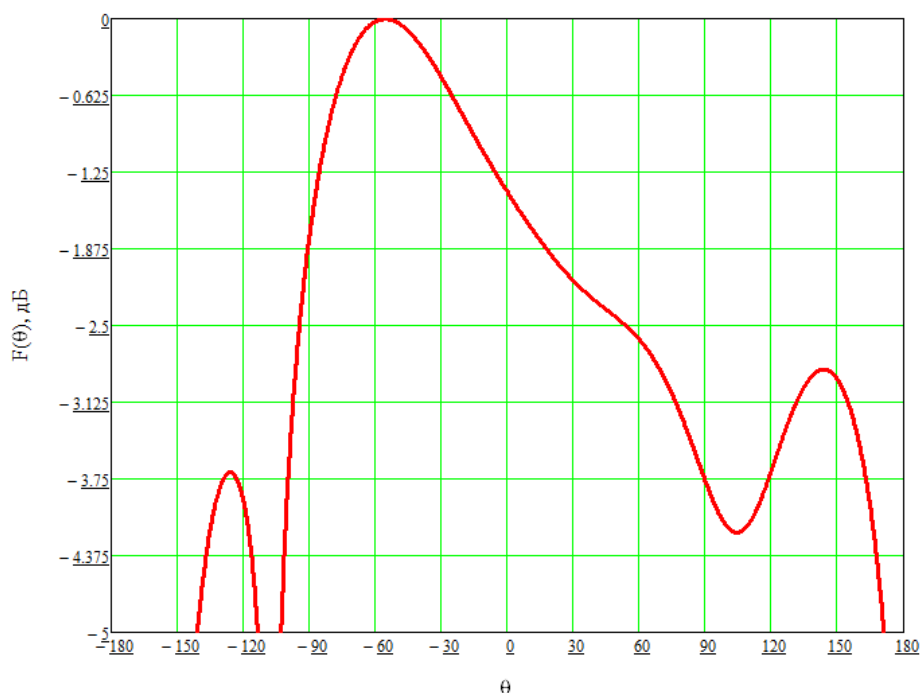


Рисунок 3.4. – Теоретическая ДН

Асимметричная форма ДН объясняется неравномерностью распределения тока по элементарному вибратору, связанной с размещением излучателя на выпуклой поверхности. Структура поля собственных волн элементарного излучателя зависит от его ориентации относительно полюса сферы, а также от радиуса сферы. Так как одним из предъявляемых требований к классу малых КА является уменьшение массогабаритных размеров бортовой антенной системы, то в данном разделе решена задача об излучении элементарного излучателя, размещённого на сфере малого радиуса. Поэтому кривизна поверхности внесла существенные изменения в ДН элемента.

Основной лепесток (широкая часть ДН) формируется как у обычного печатного излучателя, а именно излучением щелью (см. рис. 3.4). Боковой лепесток связан с вытеканием краевых токов на боковой поверхности, размеры которой составляют порядка $\lambda/4$, что и проявляется в формировании бокового лепестка.

В соответствии с теорией антенн, ДН при изгибе плеча вибратора расширяется и приобретает асимметричную форму. Полученные результаты полностью соответствуют теории антенн.

Таким образом, предложенная методика позволяет на ранней стадии разработки бортовой антенной системы малых КА оценить влияние поверхности носителя на характеристики направленности МПА [139].

3.3. Выводы по главе 3

1. Рассмотрено влияние корпус КА на характеристики направленности бортовых антенн, которое проявляется в их нежелательном ухудшении.
2. Проведён обзор существующих методов решения строгой задачи дифракции на носителе.
3. Показана необходимость приближённой методики для оценки влияния корпуса КА на характеристики бортовых антенн из-за сложности применения строгой постановки задачи дифракции для решения данной задачи.
4. Разработана и предложена методика приближённого расчёта характеристик направленности бортовых МПА малых КА, позволяющая провести инженерную оценку на ранней стадии проектирования (авант-проект) характеристик направленности (КСВ, ДН, КУ) бортовой антенной системы малых КА.

Глава 4. Моделирование антенной системы класса малых КА

В настоящее время перед разработчиками СВЧ аппаратуры ставят все более и более сложные задачи. При этом на разработку комплексной системы требуется большее количество времени.

Процесс проектирования электродинамических моделей некоторых систем или устройств в современных программных комплексах расчета антенн и устройств СВЧ можно ускорить разработку, благодаря использованию возможностей программирования, предоставляемых самими системами автоматизированного проектирования (САПР) СВЧ, а также посредством обеспечения взаимодействия ответствующих программ с математическими пакетами (Matlab) и другими внешними программами (Solid Works).

На сегодняшний день существует целый ряд САПР для моделирования антенн и устройств СВЧ [140]:

- CST Microwave Studio,
- Ansoft High Frequency Structure Simulation (HFSS),
- EMSS FEKO,
- AWR Microwave Office,
- Agilent Advanced Design System (ADS),
- Agilent Electromagnetic Professional (EMPro),
- REMCOM XF dtd и др.

При теоретических и экспериментальных исследованиях АФУ или антенных систем определяется лишь ограниченное число их параметров и характеристик, причем, чем сложнее антенна, тем большим количеством её особенностей приходится пренебречь. Поэтому, проектируя антенную систему на основе теоретических расчетов и экспериментальных исследований макетов самой антенны и её отдельных узлов, фактически рассматривается не подлинное устройство, а его модель, в определенном смысле подобная истинной антенной системе и отражающая только основные свойства [61].

При строгой электродинамической постановке задачи и определении адекватности математической модели основная погрешность возникает на этапе выбора алгоритма численного решения (метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод интегральных уравнений) и численного исследования модели, которая может быть оценена средствами вычислительной математики [141].

Компьютерные программы автоматизации проектирования основаны на численном решении уравнений Максвелла в частотной или временной области. Рядом фирм разработаны

универсальные программы для решения внутренних и внешних задач, основанные на методах численного решения уравнений Максвелла в частотной области.

К этим методам можно отнести:

- FEM (Finite Element Method) – метод конечных элементов;
- FIT (Finite Integration Technique in Frequency Domain) – метод конечных интегралов в частотной области;
- MoM (Method of Moment) – метод моментов;
- PO (Physical Optics approximation) – метод физической оптики;
- UTD (Uniform Theory of Diffraction) – однородная теория дифракции;
- FFT (Fast Fourier Transform and modified spectral-domain method of moments) – метод моментов, модифицированный для спектральной области на основе быстрого преобразования Фурье.

Численное решение уравнений Максвелла во временной области развито в методах:

- FDTD (Finite Difference Time Domain) – конечно-разностный метод во временной области;
- FIT (Finite Integration Technique in Time Domain) – метод конечных интегралов во временной области.

Создание большого количества программного продукта систем электродинамического моделирования обусловлено широким спектром задач, возникающих в инженерной практике расчетов различных устройств СВЧ, антенн, явлений дифракции на самолетах, КА, в задачах обнаружения объектов в неоднородных средах и т.д. [140, 142].

В инженерной практике выбор той или иной компьютерной программы проектирования определяется функциональными возможностями программы, способами ввода, геометрией устройства и возбуждения, доступными формами вывода результатов моделирования, наличием возможности проведения параметрической оптимизации.

Таким образом, благодаря наличию достаточно большого количества САПР, позволяющих осуществлять электродинамическое моделирование различными методами, у разработчиков антенн и устройств СВЧ появляются следующие возможности:

- проводить анализ при выборе вариантов построения системы на ранней стадии разработки, т.е. поиск оптимального варианта и разработка альтернативных вариантов;
- проводить анализ конструктивных решений на ранней стадии разработки;
- ускорить процесс разработки;

- проводить работы по усовершенствованию имеющихся разработок в целях улучшения параметров;
- повысить качество и надежность разработки;
- уменьшить экономические затраты на разработку.

4.1 Моделирование антенной системы малого КА «Ионосфера»

В ходе моделирования антенной системы малого КА «Ионосфера» был применен метод конечных элементов. Данный метод позволяет вести разработку численных алгоритмов с высокой степенью универсальности. Более подробно метод конечных элементов представлен в работе [143].

В качестве материала подложки антенны используется ФЛАН-10, т.е. $\varepsilon = 10$; $\text{tg } \delta = 1,5 \times 10^{-3}$ (см. 2.7).

Стоит отметить, что при моделировании не учитывалось влияние на параметры антенн целевой аппаратуры, расположенной на КА, т.е. при моделировании на поверхности КА были расположены только модели разрабатываемых МПА, как показано на рисунке 4.1.

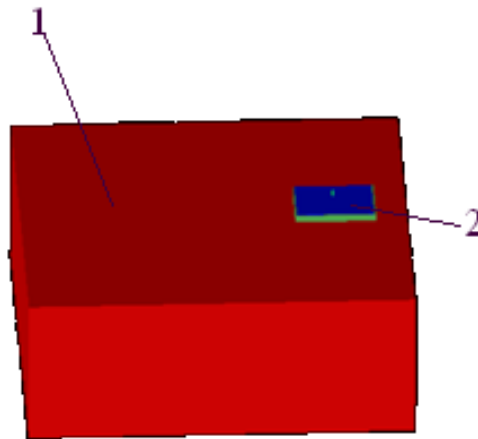


Рисунок 4.1 – Моделирование антенной системы малого КА «Ионосфера»: 1 – корпус КА «Ионосфера», 2 – модель МПА

Тем самым удалось сократить временные затраты на процесс моделирования антенн и отработку характеристик направленности.

4.1.1 Варианты построения МПА с круговой поляризацией

Исходя из требований к бортовой антенне целевой аппаратуры «ЛАЭРТ» (см. п. 2.4), был произведен численный расчёт габаритов антенны [144]. Затем были проанализированы способы реализации МПА с круговой поляризацией.

Известно [47], что поле круговой поляризации представимо в виде суперпозиции двух ортогональных линейно-поляризованных полей, сдвинутых по фазе друг относительно друга на 90° . Поэтому и в случае с МПА традиционным способом получения круговой поляризации является использование двух излучателей поля линейной поляризации, располагаемых перпендикулярно друг другу и питаемых с соответствующим фазовым сдвигом.

Однако даже одиночные элементарные излучатели могут создавать поле круговой поляризации при возбуждении в них двух вырожденных ортогональных типов колебаний с относительным сдвигом фазы 90° . С этой целью используются квадратные и круглые диски при включении двух ортогонально расположенных возбуждателей, обеспечивающих сдвиг по фазе $\pm 90^\circ$. Такие антенны могут возбуждаться от общей линии питания с использованием 90-градусного гибридного моста или делителя с дополнительным отрезком линии, обеспечивающим необходимый набег фазы. Варианты построения МПА с круговой поляризацией представлены на рисунке 4.2 [44].

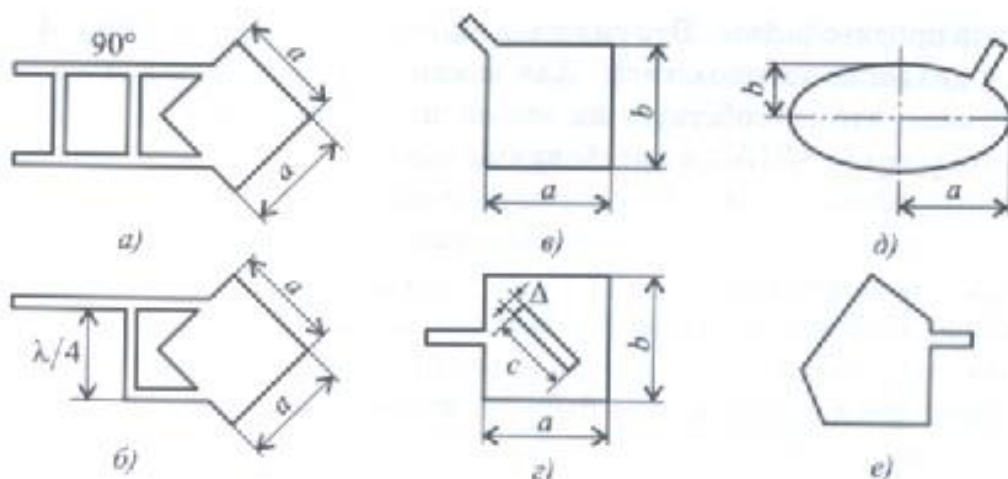


Рисунок 4.2 – Построение МПА с круговой поляризацией: а) с использованием гибридного моста, б) с использованием дополнительного отрезка линии, в) запитка с угла, г) диагональная щель, д) эллиптическая форма, е) многоугольная форма

Тем не менее, множество практических конструкций МПА с круговой поляризацией поля обходится без конструктивного усложнения самой антенны, связанного с возбуждением колебаний в двух точках. Возбуждение двух ортогональных вырожденных типов происходит в одной точке, выбранной так, чтобы амплитуды возбуждаемых полей были одинаковы, а вырождение устраняется внесением незначительной асимметрии в конструкцию антенны. Эквивалентная схема такой антенны представляет собой два несвязанных параллельных контура, возбуждаемых общим током.

4.1.2 Модель МПА 137 МГц

Предлагаемые способы построения МПА с круговой поляризацией, представленные в предыдущем разделе, вносят сложность в конструкцию антенны и тем самым делают её более сложной, с большим количеством элементов, что в свою очередь ведёт к снижению надёжности и т.д.

Таким образом, при построении модели МПА на рабочей частоте 137 МГц (МПА 137 МГц) был рассмотрен следующий вариант, представленный на рисунке 4.3.

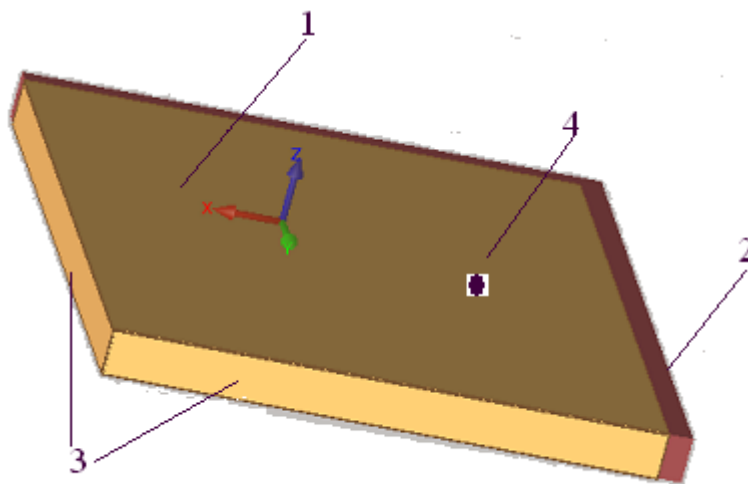


Рисунок 4.3 – Объемная модель МПА 137 МГц: 1 – излучатель, 2 – диэлектрическая подложка, 3 – короткозамыкатель, 4 – точка запитки.

Для получения минимально возможных габаритных размеров антенны и поля с круговой поляризацией в конструкцию МПА введены два соединенных короткозамыкателя, которые расположены по двум смежным торцам диэлектрической подложки, образуя закрытый угол в конструкции антенны, и выполнены в виде закорачивающих стенок.

С помощью такого изменения конструкции антенны удалось уменьшить габариты примерно в два раза, сохранив при этом приемлемые характеристики направленности антенны, и получить излучение антенной поля с круговой поляризацией. Габариты антенны составили 250×280 мм при толщине 20 мм.

На рисунке 4.4 представлена зависимость КСВ такой модели от частоты.

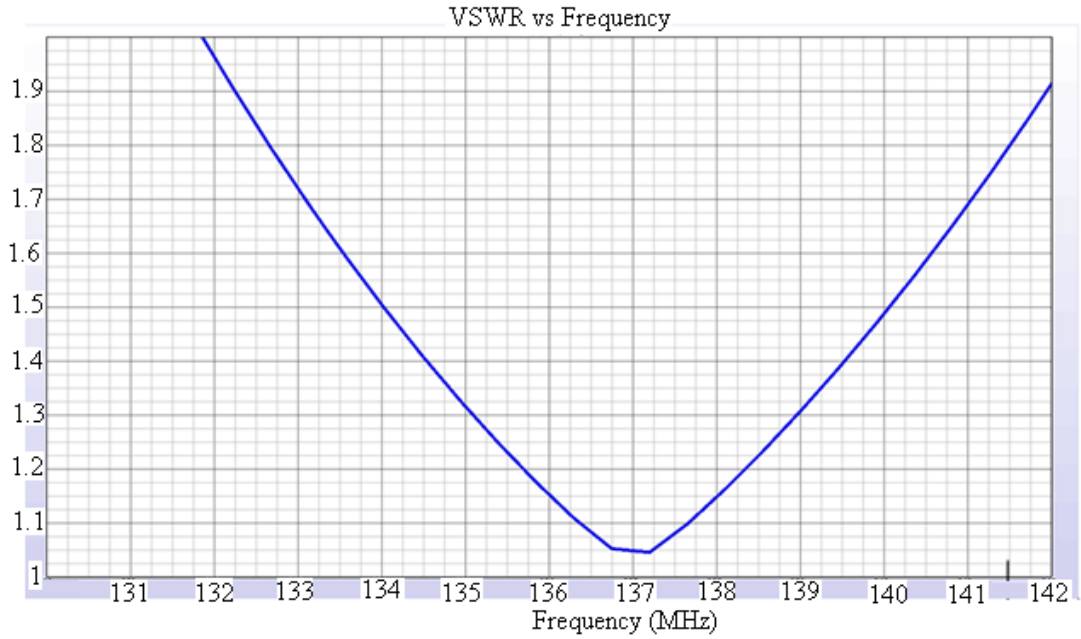
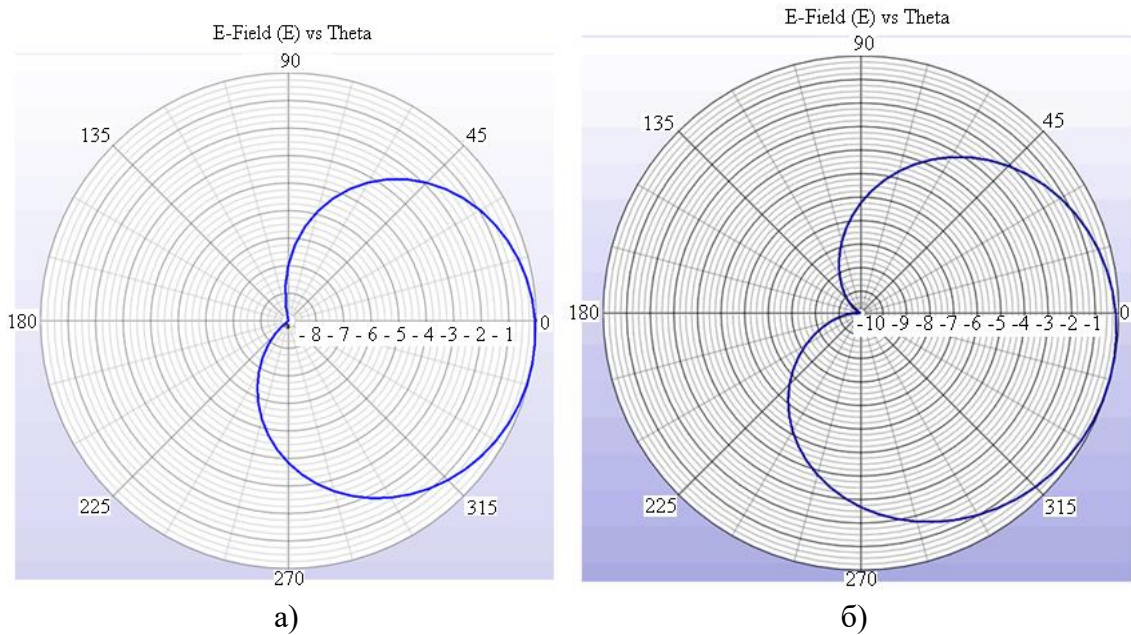


Рисунок 4.4 – КСВ модели МПА 137 МГц от частоты

Запитка антенны осуществлена с помощью штыря, а сама точка запитки модели расположена на оси симметрии модели на расстоянии примерно $2/3$ длины излучателя от меньшего торца с короткозамыкателями, образующего закрытый угол в конструкции модели МПА. Такое расположение точки запитки обеспечивает получение минимального значения КСВ модели, что наблюдается на представленной зависимости КСВ модели МПА 137 МГц от частоты (см. рис. 4.4).

Далее получены ДН модели МПА 137 МГц, представленные на рисунках 4.5.



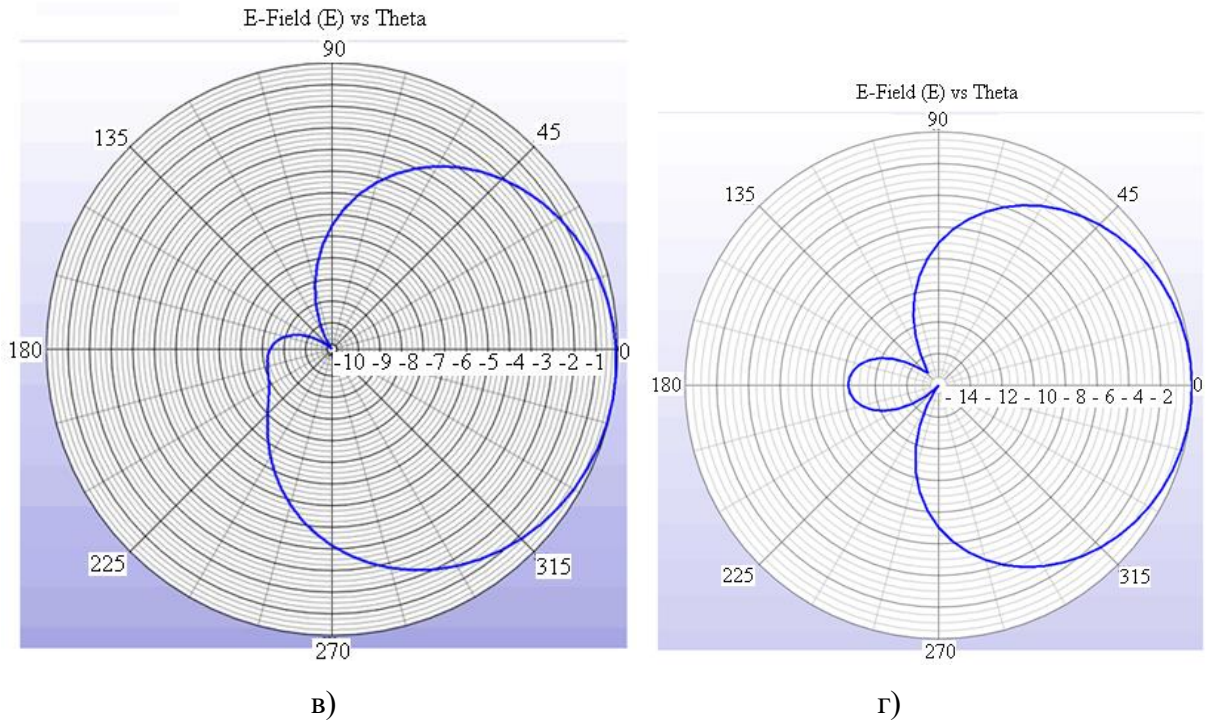
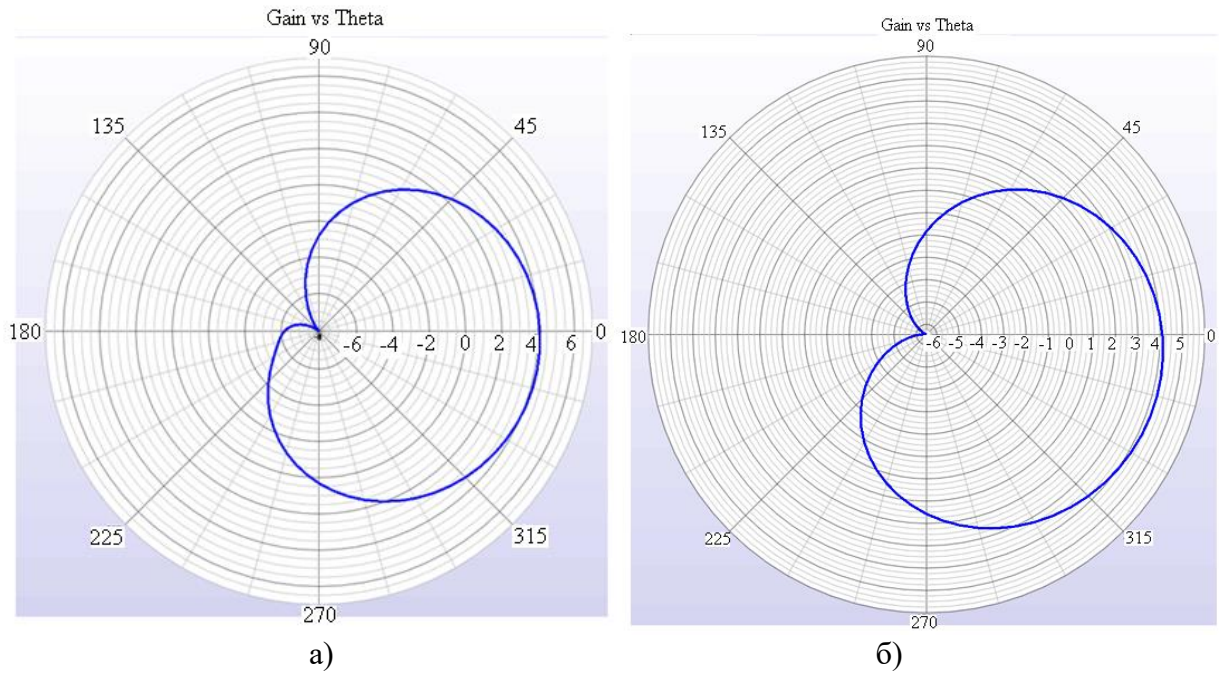


Рисунок 4.5 – ДН модели МПА 137 МГц: а) при $\varphi=0^\circ$, б) при $\varphi=45^\circ$,
в) при $\varphi=90^\circ$, г) при $\varphi=135^\circ$

Наличие искажений и несимметричности ДН модели объясняется влиянием корпуса малого КА «Ионосфера» на ДН модели антенны.

На рисунке 4.6 представлен КУ модели МПА 137 МГц.



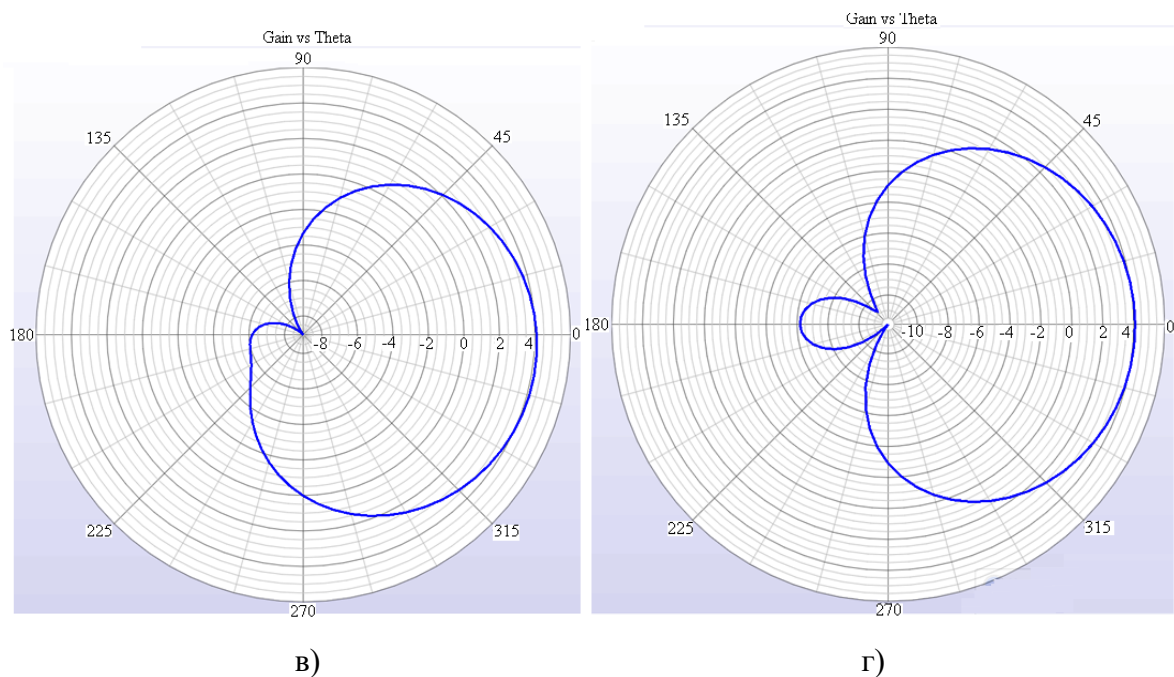


Рисунок 4.6 – КУ модели МПА 137 МГц: а) при $\varphi=0^\circ$, б) при $\varphi=45^\circ$,
в) при $\varphi=90^\circ$, г) при $\varphi=135^\circ$

На представленных зависимостях КУ модели МПА 137 МГц также видно влияние корпуса носителя.

А на рисунке 4.7 представлена зависимость КЭ модели МПА 137 МГц.

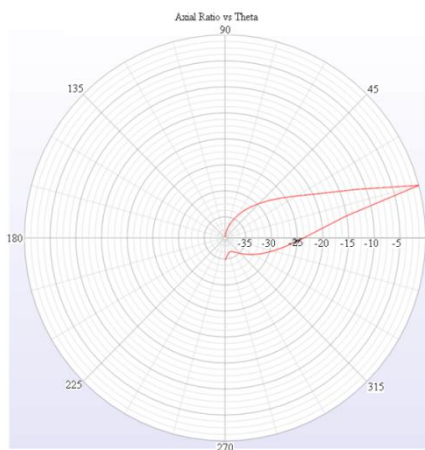


Рисунок 4.7 – КЭ модели МПА 137 МГц

Таким образом, в ходе моделирования МПА 137 МГц были получены следующие результаты [145]:

- КСВ на входе модели – 1,1;
- ДН модели обеспечивает преимущественное направление на центр Земли в пределах $0^\circ\text{--}70^\circ$ от надира $0^\circ\text{--}360^\circ$ по азимуту

- КУ модели по мощности в направлении центра Земли не менее 4 дБ, а в направлении 0° – 70° не менее 1 дБ.
- модель обеспечивает необходимое значение КЭ.

Полученные в ходе моделирования результаты удовлетворяют техническому заданию на антенную систему малого КА «Ионосфера».

4.1.3 Модель МПА 150 МГц

Исходя из требований к антенне бортового передатчика «МАЯК» (см. 2.4), были рассчитаны габариты МПА на рабочей частоте 150 МГц (МПА 150 МГц) [146].

Используя предложенный метод миниатюризации МПА метрового диапазона (см. 2.6.2), предложен следующий вариант МПА 150 МГц, представленный на рисунке 4.8.

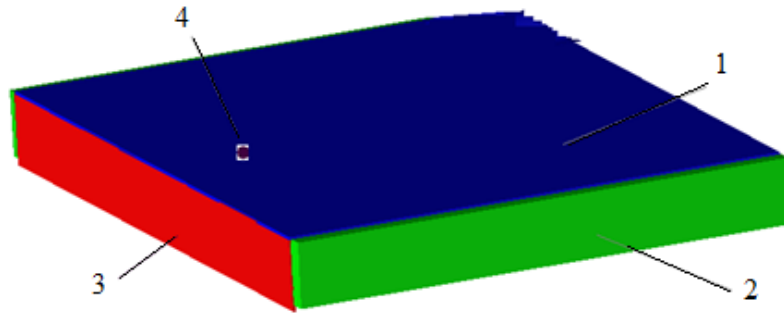


Рисунок 4.8 – Модель МПА 150 МГц:

1 – излучатель, 2 – подложка, 3 – короткозамыкатель, 4 – точка запитки

Для уменьшения габаритов антенны в конструкцию модели введён короткозамыкатель (см. рис. 4.8). С помощью введения в конструкцию антенны данного элемента удалось уменьшить габариты, обеспечив при этом приемлемые характеристики направленности антенны. Габариты антенны составили 220×165 мм при толщине 20 мм.

На рисунке 4.9 представлена зависимость КСВ модели такой модели от частоты.

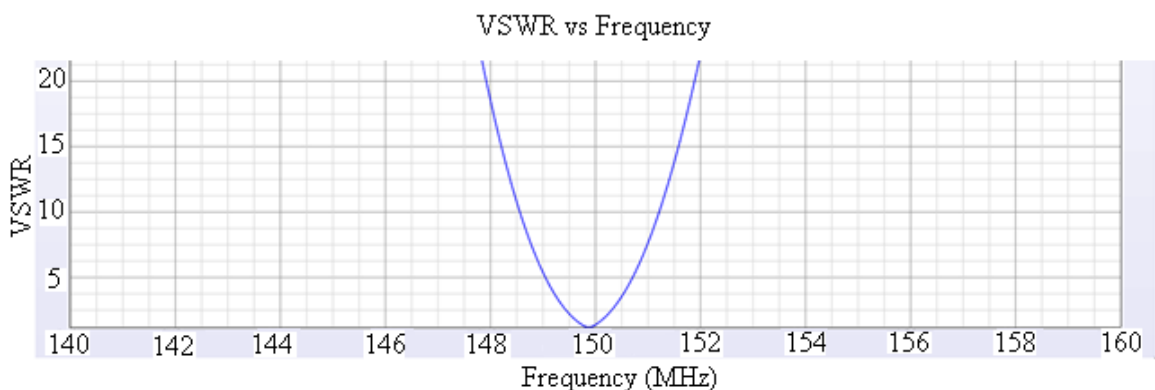


Рисунок 4.9 – Зависимость КСВ модели МПА 150 МГц

Запитка модели осуществлена с помощью штыря, а место точки запитки подобрано таким образом, чтобы обеспечить минимальное значение КСВ модели (см. рис. 4.9).

Далее получены ДН модели МПА 150 МГц, представленные на рисунке 4.10.

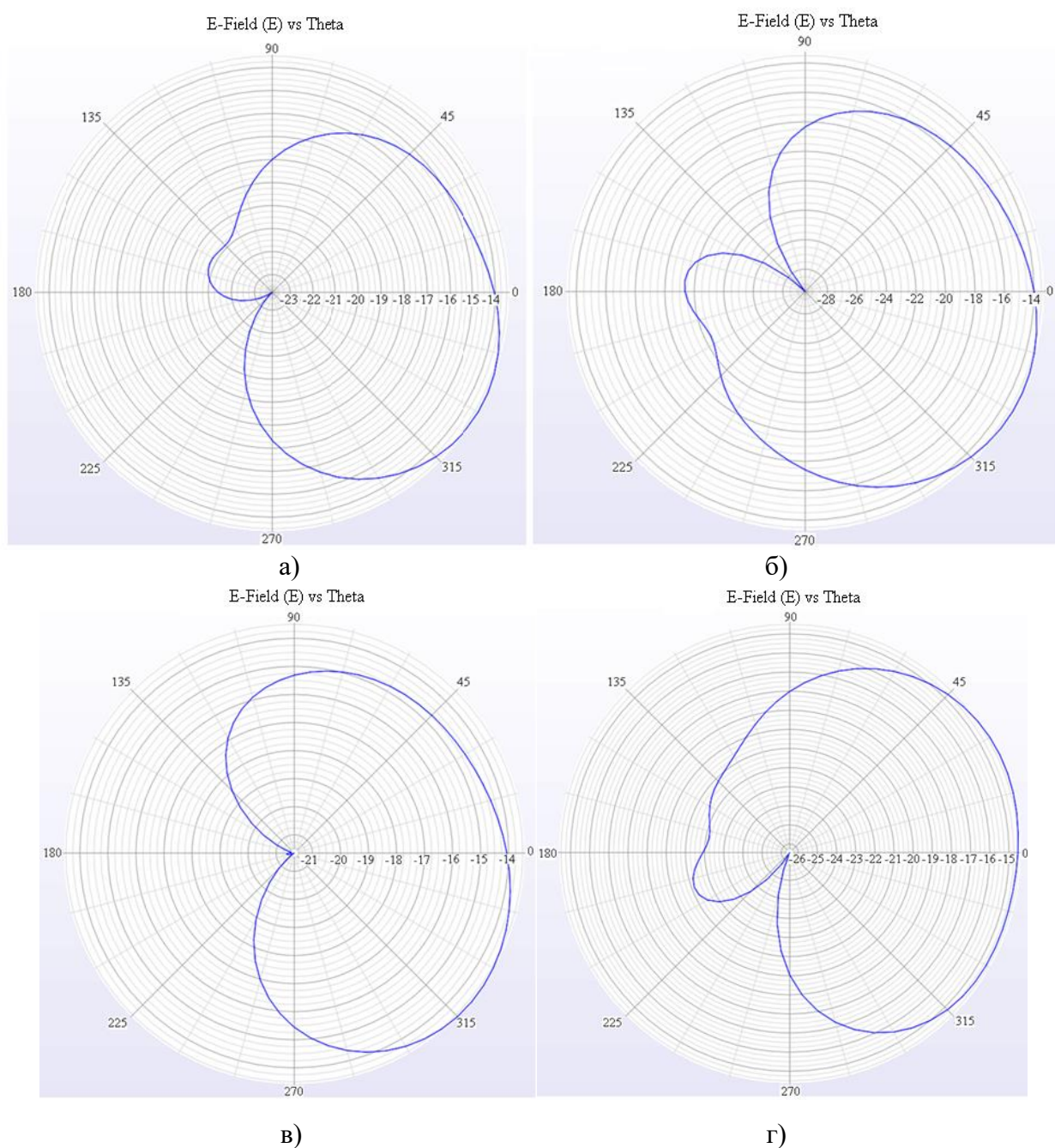


Рисунок 4.10 – ДН модели МПА 150 МГц: а) при $\varphi=0^\circ$, б) при $\varphi=45^\circ$,
в) при $\varphi=90^\circ$, г) при $\varphi=135^\circ$

Наличие искажений и несимметричности ДН модели объясняется влиянием корпуса малого КА «Ионосфера» на ДН модели антенны.

На рисунке 4.11 приведен КУ модели МПА 150 МГц.

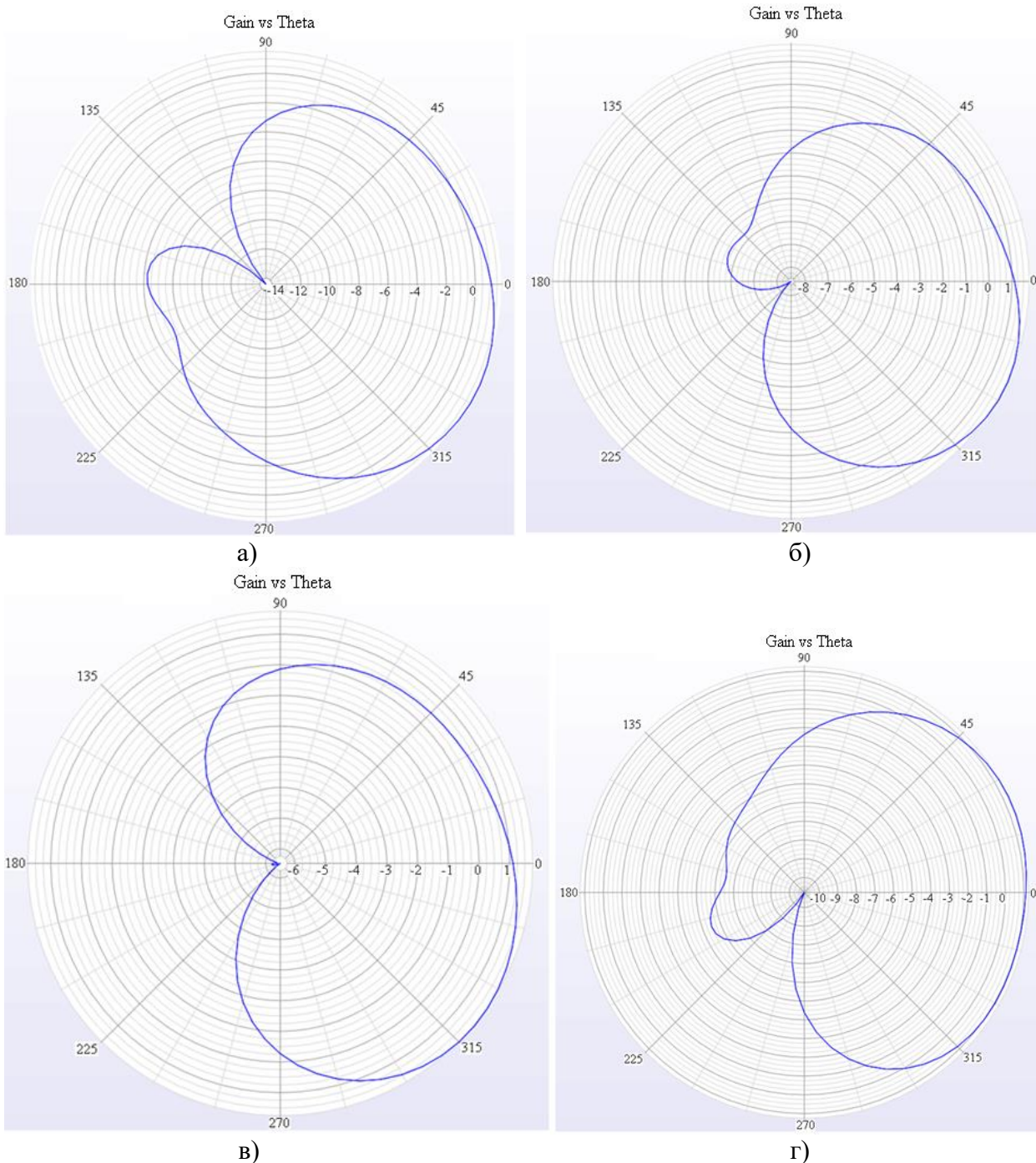


Рисунок 4.11 – КУ модели МПА 150 МГц: а) при $\varphi=0^\circ$, б) при $\varphi=45^\circ$,
в) при $\varphi=90^\circ$, г) при $\varphi=135^\circ$

На представленных зависимостях КУ модели МПА 150 МГц также видно влияние корпуса носителя.

Таким образом, в ходе моделирования были получены следующие результаты [147]:

- КСВ модели МПА – 1.1;
- ДН модели обеспечивает преимущественное направление на центр Земли в пределах $0^\circ\text{--}45^\circ$ от надира и $0^\circ\text{--}360^\circ$ по азимуту;

- КУ модели МПА 150 МГц по мощности в направления центра Земли 1 дБ, а в направлении 0° – 45° не менее 0 дБ.

Полученные в ходе моделирования результаты удовлетворяют техническому требованию на антенную систему КА «Ионосфера».

4.1.4 Модель МПА 400 МГц

Исходя из требований к антенне бортового передатчика «МАЯК» (см. 2.4), были рассчитаны габариты МПА на рабочей частоте 400 МГц (МПА 400 МГц) [148].

Предложен следующий вариант МПА 400 МГц, представленный на рисунке 4.12.

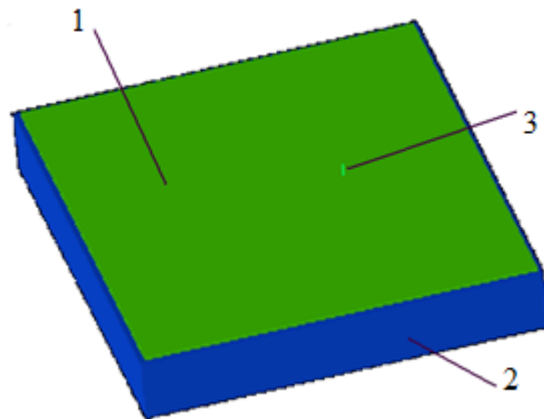


Рисунок 4.12 – Модель МПА 400 МГц: 1 – излучатель, 2 – подложка, 3 – точка запитки

На рисунке 4.13 представлена зависимость КСВ данной модели от частоты.

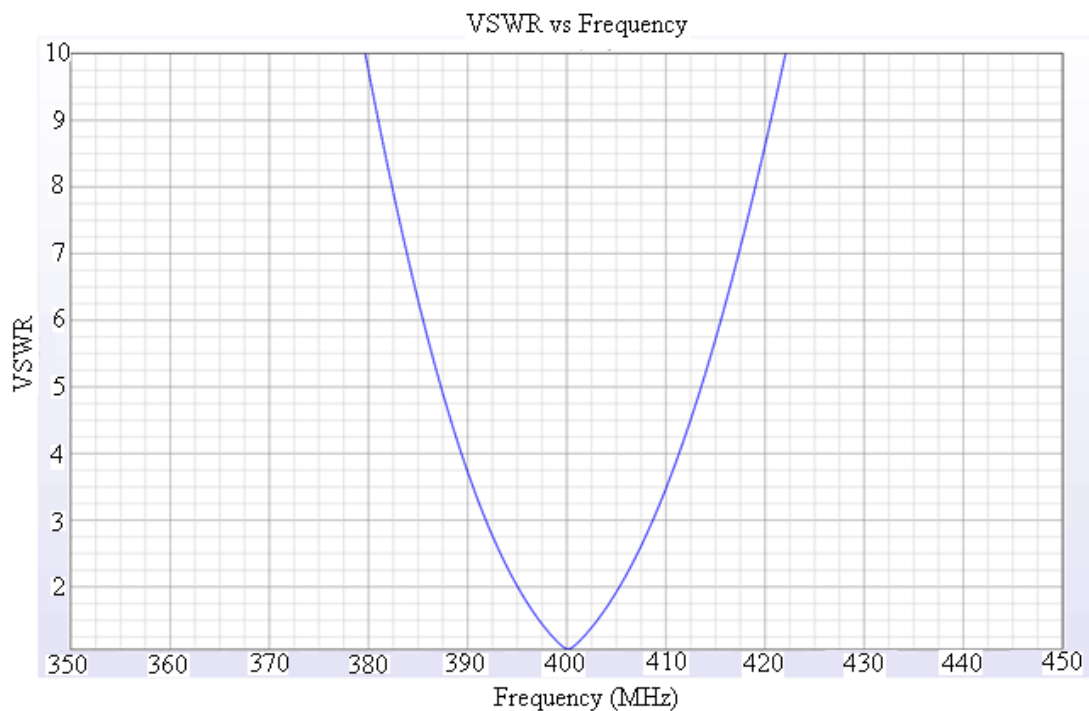


Рисунок 4.13 – Зависимость КСВ модели МПА 400 МГц от частоты

Точка запитки модели подобрана таким образом, чтобы обеспечить минимальное значение КСВ модели (см. 4.13). Запитка антенны также была осуществлена с помощью штыря, а точка запитки размещена на оси симметрии антенны.

На рисунке 4.14 представлена ДН МПА 400 МГц.

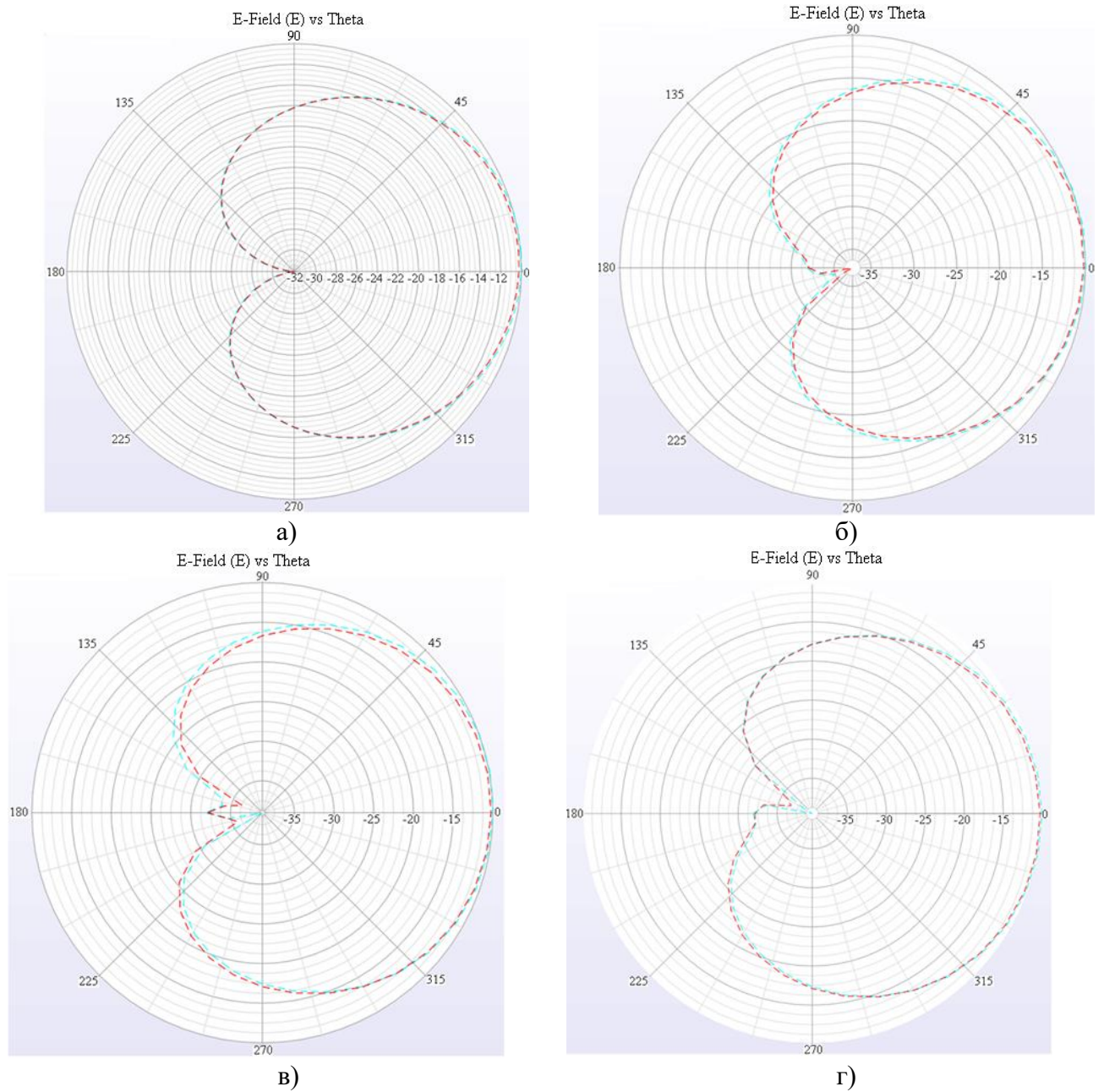


Рисунок 4.14 – ДН модели МПА 400 МГц: а) при $\varphi=0^\circ$, б) при $\varphi=45^\circ$,

в) при $\varphi=90^\circ$, г) при $\varphi=135^\circ$

Наличие искажений и несимметричности ДН модели объясняется влиянием корпуса КА «Ионосфера» на ДН модели антенны.

На рисунке 4.15 представлен КУ МПА 400 МГц.

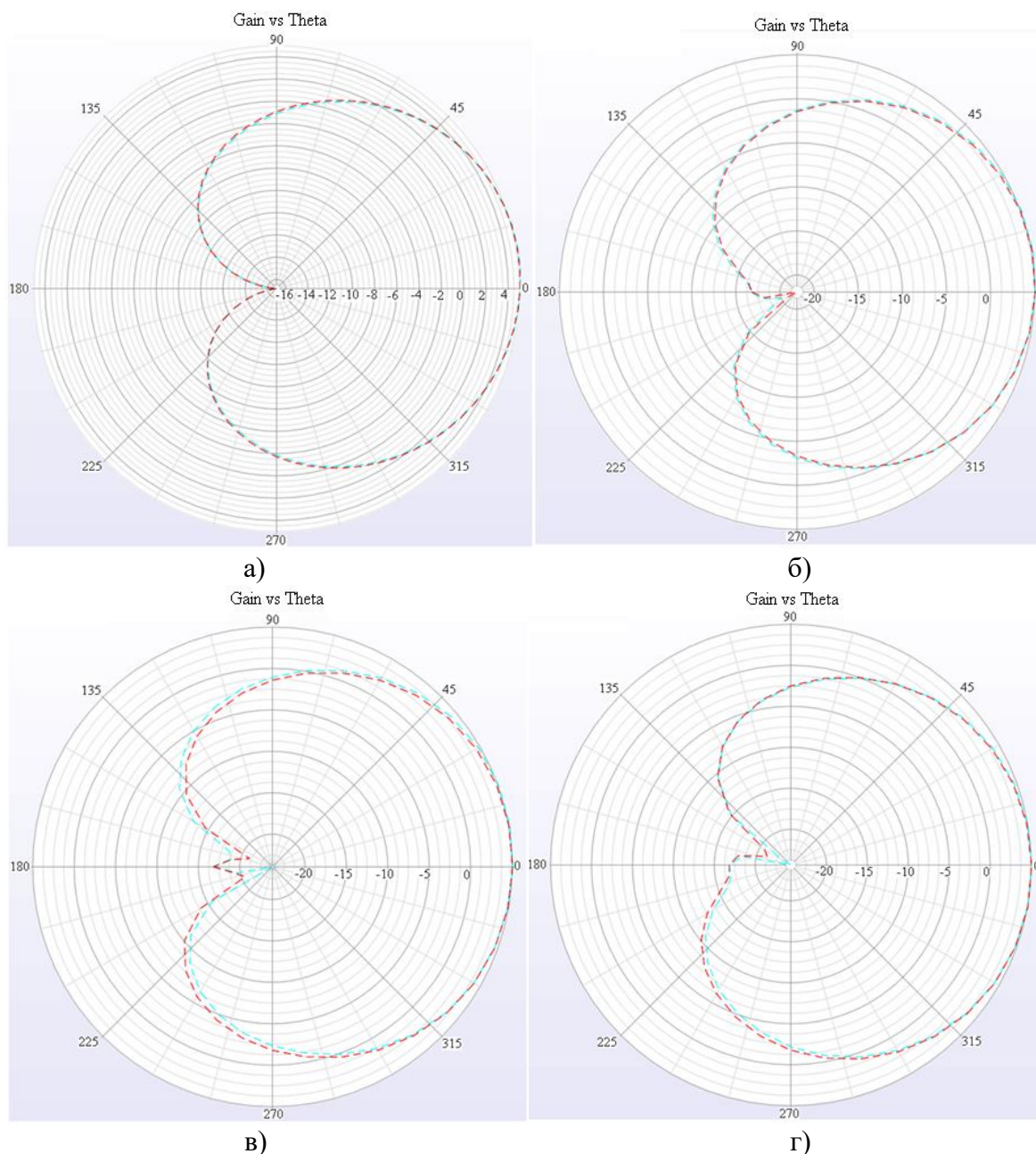


Рисунок 4.15 – КУ модели МПА 400 МГц: а) при $\varphi=0^\circ$, б) при $\varphi=45^\circ$,
в) при $\varphi=90^\circ$, г) при $\varphi=135^\circ$

На представленных зависимостях КУ модели МПА 400 МГц также видно влияние корпуса.

Таким образом, в ходе моделирования были получены следующие результаты [149]:

- КСВ модели МПА – 1.1;
- ДН модели обеспечивает преимущественное направление на центр Земли в пределах 0° – 45° от надира и 0° – 360° по азимуту;
- КУ модели МПА 400 МГц по мощности в направления центра Земли 5 дБ, а в направлении 0° – 45° не менее 2 дБ.

Полученные в ходе моделирования результаты удовлетворяют техническому требованию на антенную систему КА «Ионосфера».

В работе [150] представлены результаты исследования влияния место расположения точки запитки антенны на КСВ моделей МПА 137 МГц, МПА 150 МГц, МПА 400 МГц.

4.1.5 Разработка многодиапазонных МПА

Учитывая свойство МПА работать в многодиапазонном режиме, возник интерес к построению двухчастотной МПА, работающей на частотах 150 МГц и 400 МГц, т.е. объединить МПА 150 МГц и МПА 400 МГц в одну антенну МПА 150/400 МГц. Данный вариант построения бортовой антенны позволит применить в антенной системе малого КА «Ионосфера» вместо двух одну антенну, тем самым освободив часть поверхности КА, что в свою очередь приведет к более эффективному использованию поверхности КА для размещения других бортовых приборов целевого назначения.

Рассмотрим существующие способы построения многодиапазонных МПА.

4.1.5.1 Способы построения многодиапазонных МПА

В [151] представлена двухчастотная МПА, представленная на рисунке 4.16.

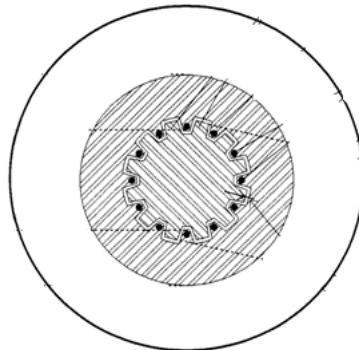


Рисунок 4.16 – Конструкция двухчастотной МПА

Антенна содержит проводящий экран и расположенные противоположно ему внутреннюю излучающую пластину и внешнюю излучающую пластину и систему питания с соответствующими возбуждающими штырями для внутренней и внешней пластинки. Причём внутренняя пластинка выполнена в форме круглого диска с набором выступов по краю, а внешняя пластинка выполнена в форме кольца с соответствующим набором выступов на внутренней стороне кольца, при этом соответствующие выступы внутренней пластинки расположены внутри выступов внешней пластинки. Таким образом, соответствующие выступы внутренней пластинки вложены и расположены в пазах, образованных соответствующими выступами внешней пластинки. В выступах внешней пластинки расположены вертикальные

проводящие элементы, которые проходят через внешнюю пластинку и гальванически соединяют внешнюю пластинку с упомянутым проводящим экраном, а между экраном и внешней пластинкой по её внешнему периметру имеется диэлектрическое заполнение. Выступы внутренней пластинки расположены в пазах, образованных выступами внешней пластинки таким образом, чтобы имелся определенный зазор между этими выступами. Выступы могут быть выполнены прямоугольной, квадратной, трапециевидальной или другой формы, имеющей определенную площадь поверхности.

В [152] представлена многодиапазонная МПА, показанная на рисунке 4.17.

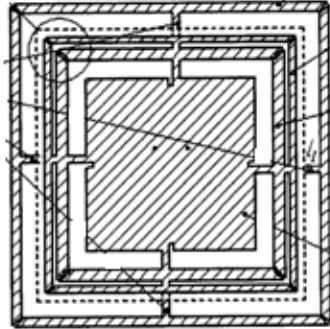


Рисунок 4.17 – Конструкция многодиапазонной МПА

Антенна содержит разрезные кольцевые антенные элементы, выполненные из сегментов кольцевых планарных проводящих дорожек, зазор между соседними сегментами в местах их стыковки составляет 0,1–0,5 мм, планарный антенный элемент, сформированный во внутреннем кольцевом антенном элементе, средства питания, включающие направленный ответвитель, два штыря, четыре отрезка полосковых линий, соединенные с планарным антенным элементом и каждая с сегментами кольцевых антенных элементов, планарный антенный элемент снабжен четырьмя щелями, расположенными от края к центру, причем четыре отрезка полосковых линий расположены возле краев четырёх щелей симметричным образом, а антенные элементы и отрезки полосковых линий выполнены на общей диэлектрической подложке, а основание антенны выполнено на внешней обкладке направленного ответвителя на основе связанных полосковых линий.

В [153] представлен еще один вариант построения многодиапазонной МПА, показанный на рисунке 4.18.

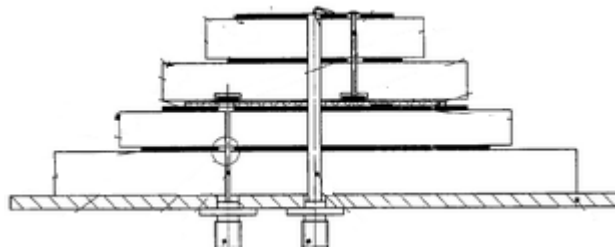


Рисунок 4.18 – Многодиапазонная МПА этажерочного типа

Данная антенна состоит из четырёх антенных элементов. Также имеются разделительная плата, два запитывающих штыря и проводящий экран, причём каждый антенный элемент имеет отверстие для прохождения коаксиального кабеля.

4.1.5.2 Вариант построения двухдиапазонных МПА

Приведенные выше варианты построения многодиапазонных МПА обладают рядом недостатков, а именно сложной конструкцией, сложной схемой запитки, большим количеством элементов и т.д.

При построении двухчастотных МПА применяют следующее соотношение [61]:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{a}{b}, \quad (4.1)$$

где f_1, f_2 – резонансные (рабочие) частоты двухчастотной антенны, a – ширина излучателя антенны; b – длина излучателя антенны.

При построении микрополосковой антенны на две рабочие частоты одного диапазона длин волн (например, сантиметровый диапазон) габариты антенны, рассчитанные по соотношению (4.1), приемлемы для использования в качестве бортовой антенны для малых КА.

Однако, если разность двух резонансных (рабочих) частот Δf превышает полосу одного из каналов, например $\Delta f = |f_1 - f_2| > 30$ МГц, а отношения $\Delta f / f_1$ и $\Delta f / f_2$ больше чем 10–15%, то полученные по формуле (4.1) габариты антенн становятся неприемлемыми для использования такой двухдиапазонной МПА в качестве бортовой антенны малого КА [61]. При разработке бортовых антенн особое внимание уделяется размещению их на поверхности КА, что в свою очередь накладывает жесткие ограничения по массогабаритным показателям антенн. Например, при $f_1 = 100$ МГц (метровый диапазон (30 МГц–300 МГц)) и $f_2 = 400$ МГц (дециметровый диапазон (300 МГц–3 ГГц)) отношение сторон такой двухчастотной МПА $a / b = 1 / 3$, т.е. одна сторона излучателя должна быть больше другой в 3 раза.

Таким образом, габариты такой двухчастотной МПА (метрового и дециметрового диапазонов) получаются примерно $0,3 \times 0,9$ м.

Если рабочие частоты разнесены по частотной оси достаточно далеко друг от друга, то на каждой из них одно из сопротивлений существенно меньше другого, как сопротивление параллельного контура при сильной расстройке, а входное сопротивление двухчастотного излучателя практически равно входному сопротивлению одночастотного излучателя на соответствующей частоте.

Для построения многодиапазонных МПА предлагается вариант, который заключается в следующем. Для обеспечения излучения в разных диапазонах, например метровом и дециметровом, необходимо обеспечить отношение сторон излучателя a / b в пределах $0,5 \dots 1$. В

тоже время используется плоская, невыступающая конструкция самой антенны, а также один запитывающий штырь [154].

Такая конструкция позволяет упростить способ построения работы МПА в многочастотном диапазоне, что в свою очередь повышает надёжность такой антенны, так как в её конструкции используется минимально количество элементов.

4.1.5.3 Модель МПА 150/400 МГц

С помощью предложенного варианта построения многодиапазонных МПА было проведено электродинамическое моделирование модели двухчастотной МПА на рабочих частотах 150 МГц и 400 МГц (МПА 150/400 МГц) [155]. Предложена конструкция антенны, представленная на рисунке 4.8 (см. 4.1.3).

На рисунке 4.19 представлены зависимости КСВ модели от частоты.

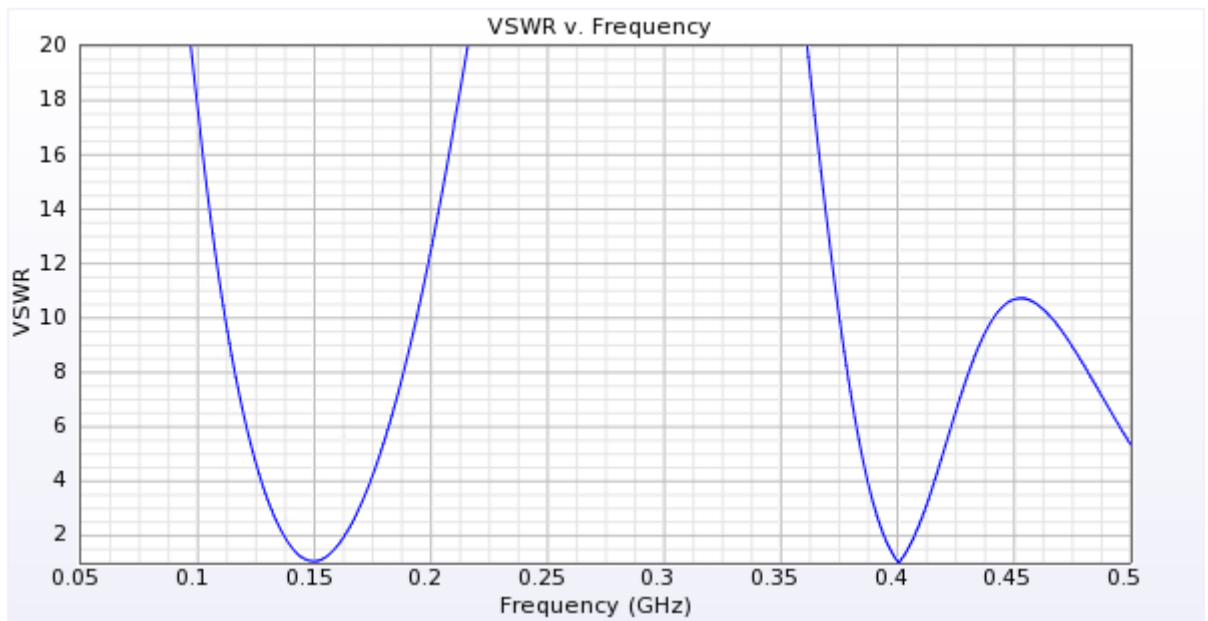


Рисунок 4.19 – КСВ модели МПА 150/400 МГц от частоты

На рисунках 4.20 и 4.21 представлены ДН и КУ модели МПА 150/400 МГц соответственно.

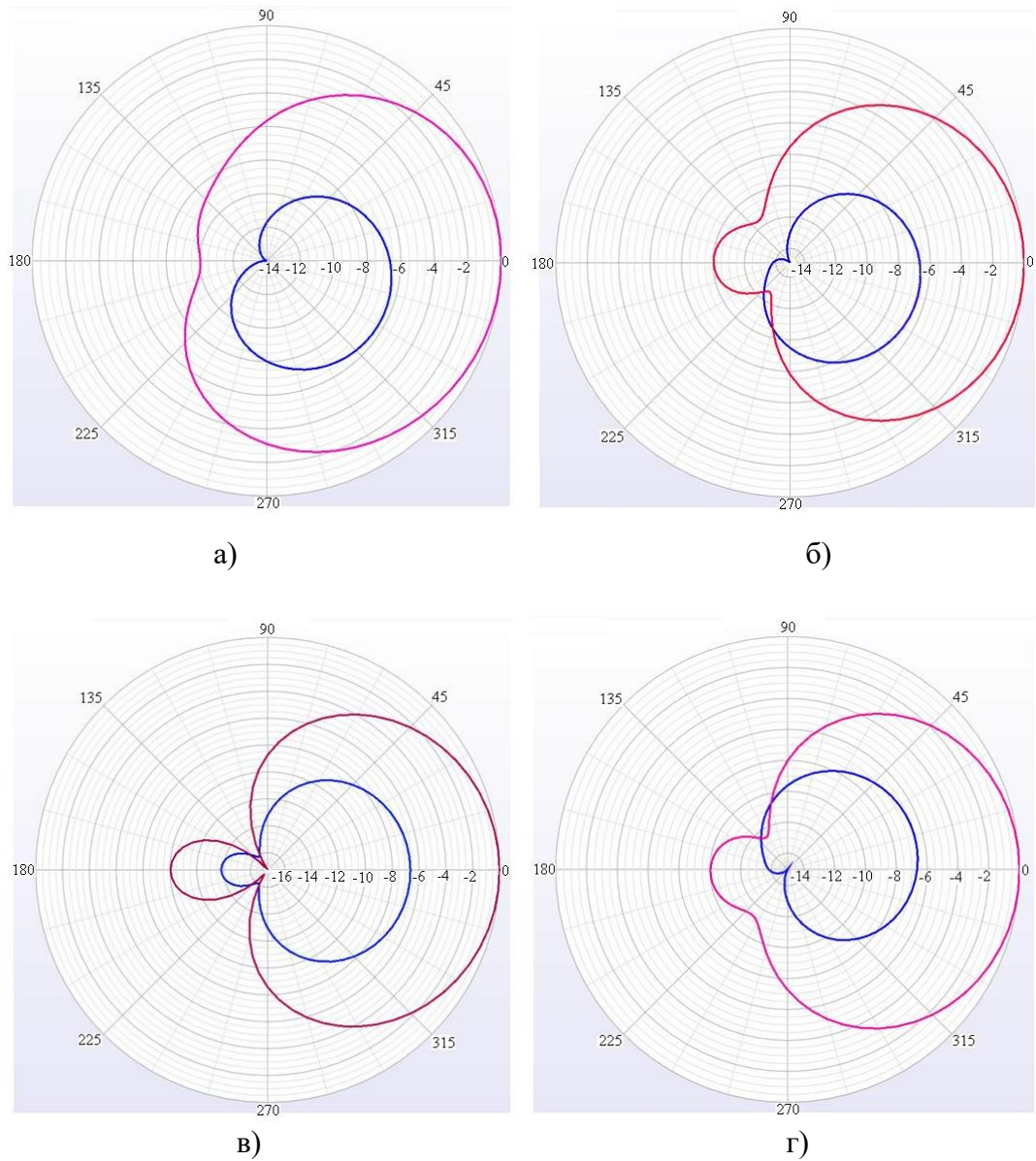


Рисунок 4.20 – ДН модели МПА 150/400: а) при $\varphi=0^\circ$, б) при $\varphi=45^\circ$,
в) при $\varphi=90^\circ$, г) при $\varphi=135^\circ$

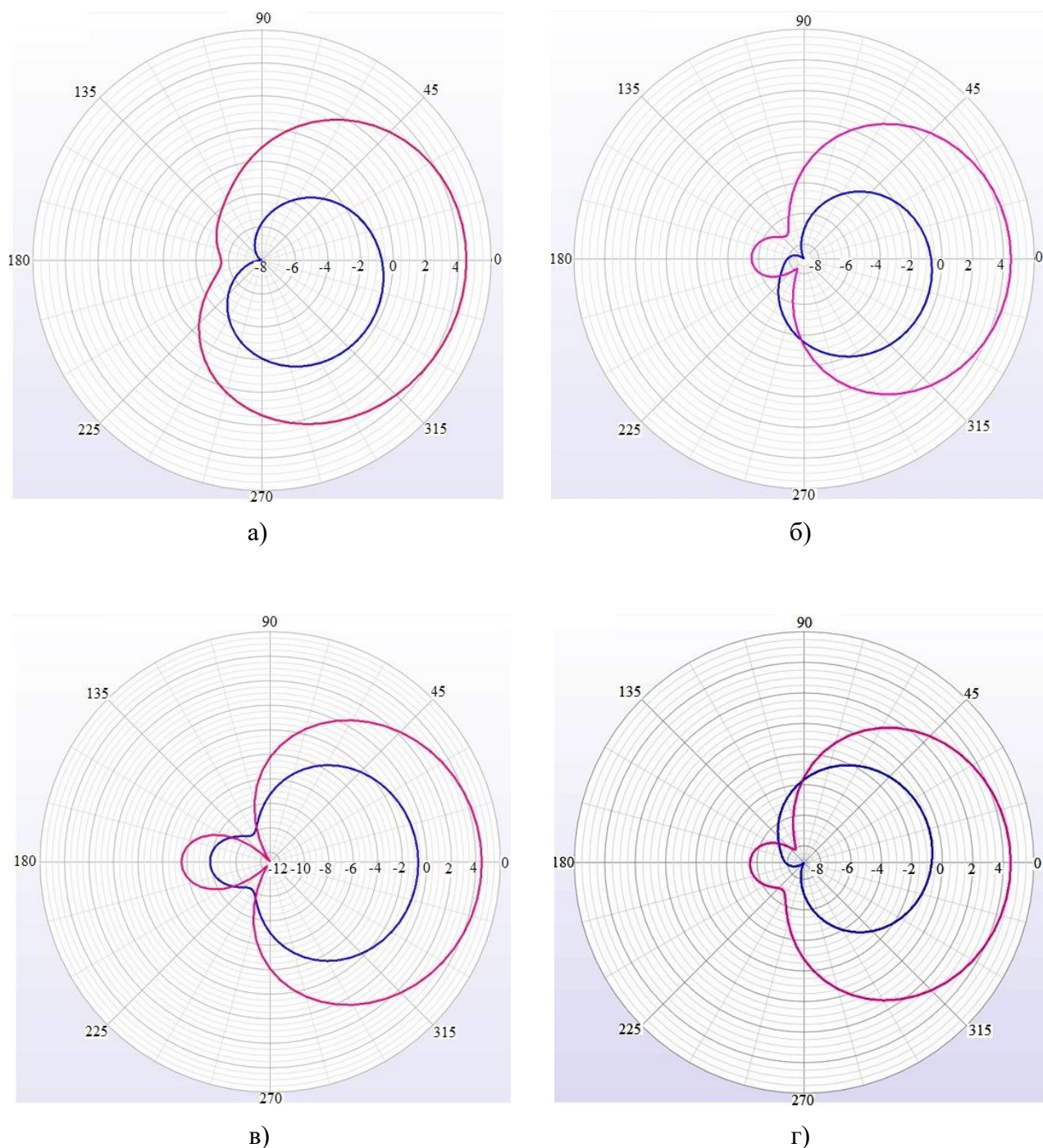


Рисунок 4.21 – КУ МПА 150/400 МГц: а) при $\varphi=0^\circ$, б) при $\varphi=45^\circ$,
в) при $\varphi=90^\circ$, г) при $\varphi=135^\circ$

Полученные в ходе моделирования результаты удовлетворяют техническому требованию на антенную систему КА «Ионосфера» и не хуже чем в случае одиночных излучателей (см. 4.1.3; 4.1.4). Более подробно полученные результаты электродинамического моделирования, а также особенности построения конструкции предложенной двухчастотной МПА приведены в [156].

Таким образом, разработана и предложена модель бортовой, планарной, миниатюрной, двухчастотной МПА.

4.2 Сравнение антенных систем малого КА «Ионосфера»

Проведём сравнительный анализ двух разработанных антенных систем, а именно антенной системы КА «Ионосфера», состоящей из спиральной, штыревой и вибраторной антенн, и антенной системы КА «Ионосфера», состоящей из МПА [157].

На рисунке 4.22 представлен исходный вариант построения антенной системы малого КА «Ионосфера», а на рисунке 4.23 представлена предлагаемая антенная система для малого КА «Ионосфера» [158].

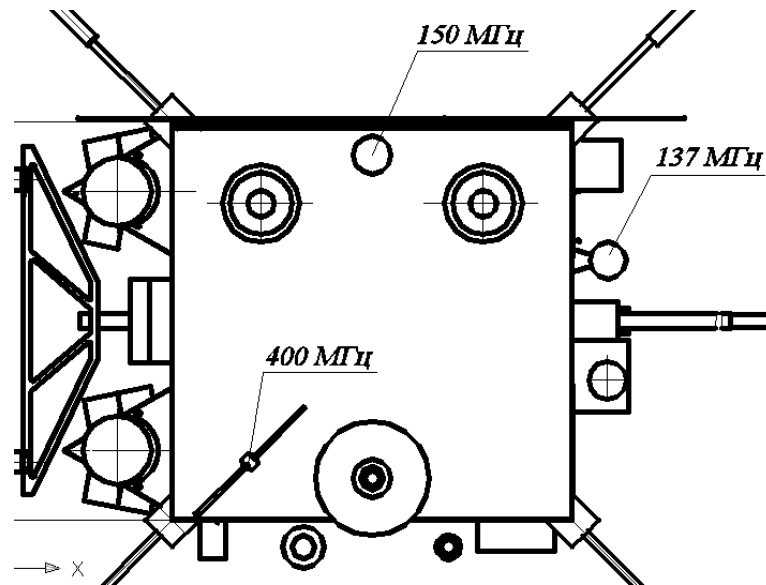


Рисунок 4.22 – Исходная антенная система малого КА «Ионосфера»

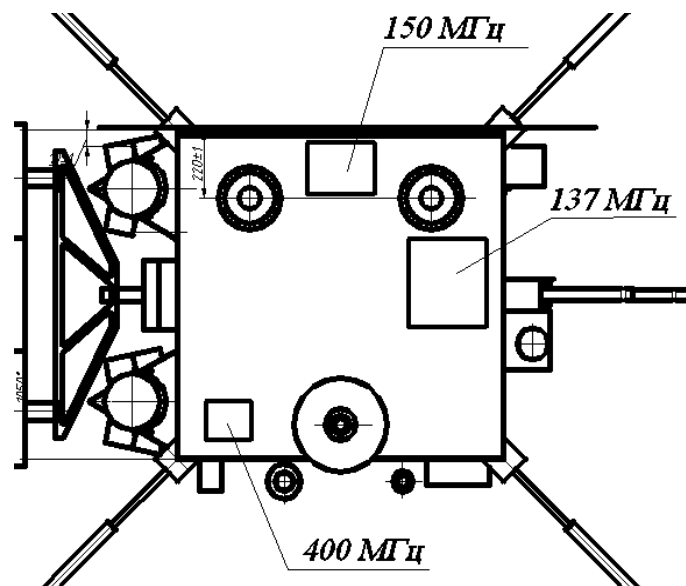


Рисунок 4.23 – Предлагаемая антенная система малого КА «Ионосфера»

Сравнение двух антенных систем малого КА «Ионосфера» приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Характеристики исходной антенной системы КА «Ионосфера» и предлагаемой антенной системы КА «Ионосфера»

№ по п/п	Параметры сравнения	Типы антенн		Требования по ТЗ	Типы антенн		Требования по ТЗ	Типы антенн		Требования по ТЗ
		Спиральная антенна	МПА		Штыревая антенна	МПА		Вибраторная антенна	МПА	
1	Рабочая частота	137 МГц	137 МГц	соответствует	150 МГц	150 МГц	соответствует	400 МГц	400 МГц	Соответствует
2	КСВ	Не более 1,4	Не более 1,4	соответствует	Не более 2	Не более 2	соответствует	Не более 2	Не более 2	соответствует
3	Рабочая полоса частот, МГц	$137 \pm 0,1$ МГц	$137 \pm 2,5$ МГц	соответствует	$150 \pm 1,92$ МГц	150 ± 2 МГц	соответствует	$400 \pm 5,12$ МГц	$400 \pm 7,5$ МГц	соответствует
4	Поляризация	круговая	круговая	соответствует	линейная	линейная	соответствует	линейная	круговая	соответствует
5	ДН	преимущественно излучением в конусе рабочих углов $\pm 60^\circ$ от надира и 360° по азимуту	в пределах $0^\circ-60^\circ$ от надира $0^\circ-360^\circ$ по азимуту	соответствует	преимущественно излучением в конусе рабочих углов $\pm 45^\circ$ от надира и 360° по азимуту и с нулевым провалом в направлении «-Z»	направление на центр Земли в пределах $0^\circ-45^\circ$ от надира и $0^\circ-360^\circ$ по азимуту	соответствует	преимущественно излучением в конусе рабочих углов $\pm 45^\circ$ от надира и 360° по азимуту	направление на центр Земли в пределах $0^\circ-45^\circ$ от надира и $0^\circ-360^\circ$ по азимуту	соответствует

6	КУ	Не менее 1,0 дБ в конусе рабочих углов $\pm 60^\circ$ относительно оси «-Z» и, не менее минус 8,0 дБ в направлении оси «-Z» КА	в направлении и центра Земли не менее 4 дБ, а в направлении и $0^\circ-70^\circ$ не менее 1 дБ	соответствует	Не менее - 3дБ с неравномерностью не более 6 дБ в конусе рабочих углов $\pm 45^\circ$ от надира и 360° по азимуту	в направлении центра Земли 1 дБ, а в направлении и $0^\circ-45^\circ$ не менее 0 дБ	соответствует	Не менее - 3дБ с неравномерностью не более 6 дБ в конусе рабочих углов $\pm 45^\circ$ от надира и 360° по азимуту	в направлении центра Земли 5 дБ, а в направлении $0^\circ-45^\circ$ не менее 2 дБ	соответствует
6	Габариты	1031×96×96 мм	250×280×20 мм	соответствует	366×25×25 мм	220×165×20 мм	соответствует	346×244×35 мм	148×125×20 мм	соответствует
7	Масса	1,64 кг	2,9 кг	соответствует	0,26 кг	1,5 кг	соответствует	0,5 кг	0,7 кг	соответствует
8	Способ установки антенны	С помощью кронштейна	Непосредственно на поверхности	соответствует	С помощью подставки	Непосредственно на поверхности	соответствует	Непосредственно на поверхности	Непосредственно на поверхности	соответствует

Из приведённых данных в таблице 4.1 очевидно, что:

- предложена и спроектирована малогабаритная, невыступающая, простая, надёжная и высокотехнологичная антенная система малого КА, составленная из МПА;
- полученные характеристики направленности бортовой МПА не хуже, а в некоторых случаях даже лучше. Например, обеспечен минимальный КСВ, широкую полосу рабочих частот, достаточно широкая ДН, высокий КУ, что обеспечивает запас по указанным параметрам при размещении этих антенн на поверхности КА с учётом всех приборов и элементов КА;
- для установки МПА на поверхности КА не требуются дополнительные элементы в виде кронштейнов, подставок и т.д., что в свою очередь способствует повышению надёжности работоспособности антенной системы.

4.3 Моделирование антенной системы сверхмалых КА

В настоящий момент, помимо интереса к малым КА (стартовой массой от 100 кг до 500 кг), существует потребность и сверхмалых КА (стартовой массой не более 50 кг), например, «CubeSat», «TabletSat» и др. [159, 160].

«CubeSat» – формат малых (сверхмалых) КА для исследования космоса. КА CubeSat обычно имеют объем до 1 литра и массу, не превышающую 1.33 кг или немного больше. Относительная легкость создания и небольшая стоимость сделала такие спутники доступными для массового производства. В таблице 4.2 приведены характеристики данного класса сверхмалых КА.

Таблица 4.2 Размеры и вес сверхмалых КА «CubeSat»

Обозначение	Размеры	Вес
1U	100×100×113,5 мм	до 1,33 кг
2U	100×100×226,5 мм	до 2,67 кг
3U	100×100×340,5 мм	до 4 кг
4U	100×100×533,5 мм	до 5,33 кг
5U	100×100×665,5 мм	до 6,67 кг
6U	100×200×340,5 мм	до 8 кг

Существуют разные способы выведения этих КА на орбиту. Как правило, их запускают по несколько единиц РН или с борта космических кораблей (пилотируемых и автоматических грузовых космических кораблей и орбитальных станций). Некоторые компании предоставляет услуги по выводу КА на орбиту, например, ISC Kosmotras и Eurokot. Существуют многоместные контейнеры-платформы с револьверным выводом на орбиту для размещения на РН, космическом корабле или орбитальной станции и запуска.

На рисунке 4.24 представлены КА «CubeSat» различных форматов.

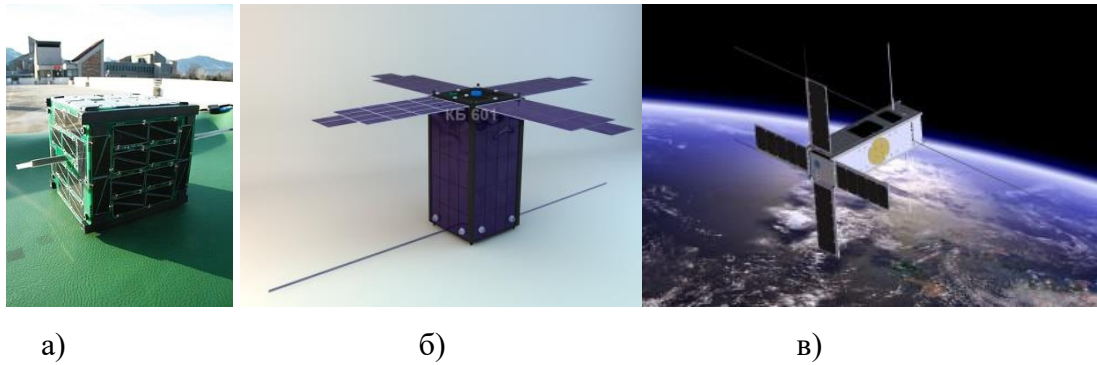


Рисунок 4.24 – Сверхмалый КА «CubeSat»:
а) формата 1 U; б) формата 2 U; в) формата 3 U

4.3.1 Моделирование антенной системы сверхмалого КА «CubeSat»

Как и при моделировании бортовых антенн, входящих в состав антенной системы малого КА «Ионосфера» (см. 4.1), при моделировании бортовых антенн сверхмалого КА «CubeSat» был применён метод конечных элементов.

Как правило, для осуществления связи с бортом применяется любительские частоты 435–438 МГц УКВ диапазона спутниковой связи. Бортовая антенная система состоит и из навигационной антенны (ГЛОНАСС, GPS).

На рисунке 4.25 представлены исследуемые электродинамические модели связной бортовой антенны сверхмалого КА.

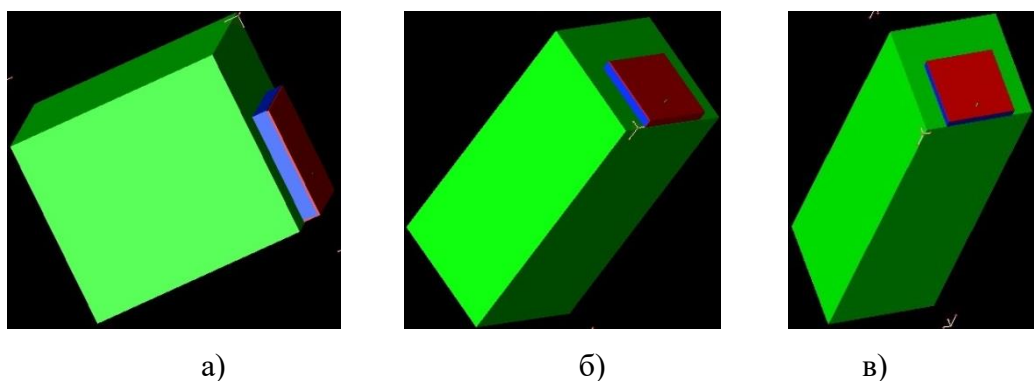


Рисунок 4.25 – Модели бортовой связной МПА сверхмалого КА «CubeSat»:
а) формата 1 U; б) формата 2 U; в) формата 3 U

Как видно из рисунка 4.24, моделирование осуществлялось на поверхности КА трёх форматов, а именно 1U, 2U и 3U, так как это наиболее используемые в настоящий момент форматы сверхмалого КА «CubeSat». Габариты модели составили 59×59 мм, толщина

8 мм, материал диэлектрика ФЛАН–10 ($\varepsilon = 10$; $\text{tg } \delta = 1,5 \times 10^{-3}$). При построении данной модели также был использован предложенный ранее способ миниатюризации УКВ МПА (см. 2.6.2).

На рисунке 4.26 представлены зависимости КСВ модели антенны от частоты.

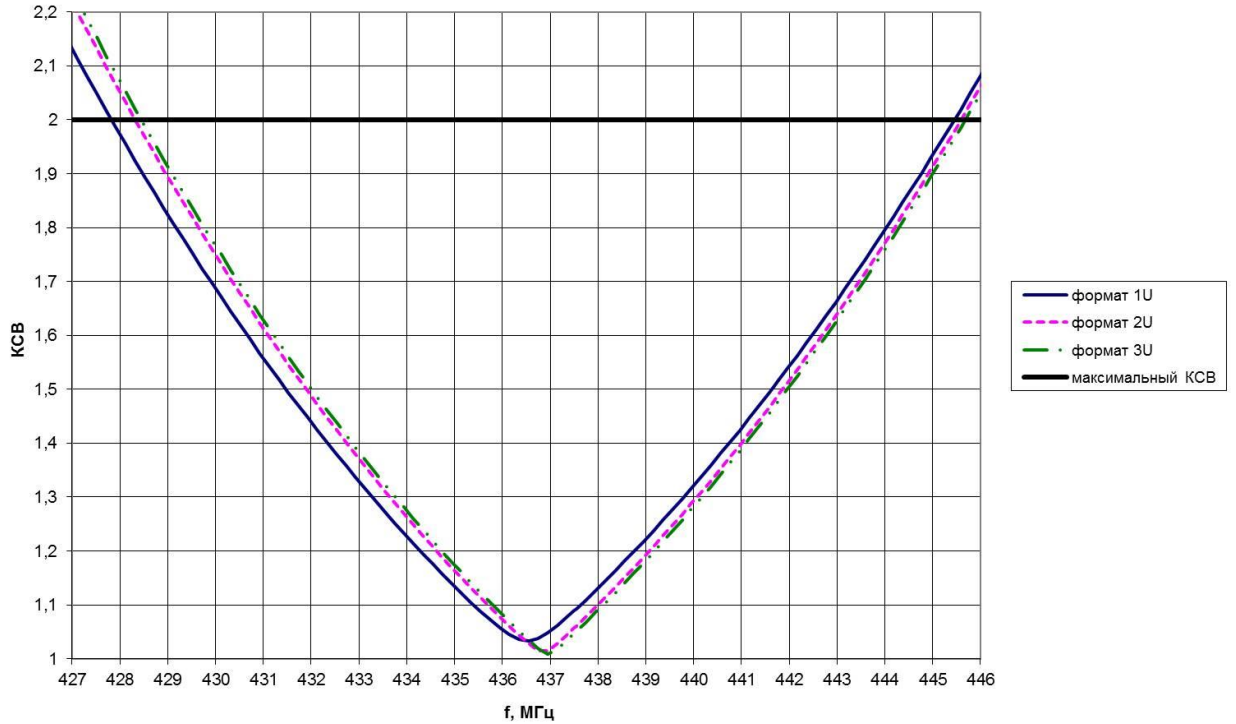
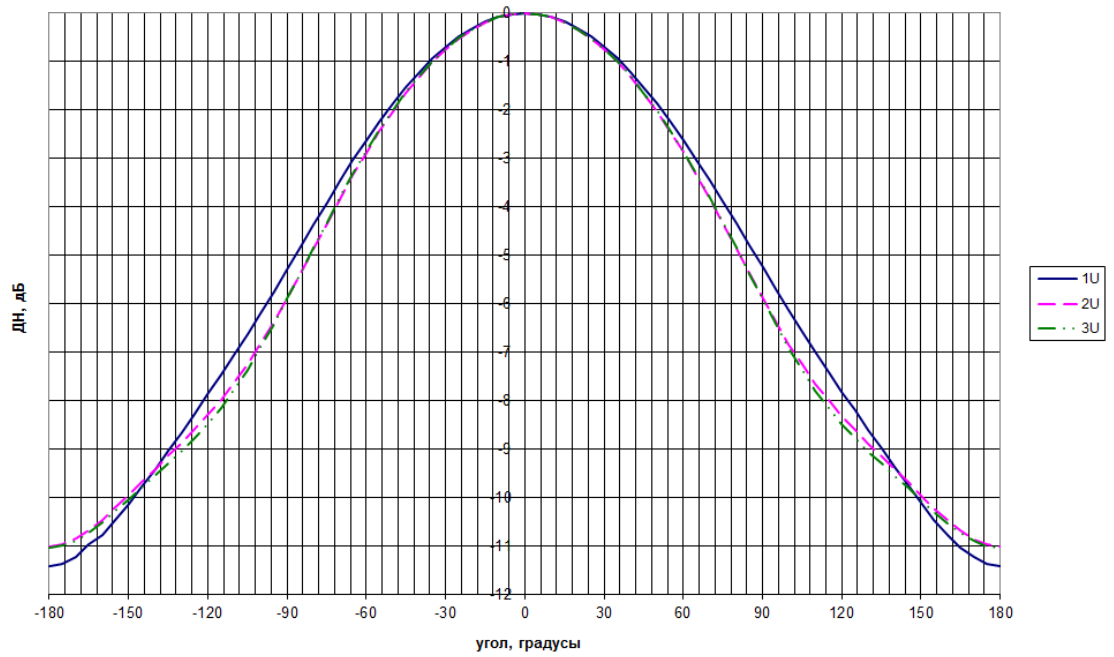


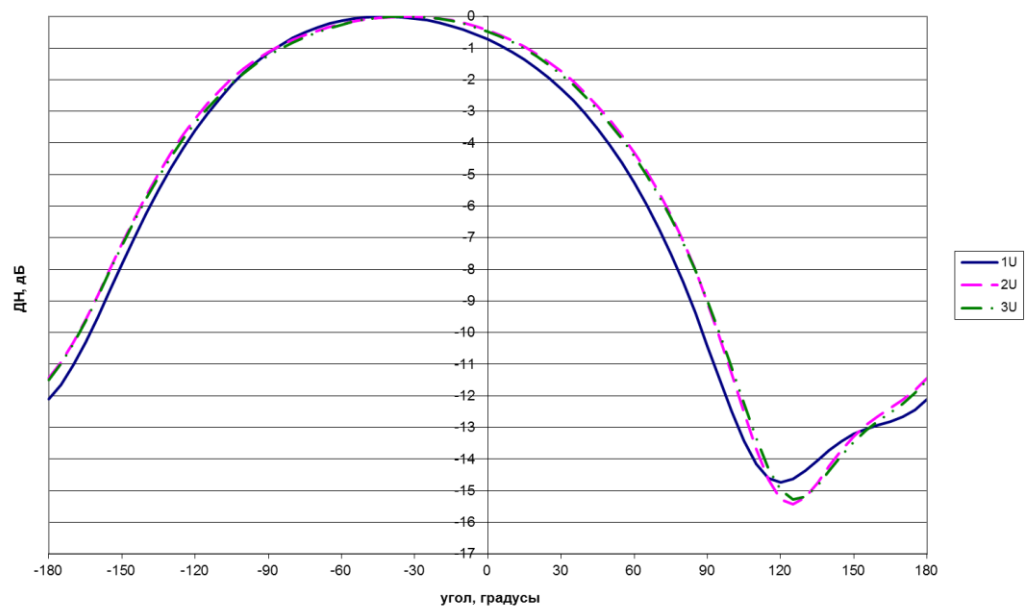
Рисунок 4.26 – КСВ модели бортовой связи МПА сверхмалого КА «CubeSat» от частоты

Как видно из рисунка 4.26, влияние габаритов корпуса КА на КСВ бортовой антенны незначительное. С увеличением габарита наблюдается смещение частоты вправо по частотной оси. Однако, благодаря хорошему согласованию за счёт подбора месторасположения запитывающего штыря (точки запитки), на рабочих частотах 435–438 МГц КСВ минимален (см. рис. 4.25), что соответствует предъявляемым требованиям по согласованию к бортовым антеннам малых КА (см. 1.5.2).

На рисунке 4.27 представлена ДН модели антенны.



а)



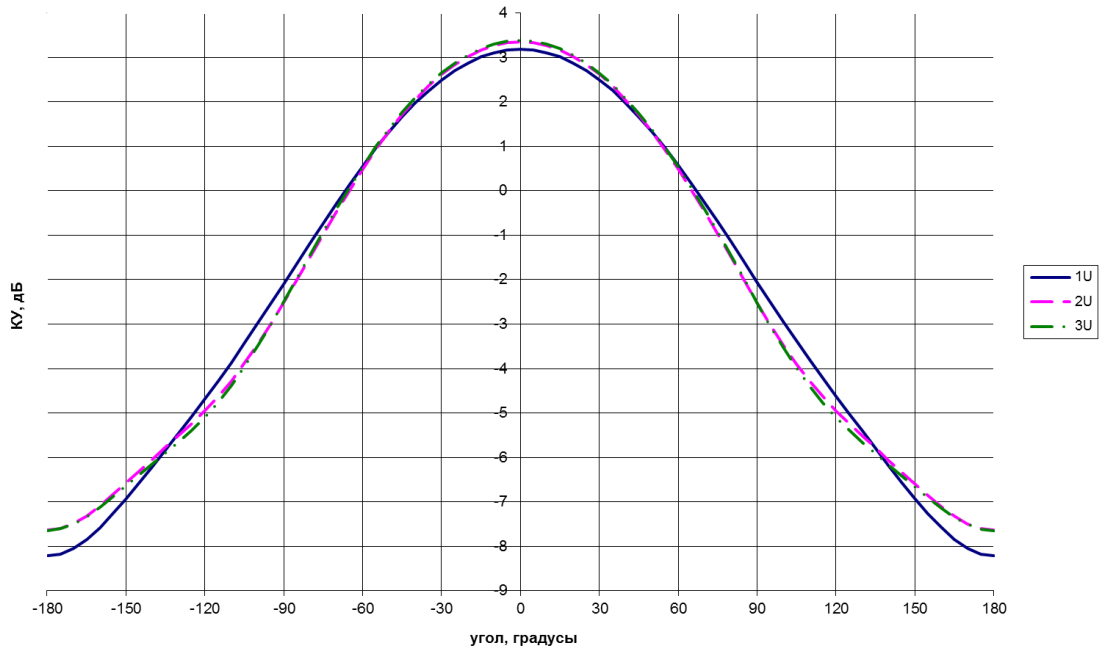
б)

Рисунок 4.27 – ДН модели бортовой связной МПА сверхмалого КА «CubeSat»:

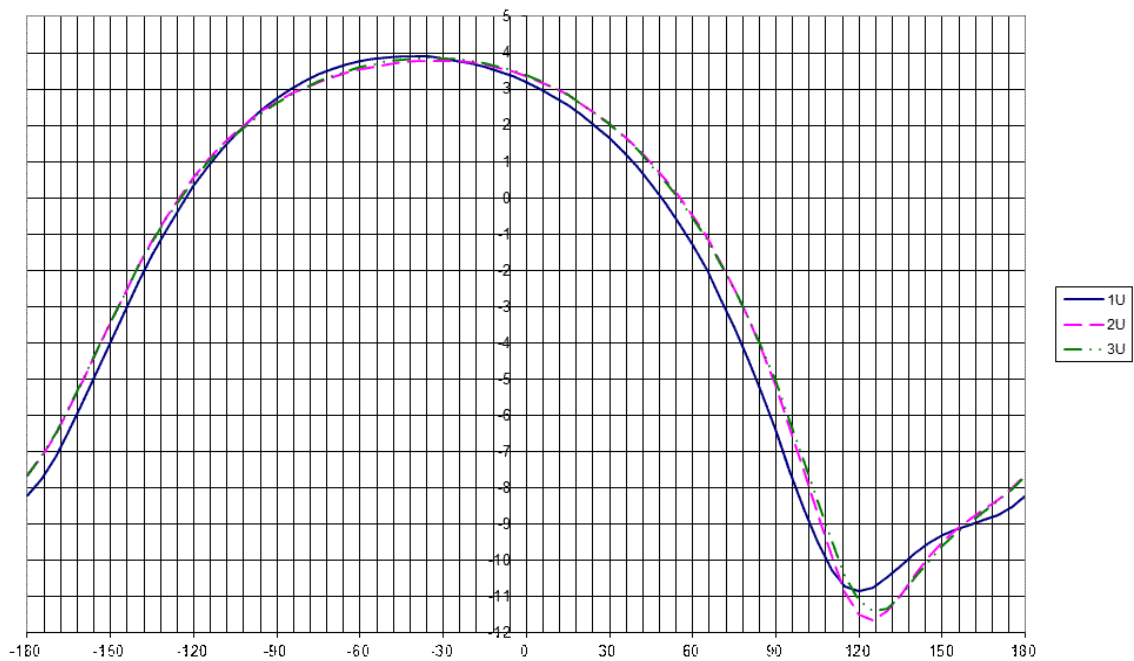
а) при $\varphi=0^\circ$; б) при $\varphi=90^\circ$

Из рисунка 4.27 видно, что в пределах рабочих углов $\pm 60^\circ$, согласно предъявляемому требованию к ДН антенн малых КА (см. 1.5.1), изменение габаритов самого КА не значительно влияет на ширину и форму ДН бортовой МПА и составляет менее 1 дБ (см. рисунок 4.26а)).

На рисунке 4.28 показан КУ антенны.



а)



б)

Рисунок 4.28 – КУ модели бортовой связной МПА сверхмалого КА «CubeSat»:

а) при $\varphi=0^\circ$; б) при $\varphi=90^\circ$

Как видно из рисунка 4.28, что в пределах рабочих углов $\pm 60^\circ$, согласно предъявляемому требованию к КУ антенн малых КА (см. 1.5.1), изменение габаритов самого КА не значительно влияет на КУ бортовой МПА и составляет менее 0,5 дБ (см. рис. 4.27а) и рис. 4.27б)).

Результаты моделирования бортовой связной МПА сверхмалого КА «CubeSat» сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 Результаты моделирования МПА сверхмалого КА «CubeSat»

Параметры оценки	Предъявляемые требования			Полученный результат		
	1U	2U	3U	1U	2U	3U
Габариты, см	Не более 10×10×1			Не более 5,9×5,9×0,8		
Частотный диапазон, МГц	435–437 МГц			435–437 МГц		
КСВ	Не более 2			Не более 1,1		
Рабочая полоса частот, МГц	Не менее 3			18	17	25
ДН	полусфера			±60°		
КУ, дБ	В рабочем секторе углов			Плюс 3,3 дБ в направлении максимума излучения и плюс 0,5 дБ в секторе углов ±60°		

Таким образом, разработана малогабаритная, невыступающая, связанная бортовая МПА сверхмалого КА «CubeSat» с приемлемыми характеристиками направленности [161].

4.4 Экспериментальное исследование антенной системы класса малых КА

При разработке антенн часто используют экспериментальное исследование их характеристик на моделях. Практические указания по применению данного метода были впервые сформулированы М.С. Нейманом в 1934 г. [162].

Основные уравнения электродинамики (уравнения Максвелла), устанавливающие зависимость между величинами электромагнитного поля в среде, обладают линейностью. Из этого свойства выведен принцип электродинамического подобия, который заключается в том, что при изменении некоторых параметров поля и среды в определённом соотношении, характеристики излучения, такие, как, например, ДН или сопротивление излучения, остаются без изменения [1]. Отсюда следует, что исследовать характеристики какой-либо электромагнитной системы, например системы «антенна – КА», можно на модели, которая в каком-то масштабе является подобием реальной системы.

Обычно в качестве материала для моделей используется медь. Когда требуется ещё большая проводимость поверхности модели, её шлифуют или серебруют. В случае несоблюдения этих условий распределение токов по поверхности модели получается искажённым и ДН модели не соответствует ДН антенны реального объекта.

Метод моделирования даёт достаточно точные представления о характеристиках реальных антенн. В особенности это относится к характеристикам направленности и поляризационным характеристикам антенн. Метод моделирования в основном и используется для их исследования.

Масштаб моделирования выбирается произвольно, исходя из условий работы и наличия требуемой электронной аппаратуры. Масштаб моделирования в основном не сказывается на результатах измерений. Масштабы моделирования обычно берутся в пределах от 5 до 50.

Но, несмотря на всю ценность этого способа, его возможности всё-таки ограничены. Моделирование можно осуществить лишь для таких антенн, которые позволяют в силу своих сравнительно больших размеров изготовить с требуемой точностью геометрическое подобие реального устройства. Имитировать, например, антенные устройства, работающие в диапазоне СВЧ, на моделях практически очень трудно, а часто и не возможно [163].

Таким образом, метод электродинамического подобия заключается в том, что уменьшение или увеличение единиц измерения длины в l_0 раз в выражении для векторов поля у модели означает изменение картины поля в радиальных направлениях от модели, соответствующее укорочению или увеличению λ в l_0 . А зависимость от полярных углов сохраняется одинаковой у антенны и модели. Следовательно, ДН и КНД одинаковы у модели и антенны [1, 164].

4.4.1 Схема измерительной установки

Измерение характеристик направленности бортовых МПА проводилось на территории антенного полигона АО «НИИЭМ» в безэховой камере [46].

В ходе измерений использовано следующее оборудование:

- измерительная антенна Пб–23А (эталонная);
- измеритель КСВ и затухания «Обзор 304/1» фирмы «ПЛАНАР» г. Челябинск;
- координатно-поворотное устройство;
- технологические кабели;
- программное обеспечение для антенных измерений.

Измерения характеристик направленности проводились в соответствии с программой и методикой для космической продукции двойного назначения.

На рисунке 4.29 представлена измерительная установка для проведения измерений с применением метода эталонной антенны.



Рисунок 4.29 – Фото измерительной установки

Изменение положения модели КА меняется с помощью координатно-поворотного устройства в пределах полного телесного угла от 0° до 360° .

Расстояние между измерительной и испытываемой антенной вычисляется исходя из следующего соотношения:

$$L > \frac{2(D_1 + D_2)^2}{\lambda}, \quad (4.2)$$

где D_1 – максимальный размер раскрыва измерительной антенны; D_2 – размер модели КА; λ – длина волны измерительной антенны.

4.4.2 Измерение характеристик направленности бортовой МПА малых КА

Объектом испытаний выбрана МПА 150 МГц. Макет антенны в масштабе 1×10 , размещен на модели малого КА «Ионосфера» в масштабе 1×10 , как показано на рисунке 4.30.



Рисунок 4.30 – Фото макета малого КА «Ионосфера» в масштабе 1×10

На рисунке 4.31 представлена измеренная зависимость КСВ антенны от частоты.

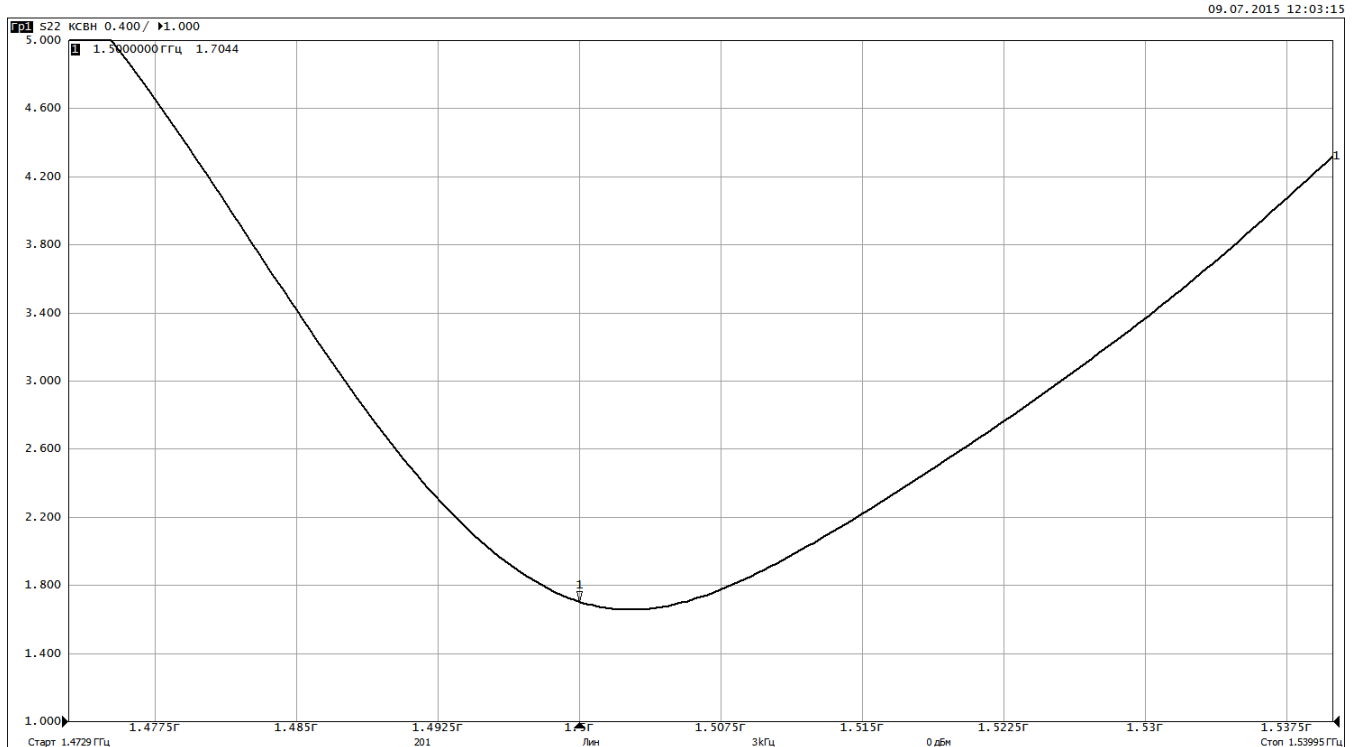


Рисунок 4.31 – КСВ бортовой МПА малого КА «Ионосфера»

На рисунке 4.32 показана связь бортовых антенн малого КА «Ионосфера» с системой координат при измерении её параметров.

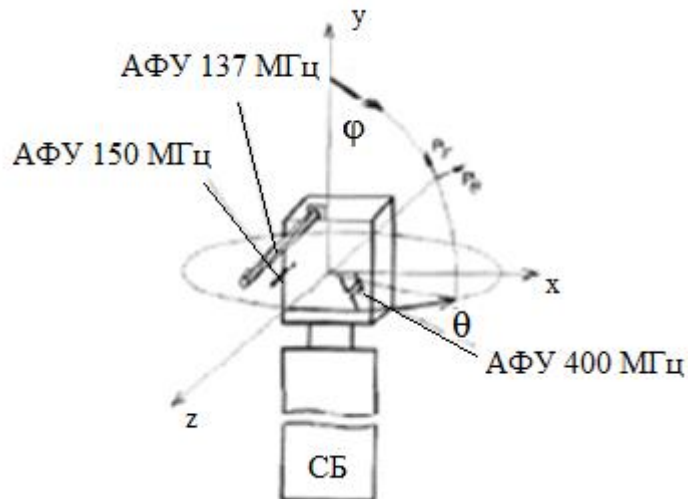
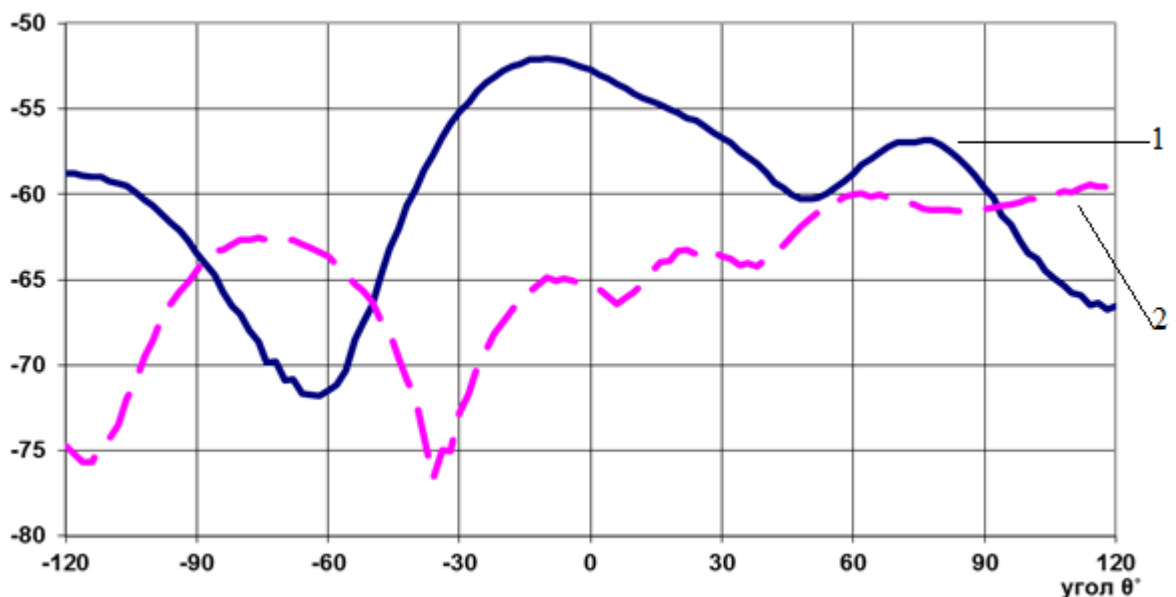


Рисунок 4.32 – Связь модели малого КА «Ионосфера» и бортовых антенн с системой координат при измерении ДН

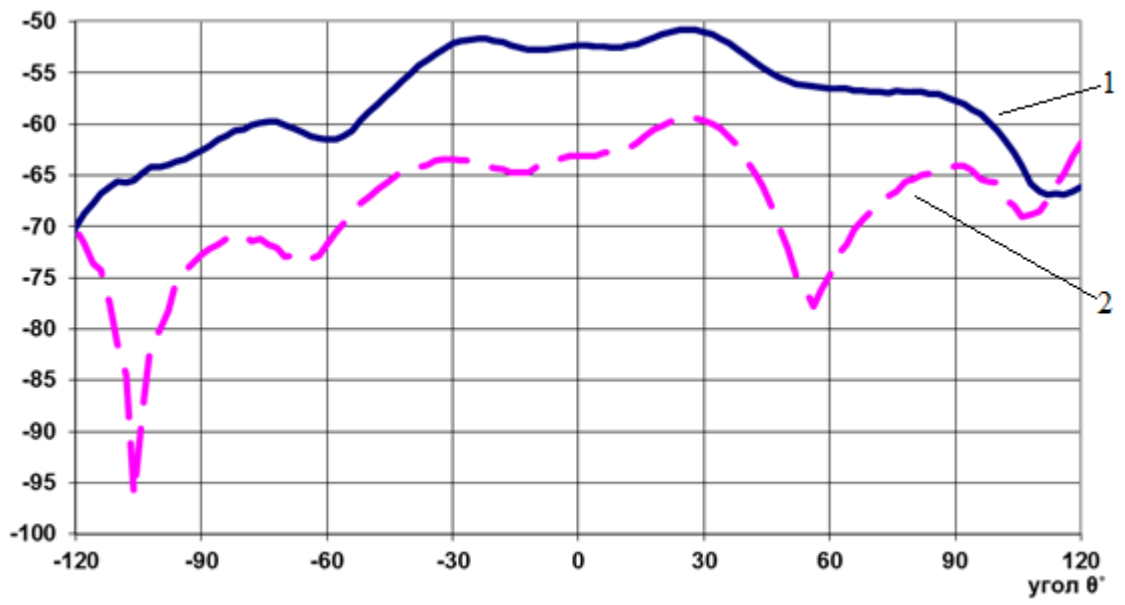
Измерение ДН проводилось путём измерения уровня принимаемого антенной сигнала от измерительной антенны на увеличенной в 10 раз частоте МПА 150 МГц (см. рис. 4.29). Размещена антенна на корпусе КА «Ионосфера» как показано на рисунке 4.30.

Измерение ДН проводилось фиксацией уровня мощности принимаемого испытываемой антенной сигнала от измерительной антенны линейной поляризации при её двух ортогональных положениях.

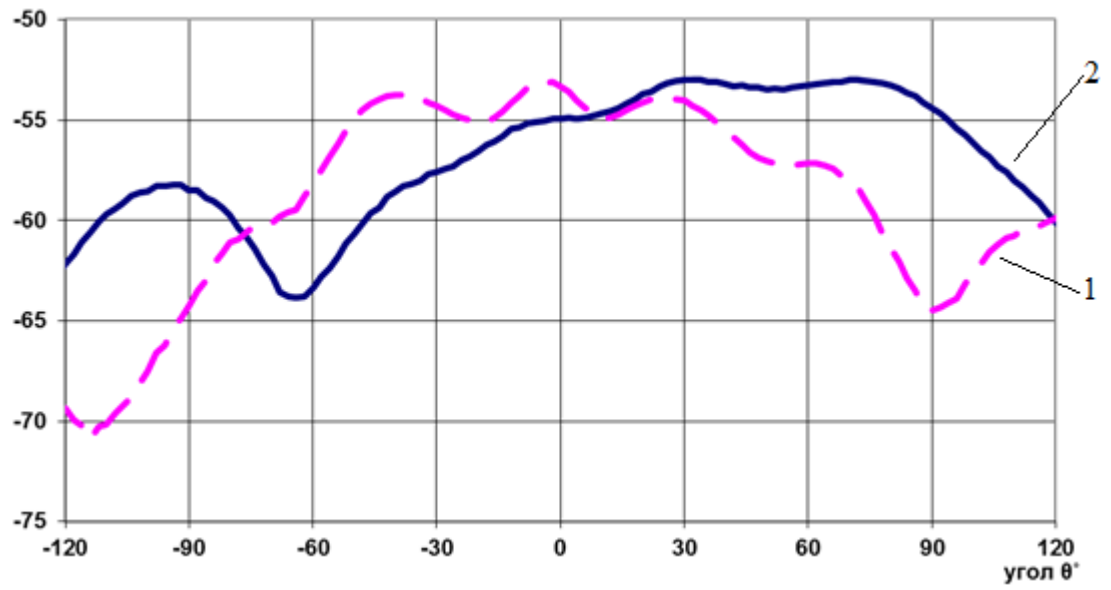
На рисунке 4.33 представлены измеренные ДН МПА 150 МГц при приёме на горизонтальную поляризацию эталонной антенны 1 и на вертикальную поляризацию эталонной антенны 2.



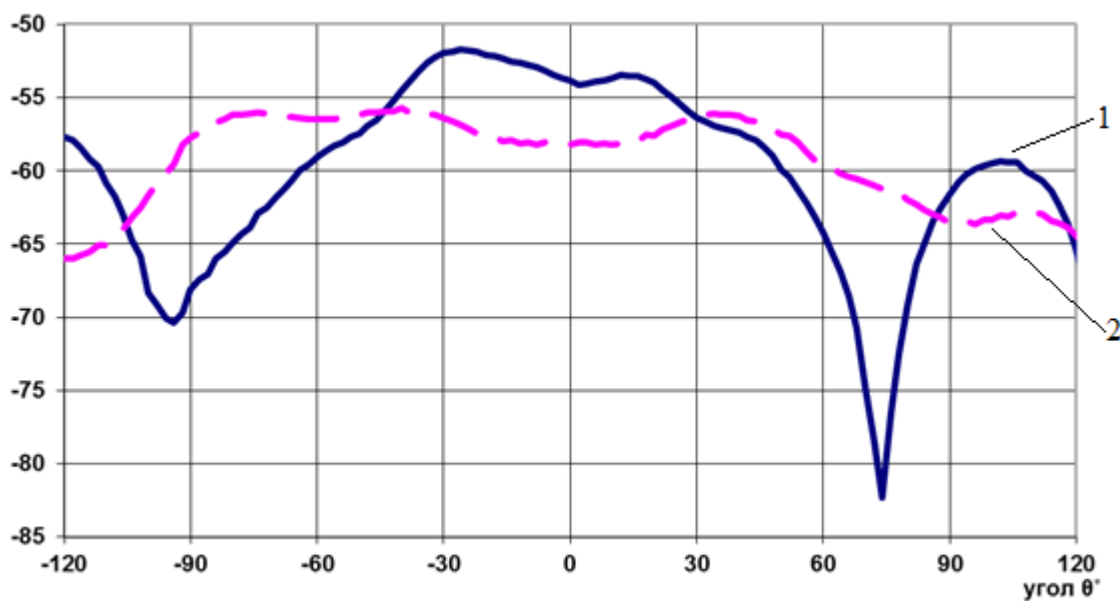
a)



б)



в)



г)

Рисунок 4.33 – Ненормированная ДН бортовой МПА малого КА «Ионосфера»:

а) $\varphi=0^\circ$; б) $\varphi=90^\circ$; в) $\varphi=45^\circ$; г) $\varphi=135^\circ$

Из представленных результатов на рисунках 4.33а–г) видно, что измеренные ДН антенны имеют искажённый (изрезанный) вид, что в свою очередь вызвано влиянием корпуса малого КА «Ионосфера», размещённых вокруг бортовой антенны целевой аппаратуры и элементов конструкции малого КА (см. рис. 4.23), а также конструктивными особенностями самой МПА.

Более подробно результаты экспериментального исследования характеристик направленности (КСВ, ДН, КУ) бортовой МПА 150 МГц малого КА «Ионосфера» представлены в [163].

4.4.3 Измерение характеристик направленности бортовой МПА сверхмалых КА

Объектом испытаний выбрана связная МПА 435 МГц для сверхмалых КА «CubeSat» формата 1U. МПА 435 МГц в масштабе 1×1 была размещена на корпусе КА, как показано на рисунке 4.34.



Рисунок 4.34 – Фото МПА 435 МГц сверхмалого КА «CubeSat» формата 1U

На рисунке 4.35 представлена зависимость КСВ исследуемой антенны от частоты.

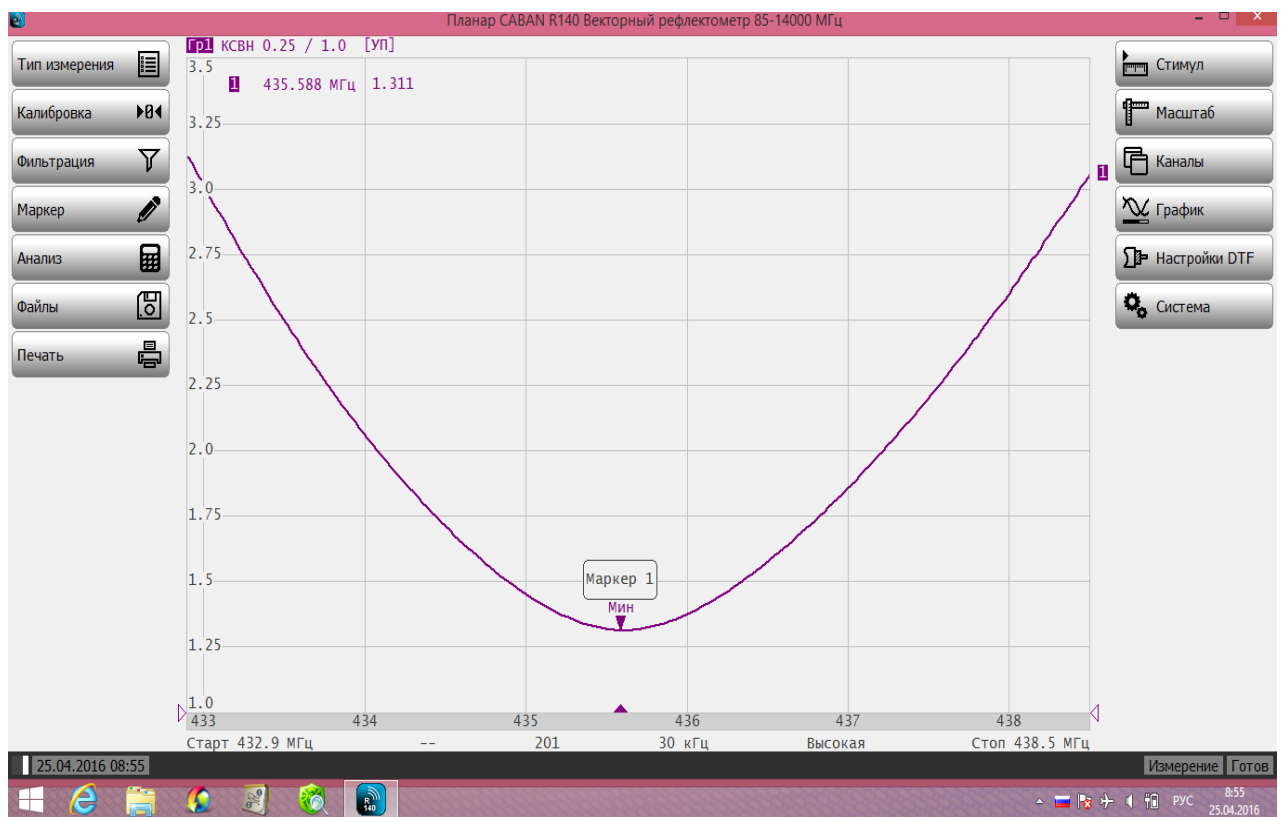
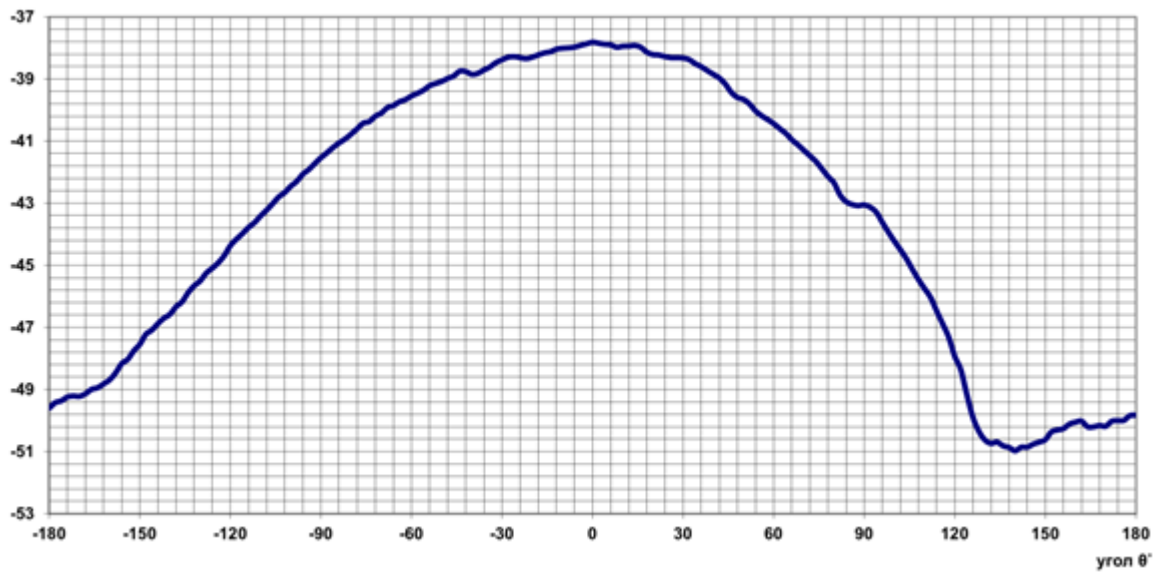
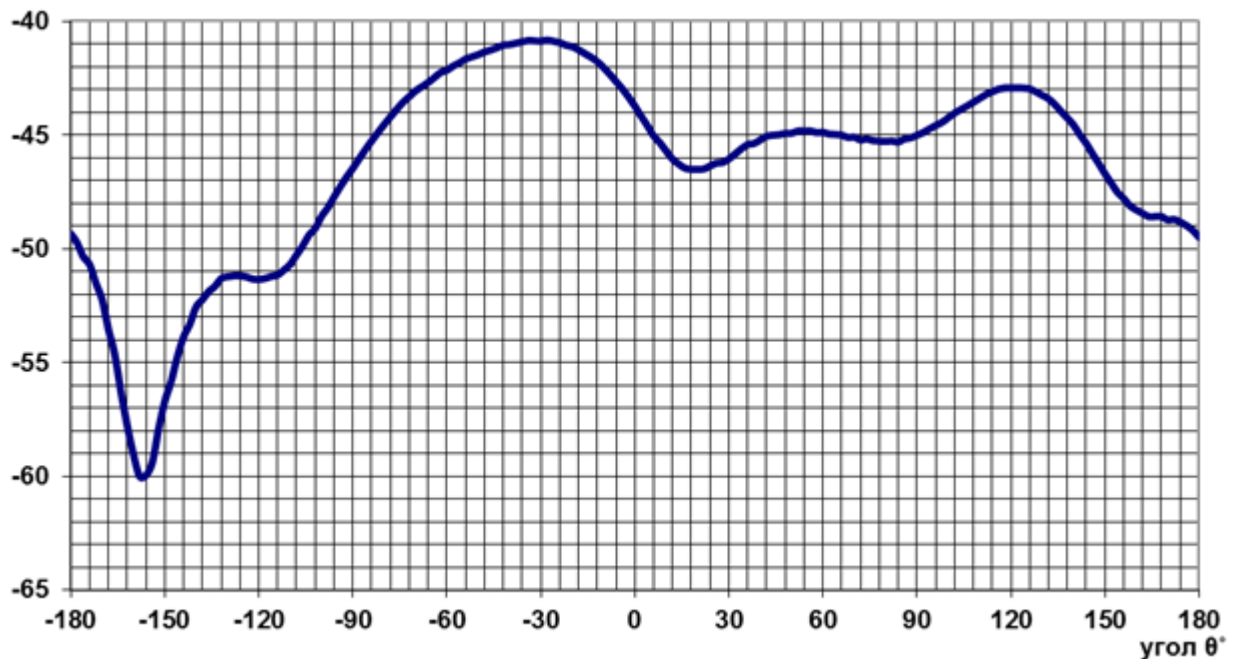


Рисунок 4.35 – КСВ МПА 435 МГц сверхмалого КА «CubeSat» формата 1U от частоты

А на рисунке 4.36 приведены ДН антенны.



а)



б)

Рисунок 4.36 – Ненормированная ДН бортовой МПА сверхмалого КА «CubeSat» формата 1U:

а) $\varphi=0^\circ$; б) $\varphi=90^\circ$

Из представленных результатов на рисунках 4.36а–б) видно, что измеренные ДН антенны имеют искажённый (изрезанный) вид, как и в случае с бортовой МПА малого КА «Ионосфера», что в свою очередь вызвано влиянием корпуса сверхмалого КА «CubeSat» формата 1U, размещённых вокруг бортовой антенны элементов конструкции малого КА (см. рис. 4.34), а также конструктивными особенностями самой МПА.

В ходе экспериментального исследования были получены следующие значения КУ бортовой МПА 435 МГц сверхмалого КА «CubeSat»:

- КУ=3,2 дБ в направлении максимума излучения;
- КУ=0,5 дБ в рабочем секторе углов $\pm 60^\circ$.

В ходе эксперимента исследован и КЭ бортовой МПА малых КА. На рисунке 4.37 представлена зависимость КЭ МПА от частоты.

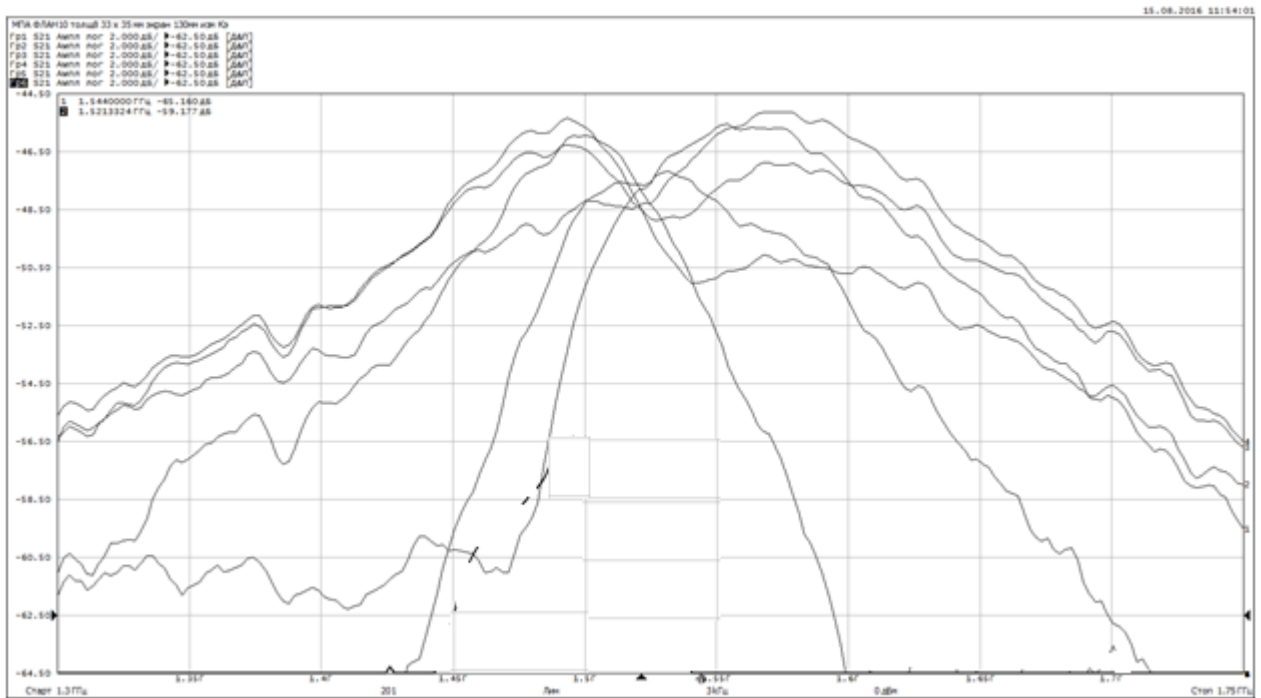


Рисунок 4.37 – КЭ МПА

Из представленного рисунка 4.37 видно, что КЭ МПА не менее 1 дБ на частоте 1544 МГц. Более подробно конструкция самой антенны и результаты измерений КЭ приведены в работе [165].

Ниже приводится сравнение экспериментальных и расчётных характеристик антенн.

4.4.4 Анализ полученных результатов

При проведении электродинамического моделирования были получены зависимости КСВ от частоты бортовых МПА 150 МГц малого КА «Ионосфера» и сверхмалого КА «CubeSat», представленные на рисунке 4.9 и рисунке 4.26 соответственно. А на рисунке 4.31 и рисунке 4.33 представлены результаты экспериментального исследования указанных бортовых антенн. Таким образом, были получены следующие значения:

- КСВ модели МПА 150 МГц=1,1; КСВ модели МПА 435 МГц=1,1
- КСВ МПА 150 МГц=1,7; КСВ МПА 435 МГц=1,3.

При сравнении полученных результатов видно, что электродинамические модели лучше согласованы, чем исследуемые антенны. Это обусловлено тем, что при проведении электродинамического моделирования не были учтены элементы конструкции КА (солнечные батареи, откидные штанги и т.д.), а также расположенные вокруг бортовой антенн элементы целевой аппаратуры. Тем не менее, полученные результаты удовлетворяют предъявляемым требованиям к бортовым антеннам класса малых КА $KCB < 2$ (см. 1.5.2).

На рисунках 4.10 а-г) и рисунках 4.27 а-б) соответственно представлены ДН антенн, полученные путём электродинамического моделирования, а на рисунках 4.33а-г) и рисунках 4.36а-б) измеренные ДН.

При сравнении полученных результатов видно влияние корпусов КА, элементов конструкции носителя и бортовой целевой аппаратуры на форму ДН. Тем не менее, полученные результаты удовлетворяют предъявляемым требованиям к бортовым антеннам класса малых КА, а именно ширина ДН $\pm 60^\circ$ в условиях ориентированного полёта малого КА (см. 1.5.1).

На рисунке 4.38 представлено сравнение ДН МПА, полученной при применении методики приближённого расчёта (см. 3.2), и измеренной ДН бортовой антенны сверхмалого КА «CubeSat».

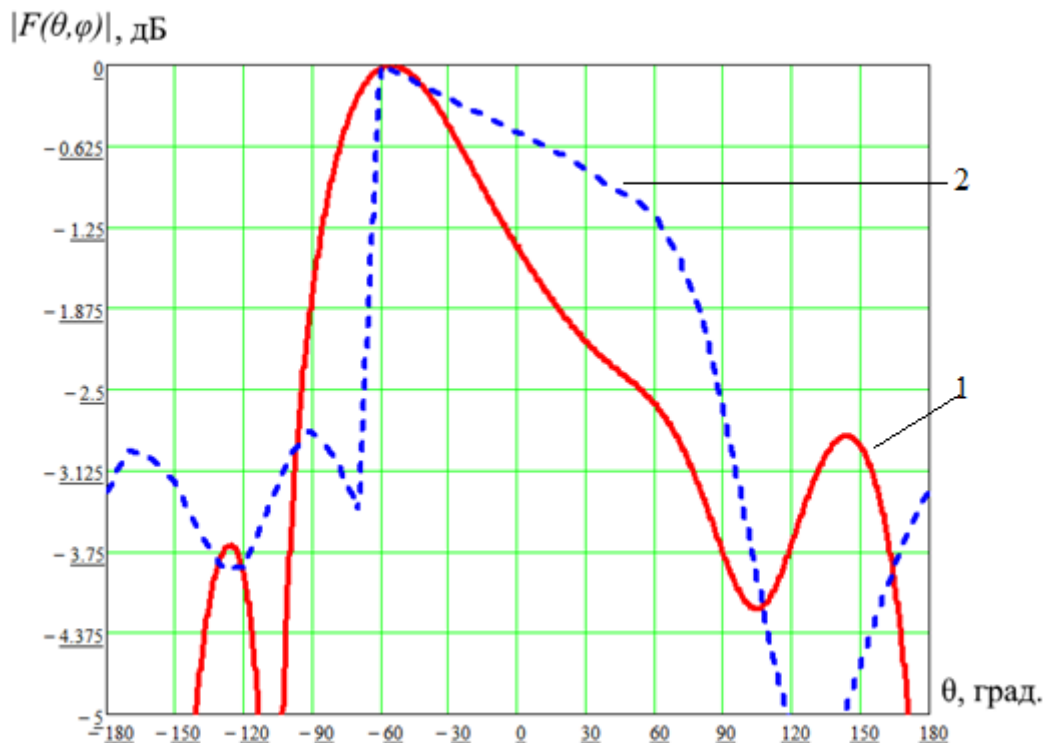


Рисунок 4.38 – Сравнение ДН бортовой МПА:
1 – теоретическая ДН; 2 – экспериментальная ДН

Следует отметить хорошее совпадение численного и натурального эксперимента в области главного максимума, что в свою очередь подтверждает применимость предложенной

приближённой методики расчёта характеристик направленности бортовых антенн малых КА для учёта влияния корпуса носителя на характеристики направленности данного класса антенн.

На рисунках 4.11а-г) и рисунках 4.28а-б) соответственно представлены КУ антенн, полученные путём электродинамического моделирования.

Экспериментально получены следующие результаты, например, для бортовой МПА сверхмалого КА «CubeSat»:

- КУ модели МПА 435 МГц=3,3 дБ в направлении максимума излучения и КУ модели МПА 435 МГц=0,5 дБ в рабочем секторе углов $\pm 60^\circ$;
- КУ=3,2 дБ в направлении максимума излучения и КУ=0,5 дБ в рабочем секторе углов $\pm 60^\circ$.

При сравнении полученных результатов видно хорошее совпадение, а также соответствие предъявляемым требованиям к бортовым антеннам класса малых КА, а именно КУ не менее минус 1 дБ в рабочем секторе углов $\pm 60^\circ$ (см. 1.5.1).

Приведённая зависимость МПА КЭ от частоты (см. рис. 4.37) показывает возможность разработки МПА с приемлемым значением КЭ для класса бортовых антенн малых КА.

В работах [73, 75] подробно представлены и рассмотрены радиационные условия на рабочей орбите малого КА «Ионосфера». Приведённые расчёты в указанных работах показывают возможность применения МПА в условиях радиации с возможностью длительной эксплуатации бортовой антенны в составе малого КА «Ионосфера».

Таким образом, разработаны бортовые, миниатюрные, планарные, одночастотные и многочастотные, с линейной и круговой поляризацией УКВ МПА, соответствующие предъявляемым требованиям по характеристикам направленности, согласованию, частотным характеристикам, массогабаритным показателям, а также по механическому, температурному воздействию и воздействию дестабилизирующих факторов космического пространства к бортовым антеннам малых КА для построения малогабаритной, невыступающей антенной системы класса малых КА.

4.5 Выводы по главе 4

1. Разработан и предложен способ построения МПА с круговой поляризацией, позволяющий упростить конструкцию антенн, сохранив при этом приемлемые характеристики направленности.
2. Разработаны модели МПА метрового и дециметрового диапазонов для применения в составе антенной системы малого КА «Ионосфера» и сверхмалого КА «CubeSat». Данные модели обладают высокими энергетическими параметрами, малым объёмом, отличаются простой и надёжной конструкцией и т.д.
3. Разработан и предложен способ построения многодиапазонных, планарных, миниатюрных МПА, позволяющий уменьшить объём антенны, сохранив при этом приемлемые характеристики направленности.
4. Проведено сравнение двух антенных систем малого КА «Ионосфера» и сверхмалого КА «CubeSat». Показаны преимущества предлагаемой бортовой антенной системы класса малых КА, состоящих из МПА.
5. Представлены результаты экспериментального исследования бортовых МПА малого КА «Ионосфера» и сверхмалого КА «CubeSat».
6. Проведено сравнение полученных результатов путём численного расчёта и экспериментальных исследований. Показана хорошая сходимость полученных результатов.

Заключение

В диссертационной работе предложена и разработана малогабаритная, невыступающая антенная система для класса малых КА. В том числе получены следующие результаты:

1. Определены требования к характеристикам направленности (КСВ, ДН, КУ, поляризационные свойства), согласованию, частотным характеристикам, массогабаритным и конструктивным параметрам антенн нового, развивающего класса малых КА.
2. Предложены малогабаритные, планарной конструкции, одночастотные, многочастотные, с линейной и круговой поляризацией УКВ МПА для класса малых КА, позволяющие заменить существующие бортовые антенны КА с целью снижения их массогабаритных параметров.
3. Предложено использование материала ФЛАН (фольгированного СВЧ-диэлектрика), удовлетворяющего условиям длительного воздействия повышенной и пониженной температуры, циклических температурных ударов, механического воздействия, радиации, т.е. дестабилизирующим факторам космического пространства.
4. Решена задача о влиянии корпуса носителя на характеристики направленности бортовых антенн малых КА путём аппроксимации поверхности носителя сферой, найти приближённое влияние корпуса малого КА на характеристики направленности бортовой антенны. Для этого проведено решение волновых уравнений в сферической системе координат для слабонаправленных бортовых антенн малых КА. Определено поле излучения антенны с учётом явления дифракции на носителе относительно малых размеров сферы (kr) и построены характеристики направленности.
5. Выполнено электродинамическое моделирование предложенных малогабаритных, планарной конструкции, одночастотных, многочастотных, с линейной и круговой поляризацией УКВ МПА для малых КА с помощью САПР.
6. Обеспечены требования к бортовым антеннам малых КА по характеристикам направленности (КСВ, ДН, КУ, поляризационные свойства), согласованию, частотным характеристикам, массогабаритным и конструктивным параметрам.
7. Показано выполнение обеспечения требований к характеристикам направленности (КСВ, ДН, КУ, поляризационные свойства), согласованию, частотным характеристикам, массогабаритным и конструктивным параметрам, предъявляемых к бортовым антеннам класса малых КА.
8. Проведено исследование предлагаемых УКВ МПА с применением аттестованных и поверенных приборов и методики измерений и испытаний космической продукции

двойного назначения на территории антенного полигона АО «НИИЭМ» в безэховой камере. Полученные в ходе измерений характеристики бортовых антенн малых КА приведены в работе.

9. Проведено сравнение результатов численного расчёта, электродинамического моделирования и эксперимента предлагаемых антенн для класса малых КА, которое подтвердило достоверность полученных результатов.
10. Основные результаты работы доложены и обсуждены на десяти международных, двух всероссийских и одиннадцати молодёжных конференциях, опубликованы в тринадцати российских журналах, рекомендованных ВАК; запатентованы и получены один патент на изобретение и два патента на полезную модель. Результаты диссертационной работы внедрены в разработках АО «НИИЭМ», а также в учебный процесс кафедры 406 МАИ (НИУ). Акты внедрения прилагаются.

Список сокращений

- АФУ – антенно–фидерное устройство
- ГКЛ – галактические космические лучи
- ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли
- ДН – диаграмма направленности
- ЕРПЗ – естественный радиационный пояс Земли
- КА – космический аппарат
- КГЧ – космическая головная часть
- КК – космический комплекс
- КПД – коэффициент полезного действия
- КСВ – коэффициент стоячей волны
- КУ – коэффициент усиления
- КЭ – коэффициент эллиптичности
- МПА – микрополосковая антенна
- РН – ракетоноситель
- СА – солнечная активность
- САС – срок активного существования
- СКЛ – солнечные космические лучи
- ЭВТИ – экранно–вакуумная теплоизоляция
- ЭМС – электромагнитная совместимость

Список литературы

1. Пригода Б.А., Кокунько В.С.. Антенны летательных аппаратов. М.: Воениздат. 1964 г. 120 с.
2. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Особенности бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов // Материалы научно-технического семинара «Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов». — Истра: ОАО «НИИЭМ». 2013. С. 55–58.
3. Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение // «Вопросы электромеханики». Труды ВНИИЭМ. 2005. Т. 102. С. 12–27.
4. Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Панченко В.А., Казинский Н.В., Кондранин Т.В., Негодяев С.С. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли. Сборник статей МФТИ. 2009. Т.1. №3. С. 14–22.
5. Гершензон В., Карпенко С. Малые спутники – провокация или перспективное направление? // Экология и жизнь. 2011. 12 (121). С. 51–57.
6. Овчинников М.Ю. Малые мира сего // Журнал «Компьютера». 2007. № 15. С.37–43.
7. Волков С.Н., Макриденко Л.А., Ходненко В.П. Малые космические аппараты НПП ВНИИЭМ. От концепции до воплощения в «металле» // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2011. Т. 121. №2. С. 3–8.
8. Перспективные спутники ВНИИЭМ – новая ступень в развитии орбитальной космической техники / Макриденко Л.А., Шустов Б.М. // Российский космос. М. 2011 №2 (62). С. 20–25.
9. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Ходненко В.П., Золотой С.А. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2010. Т.114. № 1. С. 15–26.
10. Зинченко О. Н. Малые оптические спутники ДЗЗ [Электронный ресурс] / О. Н. Зинченко // Ракурс, Москва, 2011. URL: http://www.racurs.ru/www_download/articles/Micro_Satellites.pdf

11. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» № 1. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ». 2011. – 110 с.
12. Международная тенденция создания и эксплуатации малых космических аппаратов / Лукьященко В.И., Саульский В.К., Шучев В.А. и др. // III Международная конференция – выставка «Малые спутники» 27–31 мая 2002 г. Королёв, Мос. обл. ЦНИИМАШ. – Кн.1.
13. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Миниатюризация бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов // Материалы научно-технического семинара «Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов». — Истра: ОАО «НИИЭМ». 2013. С. 51–54.
14. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенных систем малых космических аппаратов // Сборник трудов конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Научный совет РАН по распространению радиоволн. Муром, 2014. С. 114–118.
15. Анализ состояния работ по МКА наблюдения и возможностей использования их в интересах мониторинга природной среды / Пичурин Ю.Г. // Труды НИИ космических систем. – 2000.
16. Минаев И.В. Особенности создания космической техники в современных условиях. Часть 1. Общие положения // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2010. Т. 118. № 5. С. 29–22.
17. Минаев И.В. Особенности создания космической техники в современных условиях. Часть 2. Концептуальные основы анализа рисков // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 127. № 2. С. 15–20.
18. Кириченко Д.В., Половников В.И. Низкоорбитальная космическая система наблюдения за космическим мусором на базе группировки малых космических аппаратов // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 3. С. 19–22.
19. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 1: справочные материалы. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ». 2008.- 143 с.

20. Mars Program Independent Assessment Team (MPIAT) report. // National Aeronautics and Space Administration, California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory, Media Relations office, Pasadena, Calif: 91109, April, 4, 2000. – California, 2000. – URL: <http://www.jpl.nasa.gov>
21. Белоконов И.В., Тимбай И.А., Устюгов Е.В. Использование низковысотных группировок наноспутников для изучения геофизических полей: опыт участия в проекте QB50 // Механика, управление и информатика. 2015. Т. 7. № 4 (57). С. 29–36.
22. Потапов А.В., Карпенко С.О., Попов А.В., Ивлев Н.А., Сивков А.С., Власкин А.Л., Жумаев З.С., Андреевков Д.В. Микроспутниковая платформа ТаблетСат и микроспутник «ТаблетСат–Аврора» на её основе для проведения научных, технологических и образовательных экспериментов в космосе // Механика, управление и информатика. 2015. Т. 7. № 4 (57). С. 162–174.
23. Акционерное общество «Научно–производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ») <http://www.vniiem.ru/ru/>
24. Макриденко Л.А., Минаев И.В. Потюпкин А.Ю. Концептуальные особенности повышения целевой эффективности малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 141. С. 17–22.
25. Зимин И. И., Валов М. В., Яковлев А. В., Галочкин С. А. Малый космический аппарат «Михаил Решетнев». Результаты работы // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. Выпуск № 65.
26. Зимин И.И., Валов М.В. Разработка малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Электронный журнал «Труды МАИ». 2015. Выпуск № 81.
27. Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО «ИСС») <https://www.iss-reshetnev.ru/>
28. Институт космических исследований <http://chibis.cosmos.ru/index.php?id=1618>
29. Зелёный Л.М., Климов С.И., Ангаров В.Н., Назаров В.Н., Родин В.Г., Суханов А.А., Батанов О.В., Готлиб В.М., Калюжный А.В., Каредин В.Н., Козлом В.М., Козлов И.В., Эйсмонт Н.А., Ледков А.А., Новиков Д.И., Корепанов В.Е., Боднар Л., Сегеди П., Ференц

- Ч., Папков А.П., Проект микроспутник «Чибиc – М». Опыт создания и реализации // Механика, управление и информатика. 2015. Т. 7. № 4 (57). С. 91–118.
30. Государственным космическим научно-производственным центром им. М.В. Хруничева <http://www.khrunichev.ru/main.php?id=28>
31. Научно-производственным объединением им. С.А. Лавочкина http://www.laspase.ru/rus/zond_pp.php
32. Бойкачев В.Н., Рысин А.В., Наянов А.М., Нестерин И.М., Хоменко В.В. Многоканальный бортовой радиокomплекс микроспутника «ТЕХКОМсмартсат» // Материалы научно-технического семинара «Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов». — Истра: ОАО «НИИЭМ». 2013. С. 39–46.
33. Бойкачев В.Н., Хоменко В.В. Миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры и создание микроспутников // Механика, управление и информатика. 2015. Т. 7. № 4 (57). С. 47–53.
34. Частная космическая компания Dauria Aerospace <http://russia.dauria.ru/>
35. Спутниковые инновационные космические системы (ООО «СПУТНИКС») <http://www.sputnix.ru/ru/>
36. Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL) <http://www.sstl.co.uk/>
37. Skybox Imaging Inc <http://www.skyboximaging.com/>
38. «Конструкторское бюро «Южное» имени М.К. Янгеля» <http://www.yuzhnoye.com/>
39. Гершензон Е.В. Обзоры по микроспутникам «Технологические малыши завоевывают космос» [Электронный ресурс] // Сайт МГТУ им. Н.Э. Баумана Проект студенческого микроспутника. — М., 2008. — Режим доступа: <http://microsat.sm.bmstu.ru/source/mreview.html>
40. Проблемы антенной техники / Под ред. Бахраха Л.Д., Воскресенского Д.И.. — М.: Радио и связь. 1989. 368 с.
41. Vocharov V.S., Generalov A.G., Gadzhiev E.V. Antenna-feeder devices in the development of OJSC 'НИЕМ', ISTRA (MOSCOW REGION) // CriMiCo 2013 – 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings.2013. Pp. 46–47.

42. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Варианты построения бортовых антенн для зондирования поверхности из космоса // Антенны. 2015. № 4 (215). С. 3–8.
43. Vladimir Bocharov, Alexander Generalov, Elchin Gadzhiev. Application of printing technologies to design on-board antenna systems of spacecrafts // 40th COSPAR Scientific Assembly. 2014.
44. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн. – М.: Радиотехника. 2009. – 720 с.
45. C. C. Kilgus Shaped-Conical Radiation Pattern Performance of the Backfire Qudrifillar Helix / IEEE Trans on Antennas and Propagation. – 1975. – Pp. 392–397.
46. «Научно-исследовательский институт электромеханики» (АО «НИИЭМ») http://niiem.ru/index.php?option=com_content&view=article&catid=8&id=120
47. Нефёдов Е.И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. – М.: Издательский центр «Академия». 2010. 320 с.
48. Потапов А.А., Шифрин Я.С., Кузеев Р.Р. Генетические и самоаффинные методы проектирования фрактальных антенн // Антенны. Выпуск 3 (202). 2014. С. 25–48.
49. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логус. 2002.
50. URL:<http://terraelectronica.ru>
51. Панченко Б. А., Нефёдов Е. И. Микрополосковые антенны. – М.: Радио и связь, 1986. – 144 с.
52. Вейцель А.В., Вейцель В.А., Татарников Д.В. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: высокоточные антенны. Специальные методы повышения точности позиционирования / Под ред. Жодзишского. – М.: Издательство МАИ-ПРИНТ, 2010. – 368 с.
53. Устройство СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решёток: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. Воскресенского Д.И. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника. 2012. 744 с.
54. Бохин Д.Л. Широкополосный излучатель с широкой диаграммой направленности для антенных решёток с широкоугольным сканированием // Антенны. 2014. № 2 (201). С. 31–33.

55. Бохин Д.Л. Исследование характеристик широкополосных излучателей с диаграммой направленности, близкой к круговой // Антенны. 2014. № 2 (201). С. 34–37.
56. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Результаты лётных испытаний антенно-фидерных систем телекомандной системы КА «Канопус–В» №1 и Белорусского КА и пути усовершенствования их характеристик // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 4 (16). С. 5–12.
57. Деркачёв П.Ю., Мануилов М.Б. Электродинамический анализ активных фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона на основе излучателей Вивальди // Антенны. №9. 2012. С. 47–54.
58. Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Буй Као Нинь. Широкополосные антенны сотовых телефонов // Антенны. 2014. № 2 (201). С. 27–30.
59. Даутов О.Ш., Воробьев Н.Г., Салем Ибрагим. Эквивалентная схема щелевой антенны, возбуждаемой симметричной полосковой линией в объёмном резонаторе с однородным наполнением // Антенны. 2013. Выпуск 6 (193). С. 23–27.
60. Bocharov V.S, Generalov A.G., Gadzhiev E.V. Design problems of antenna system small spacecrafts // IEEE 26rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Pp. 1056–1062.
61. Воскресенский Д.И., В.Л. Гостюхин, Максимов В.М., Пономарёв Л.И. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника. 2008.
62. Виноградов А.Ю., Кабетов Р.В., Сомов А.М. Устройства СВЧ и малогабаритные антенны. – М.: Горячая линия – Телеком. 2012. – 440 с.
63. Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Антенны и ЭМС. – М.: Радио и связь. 1983. 272 с.
64. Фортескью П., Суайнерда Г., Старка Д. Разработка систем космических аппаратов. – М.: Альпина Паблишер, 2015. – 765 с.
65. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2-х книгах. Книга 2. М.: Техносфера, 2015. – 488 с.
66. Крэсснер Г.Н., Михаелс Дж. В. Введение в системы космической связи. М.: Связь. 1967. С. 392

67. Беляков И.Т., Борисов Ю.Д. Основы космической технологии. М.: Машиностроение. 1980. 185 с.
68. Dushman S., Lafferty J.M. Scientific Foundations of Vacuum Techniques. 2d ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1962, p.18
69. Тютнев А.П., Кочетов И.В., Семёнов В.Т., Безродных И.П. Квалификация электротехнических материалов, проводов и кабелей для применения на внешней поверхности космических аппаратов по критерию радиационной стойкости // Вопросы электромеханики. 2012. Т. 126. № 1. С. 29–35.
70. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций / В. К. Князев, Н. А. Сидоров, В. Г. Курбаков [и др.]. – М.: Советское радио, 1976. – 568 с.
71. Радиационная стойкость органических материалов: справочник / В. К. Милинчук, В. И. Тупиков, Б. А. Брискман [и др.]; под ред. В. К. Милинчука, В. И. Тупикова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
72. Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений / А. П. Тютнев, В. С. Саенко, Е. Д. Пожидаев, Н. С. Костюков. – М.: Наука, 2005. – 453 с.
73. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Казанцев С.Г., Кочетов И.В., Семёнов В.Т. Радиационные условия на орбите КА «Ионосфера» // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2011. Т. 123. № 4. С. 19–28.
74. Space charging currents and their effects on spacecraft systems / J. V. Reagan, R. E. Meyerott, E. E. Gaines [et al.] // IEEE Trans. Electrical Insul. – 1983. – Vol. 18. – № 3. – P. 354–365.
75. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А. Радиационные условия на геостационарной орбите // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2010. Т. 117. № 4. С. 33–42.
76. Воробьёв А.А., Зыкова Т.С., Спицын Д.Д., Удинцев Р.Д., Яневский В.Д., Казанцев С.Г. Моделирование воздействия микрометеоритов и фрагментов космического мусора на космические аппараты // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2011. Т. 120. № 1. С. 27–30.
77. Masur D.G. Enviromental tests for communication satellite components. Space Communications. 1962. Pp. 217–223.

78. Введенский Н.Ю., Пустобаев М.В. Анализ отработки космической техники на механическое воздействие в США, ЕС и РФ // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 130. № 5. С. 19–26.
79. Красова Н.А., Пустобаев М.В., Тютнев А.П. Отработка бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на ударные воздействия // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т. 132. № 1. С. 27–33
80. Грабилин А.О., Зубренков Б.И., Пустобаев М.В., Судомоев А.Д., Шматков А.В. Моделирование режимов ударного нагружения на аппаратуру космического аппарата при срабатывании пиротехнических средств разделения // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 138. № 1. С. 35–42.
81. Ричард Бейкер. Введение в теорию виброиспытаний. FM 26616 ISO 9001. LDS. 1994. 44 с.
82. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенных систем малых космических аппаратов // Сборник трудов конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред» Научный совет РАН по распространению радиоволн. Муром. 2014. С. 114–118.
83. Гаджиев Э.В. Пути построения малогабаритных, невыступающих бортовых антенных систем космических аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 76. С. 13.
84. «Научно-исследовательский институт космического приборостроения» (НИИ КП) <http://oaoniikp.ru/>
85. «Научно-исследовательский институт точного приборостроения» (АО «НИИ ТП») <http://www.niitp.ru/>
86. Опытное конструкторское бюро Московского энергетического института (АО «ОКБ МЭИ») <http://www.okbmei.ru/>
87. Космический комплекс «Ионозонд» [Электронный ресурс] URL: http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=469:-lr&catid=37:spaceprograms&Itemid=62
88. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Антенная система космического аппарата «Ионосфера» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 131. № 6. С. 11–14.

89. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Патент на полезную модель № 143825 от 24.03.2014 г. Приёмо-передающая спиральная антенна.
90. Петров А.С. Оценка характеристик миниатюрных печатных антенн // Антенны. 2013. Выпуск 3 (190). С. 22–29.
91. Чебышев В.В. Микрополосковые антенны в многослойных средах. – М.: Радиотехника, 2007. 160 с.
92. Бойко С.Н., Косякин С.В., Кухаренко А.С., Яскин Ю.С. Миниатюризация антенных модулей навигационной аппаратуры спутниковых навигационных систем // Антенны. 2013. Выпуск 12 (199). С. 38–43.
93. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Папилов К.Б. Малогабаритные печатные антенны круговой поляризации // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 8. С. 1–27.
94. Елизаров А.А., Закирова Э.А. Микрополосковая спиральная антенна с двусторонней круговой поляризацией. Патент на полезную модель № 133655 от 28.02.2013 г.
95. Antenna theory: analysis and design / Constantine A. Balanis. – 2-nd ed. – Wiley-Interscience, 1997. – 959 p.
96. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Патент на изобретение № 2583334 от 16.09.2014 г. Способ создания микрополосковых антенн метрового диапазона и устройство, реализующее этот способ.
97. ЗАО «Завод «Молдавизолит» <http://www.moldavizolit.com/rus/products.html>
98. Производственное объединение «Родонит» <http://rodonit.chepetsk.ru/production/fd.html>
99. Группа компаний «Энерго-Сфера» <http://energo-sfera.com/produksiya/folgirovannye-svch-materialy>
100. ООО «Росизолит» <http://www.rosizolit.ru/folgirovan.php>
101. Балтизолит http://baltizolit.ru/catalog/folder23/show29/dielektrik_folgirovannyiy_flan
102. Веселаго В.В. Электродинамика сред с одновременно отрицательными ϵ и μ // Успехи физических наук. 1967. Т. 92. С. 517–525.
103. Pendry J., Holden A., Stewart W., Youngs I. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 1. 76. P. 4773–4776.

104. Веселаго В.Г., Виноградов Е.А., Голованов В.И., Жуков А.А., Романов А.А., Капустян А.В., Урличич Ю.М., Лаврищев В.П. Волноводное распространение СВЧ-излучения в двухслойном метаматериале // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 5. С. 57–62.
105. Аджибеков А.А., Бредихин И.Ю., Капустян А.В., Жуков А.А., Алексеев О.А. Моделирование и проектирование в среде Ansoft HFSS малогабаритной антенны на основе метаматериала // Антенны. 2013. № 8 (195). С. 39–43.
106. Бобков Н.И., Пархоменко Н.Г. Компактный сверхширокополосный излучатель // I Всероссийская конференции Микроволновая конференция. 27–29 ноября 2013 г. М.: JRE – ИРЭ им В.А. Котельникова РАН. С. 111–115.
107. Майборода Д.В., Погарский С.А., Сапрыкин И.И., Сухов В.Н., Дроздов К.С. Многорезонаторная микрополосковая антенна // 23-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2013). Севастополь, 8–13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер. 2013. Т.2. С. 616–617.
108. Майборода Д.В., Погарский С.А., Сапрыкин И.И., Пшеничная С.В., Шарапов Д.С. Многорезонаторная микрополосковая антенна с излучателями сложной формы // 23-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2013). Севастополь, 8–13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер. 2013. Т.2. С. 618–619.
109. Круглов А.И., Климов К.Н. Двухслойная патч-антенна с запиткой через металлизированные отверстия // 23-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2013). Севастополь, 8–13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер. 2013. Т.2. С. 574–575.
110. Папилов К.Б. Численный анализ микрополосковых печатных антенн. Журнал Радиоэлектроники. №4. 2011. №4.
111. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Курушин А.А. Антенна–фильтр // Электронный журнал «Радиоэлектроника». 2010. №4.
112. Юбко А.П., Кизименк В.В., Наумович Н.М. Теоретическое и экспериментальное исследование печатных антенных решёток // 9-ая Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» 22–26 апреля 2013 г. Севастополь: СевНТУ. 2013. С. 193.

113. Саби́ров Т.Р. Излучающий элемент для АФАР L-диапазона бортового радиолокационного комплекса КА ДЗЗ // 9-ая Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» 22–26 апреля 2013 г. Севастополь: СевНТУ. 2013. С. 210.
114. Борзов А.Б., Лихоеденко К.П., Серегин Г.М. Сверхширокополосная антенна Вивальди для импульсных приемопередающих модулей систем ближней радиолокации // I Всероссийская конференции Микроволновая конференция. 27–29 ноября 2013 г. М.: JRE – ИРЭ им В.А. Котельникова РАН. С. 307–311.
115. Боков Ю.Ю., Шаляпин И.Ф. Численный анализ и экспериментальные исследования печатных антенных решеток // 9-ая Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» 22–26 апреля 2013 г. Севастополь: СевНТУ. 2013. С. 211.
116. Юханов Ю.В., Семенихин А.И., Семенихина Д.В., Привалова Т.Ю. Моделирование сверхширокополосного двухстороннего излучателя Вивальди с двумя ортогональными поляризациями // I Всероссийская конференции Микроволновая конференция. 27–29 ноября 2013 г. М.: JRE – ИРЭ им В.А. Котельникова РАН. С. 185–189.
117. Борзов А.Б., Лихоеденко К.П., Серегин Г.М. Сверхширокополосная антенна Вивальди для импульсных приемопередающих модулей систем ближней радиолокации // I Всероссийская конференции Микроволновая конференция. 27–29 ноября 2013 г. М.: JRE – ИРЭ им В.А. Котельникова РАН. С. 307–311.
118. Pablo Sanz, Izabela Slomian, Iona Piekarz, Jakub Sorocki, Piotr Kaminski, Krzysztof Wincza, Slawomir Gruszczynski. Four-beam antenna array for 24 GHz applications FED by 4x4 butler matrix // 23-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2013). Севастополь, 8–13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер. 2013. Т.2. С. 559–561.
119. Коваленко А.Н., Волков О.Е. Компьютерное моделирование направленного ответвителя на связанных микрополосковых линиях с подвешенной подложкой // I Всероссийская конференции Микроволновая конференция. 27–29 ноября 2013 г. М.: JRE – ИРЭ им В.А. Котельникова РАН. С. 116–119.
120. Шаляпин И.Ф., Боков Ю.Ю. Широкополосная микрополосковая решётка с параллельно-последовательной схемой возбуждения // 9-ая Международная молодежная научно-

- техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» 22–26 апреля 2013 г. Севастополь: СевНТУ. 2013. С. 210.
121. Гринев А.Ю., Волков А.П., Ильин Е.В. СВЧ-компазитные структуры с электромагнитной запрещенной зоной для улучшения характеристик печатных антенных систем // I Всероссийская конференции Микроволновая конференция. 27–29 ноября 2013 г. М.: JRE – ИРЭ им В.А. Котельникова РАН. С. 322–326.
 122. Бойко С.Н., Веселаго В.Г., Виноградов Е.А., Жуков А.А. Малогабаритные антенны на основе метаматериалов (практические аспекты) // Антенны. 2012. № 12. С. 32–41.
 123. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Выбор оптимального материала диэлектрика микрополосковой антенны для построения миниатюрной антенны // Антенны. 2014. № 12 (211). С. 38–44.
 124. Проектирование полосковых устройств. Учебное пособие, Ульяновский государственный технический университет. 2001. 129 с.
 125. Крячко А.Ф., Лихачёв В.М., Смирнов С.Н., Сташкевич А.И. Теория рассеяния электромагнитных волн в угловых структурах. – СПб.: Наука. 2009. 194 с.
 126. Потехин А.И. Некоторые задачи дифракции электромагнитных волн. – М.: Сов. радио, 1948, с.135.
 127. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. – М.: Сов. радио, 1970, с.520.
 128. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – М.: Радио и связь, 1983.
 129. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. -М.: Советское радио, 1957.
 130. Васильев Е.Н. Возбуждение тел вращения. – М.: Радио и связь, 1987.
 131. Уфимцев П.Я. Основы физической теории дифракции. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2009. — 350 с.
 132. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1964.
 133. Гуревич А.Г. Полые резонаторы и волноводы. – М.: Советское радио, 1952.

134. Куриляк Д.Б., Назарчук З.Т. Возбуждение осесимметричных электромагнитных колебаний в системе из соосных конечного и усеченного конусов с различными углами раскрыва // Радиофизика и Радиоастрономия. 2002. Т. 7. №1.
135. Doroshenko V.A., Kravchenko V.F. Pustovoit V.I. Meler-Fock transformations in problems of wave diffraction on unclosed structures in the time region// Doklady Physics. - 2005. - Vol.50, №11. - P.560-564.
136. Иванов Е.А. Дифракция электромагнитных волн на двух телах. Минск, «Наука и техника», 1968.
137. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Исследование влияния корпуса космического аппарата на характеристики направленности бортовых антенн // Материалы конференции «Иосифьяновские чтения 2015», Истра С. 61–63.
138. Кондратьева С.Г., Овчинникова Е.В., Гаджиев Э.В. Математическое моделирование бортовых антенн космических аппаратов с учётом дифракции // Сборник тезисов докладов XLII Международной молодёжной конференции «Гагаринские чтения», Москва С. 499–500.
139. Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г., Гаджиев Э.В. Методика приближённого расчёта характеристик направленности бортовых микрополосковых антенн малых космических аппаратов // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. С. 15–27.
140. Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А., Кондратьева С.Г. Гаджиев Э.В. Исследование характеристик направленности бортовых антенн космических аппаратов на ранней стадии разработки путём компьютерного моделирования // Электросвязь. № 7. С. 56–59.
141. Чебышев В.В. Основы проектирования микрополосковых антенн методом интегральных уравнений // Антенны. 2015. № 1 (212). С. 3–8.
142. Гаджиев Э.В. Моделирование бортовых антенн СВЧ космических аппаратов // Антенны. Выпуск 9 (196). 2013. С. 65–68.
143. Jin J. The finite element method in electromagnetic. 2-nd edition. N.-Y.: John Wiley&Sons Inc. 2002.
144. Гаджиев Э.В. Разработка модели микрополосковой антенны метрового диапазона (137 МГц) для перспективного применения для перспективного использования на КА

- «Ионосфера» // Сборник тезисов докладов Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2014». - М.: - ООО «Принт-салон». 2014. С. 144–145.
145. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Патент на полезную модель № 152427 от 16.09.2014 г. Микрополосковая антенна метрового диапазона с круговой поляризацией.
146. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны метрового диапазона (150 МГц) для применения на космическом аппарате «Ионосфера» // Материалы первой молодёжной конференции «Инновационная деятельность в науке и технике». — Истра: ОАО «НИИЭМ». 2012. С. 23–24.
147. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны метрового диапазона (150 МГц) для применения на космическом аппарате «Ионосфера» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т. 136. №5. С. 15–18.
148. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка модели микрополосковой антенны дециметрового диапазона для перспективного использования на КА «Ионосфера» // Сборник тезисов докладов Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». - М.: - ООО «Принт-салон». 2013. С. 218–219.
149. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка прямоугольной микрополосковой антенны дециметрового диапазона для применения на космическом аппарате «Ионосфера» // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 65. С.34.
150. Овчинникова Е.В., Кондратьева С.Г., Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Моделирование бортовой микрополосковой антенны // Антенны. 2016. № 7 (227). С. 10–22.
151. Татарников Д.В., Астахов А.В., Степаненко А.П. Патент на изобретение № 2471272 от 23.06.11. Двухчастотная микрополосковая антенна.
152. Урличич Ю.М., Авдонин В.Ю., Бойко С.Н., Королёв Ю.Н. Патент на изобретение № 2480870 от 31.08.2011. Многодиапазонная антенна круговой поляризации с метаматериалом.
153. Королёв Ю.Н., Бойко С.Н., Исаев А.В. Патент на изобретение № 2315398 от 23.06.2006. Многодиапазонная микрополосковая антенна этажерочного типа.

154. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Патент на полезную модель № 162204 от 07.09.2015 г. Многодиапазонная микрополосковая антенна.
155. Гаджиев Э.В. Разработка модели микрополосковой антенны для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера» // Тезисы докладов второй международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». — М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». 2014. С. 55–56.
156. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка модели двухчастотной микрополосковой для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 141. № 4. С. 23–26.
157. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Миниатюризация антенной системы космического аппарата «Ионосфера» // Антенны. 2015. № 3 (214). С. 32–38.
158. Макриденко Л.А., Кожевников В.А. От «Татьяны-2» – к «Ионозонду» // Российский космос. 2016. № 8 (128). С. 40–44.
159. Спутники стандарта CubeSat [Электронный ресурс] <http://cubesat.ru/ru/cubesats.html>
160. CubeSat structure [Электронный ресурс] http://www.clyde-space.com/cubesat_shop/structures/1u_structures
161. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Построение миниатюрной антенной системы малых и сверхмалых космических аппаратов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. № 4. (в печати).
162. Нейман М.С. Передающие антенны. Энергоиздат. 1934.
163. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Разработка макета микрополосковой антенны метрового диапазона для перспективного применения на космическом аппарате «Ионосфера» // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 4 (16). С. 20–27.
164. Фрадин А.З., Рыжков Е.В. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио. 1962. 316 с.
165. Бочаров В.С., Генералов А.Г., Гаджиев Э.В. Применение микрополосковых антенн для проведения наземных испытаний бортовых антенн космических аппаратов // Тезисы докладов четвертой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» — М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». 2016. С. 203–204.