

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Леготкин Максим Владимирович

«Разработка автоматически разворачиваемой антенной системы
наноспутника»

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07112 – Electronic and Electrical Engineering

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казакский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

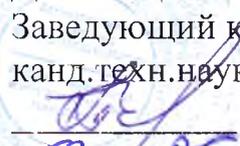
Институт автоматик и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»



ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой ЭТиКТ,
канд. техн. наук

 Таштай Е.Т.
«20» 05 2024 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Разработка измерителя скорости испарения воды»

6B07112 – Electronic and Electrical Engineering

Выполнил

Леготкин М.В.

Рецензент

доктор PhD, доцент

АУЭС им.Г. Даукеева

 Алмуратова Н.К.
«20» 05 2024 г.

Научный руководитель

канд. техн. наук

 Жигалов В.А.
«20» 05 2024 г.

Алматы 2024

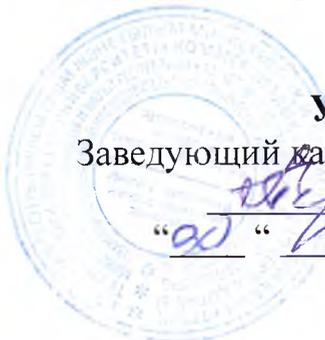
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

ОП «6B07112 Electronic and Electrical Engineering»

**УТВЕРЖДАЮ**
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
Е. Гаштай
“02” “03” 2024 г

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся: Леготкин Максим Владимирович

Тема: Разработка автоматически развертываемой антенной системы
наноспутника

Утверждена приказом ректора университета № 548 от «04.12» 2023г.

Срок сдачи законченной работы «30» 05 2024 г.

Исходные данные к дипломной работе:

Для проекта университетского кубсата 3U необходимо разработать автоматически развёртываемую коротковолновую антенную систему. Диапазоны работы антенны – радилюбительские диапазоны 20, 15, 10 м. Передаваемая мощность: до 5 Вт. Выходное сопротивление трансивера 50 Ом. Переключение диапазонов и согласование с антенной с помощью согласующего устройства на три диапазона. Антенна разворачивается по управляющей команде со стороны бортового компьютера (разработка бортового компьютера в работу не входит). Конфигурация антенной системы: симметричный диполь с длиной одного плеча до 3 м. Антенна в свёрнутом виде должна занимать объём не более 1U.

Краткое содержание дипломной работы:

- 1 Выбор схемных и конструктивных решений для антенной системы.
- 2 Расчёт и моделирование характеристик антенны

- 3 Расчёт и моделирование характеристик согласующего устройства.
- 4 Разработка печатной платы согласующего устройства.
- 5 Создание действующей макетной реализации антенной системы.
- 6 Выполнение тестовых испытаний антенной системы.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Чертёж антенны в свёрнутом и развёрнутом виде.
2. Электромагнитная модель антенны (схема полотна, диаграмма направленности).
3. Принципиальная электрическая схема согласующего устройства.
4. Графики активного и реактивного сопротивлений, КСВ в зависимости от частоты.
5. Схема печатной платы согласующего устройства.
6. Фото макетной реализации антенной системы.

Рекомендуемая основная литература:

- 1 И.В. Гончаренко. Антенны КВ и УКВ. Ч.1-5. Радиософт, 2006.
- 2 Отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе «Радиолюбительский наноспутник нового поколения – SU-1». Алматы, 2023 г.
- 3 Amateur radio satellites.
<https://www.n2yo.com/satellites/?c=18&srt=14&dir=1>.
- 4 Cubesat Developer Resources. <https://www.cubesat.org/cubesatinfo>
- 5 Кубсат. Статья в Википедии.
CubeSat Design Specification Rev. 12. California State Polytechnic University.
https://www.webcitation.org/6ABSpR8qR?url=http://www.cubesat.org/images/developers/cds_rev12.pdf

Рекомендуемая основная литература:

ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Выбор основных схемных и конструктивных решений	01.02.2024	Выполнено
Расчёт и моделирование характеристик антенны. Расчёт и моделирование характеристик согласующего устройства	15.02.2024	Выполнено
Разработка печатной платы согласующего устройства	01.03.2024	Выполнено
Создание первой макетной реализации антенной системы	15.03.2024	Выполнено
Создание второй макетной реализации антенной системы	01.04.2024	Выполнено
Выполнение тестовых испытаний	15.04.2024	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основная часть	Ассоциированный профессор, кандидат технических наук Жигалов В.А.		Ж
Нормоконтролер	Акылжан П.Б. м.т.н., ассистент каф. ЭТиКТ		А

Научный руководитель Жигалов В.А.

Задание принял к исполнению обучающийся Леготкин М.В.

Дата «30» 05 2024 г.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия исследования космического пространства стали одним из ключевых направлений в науке и технике. Возрастающий интерес к космосу стимулирует разработку все более инновационных технологий, позволяющих эффективно изучать и использовать его ресурсы. Одним из таких технологических достижений является создание наноспутников - небольших, но функционально насыщенных космических аппаратов, способных решать разнообразные задачи в космосе, от научных экспериментов до телекоммуникационных миссий. Разработка наноспутниковых систем открывает уникальные возможности для исследований в космосе благодаря их компактности, гибкости и низкой стоимости. Однако разработка и развертывание таких систем сопряжено с рядом технических вызовов, среди которых наиболее существенными являются обеспечение надежности, функциональности и автоматизации процессов развертывания.

Первым искусственным спутником Земли был Спутник ПС-1. Данный спутник был запущен 4 октября 1957 года с космодрома Байконур в Казахстане. Запуск спутника ПС-1 стал началом космической эры и значительным достижением в области космических исследований. Спутник ПС-1 был разработан в Советском Союзе под руководством Сергея Королёва. Он представлял собой сферу диаметром 58 сантиметров и весом около 83.6 килограммов с четырьмя антеннами для радиосвязи. Основной задачей спутника было передавать радиосигналы на Землю, что позволяло отслеживать его орбиту и проводить первые эксперименты по изучению верхних слоёв атмосферы. Запуск был осуществлен с помощью ракеты-носителя Р-7, которая вывела спутник на орбиту с перигеем 228 километров и апогеем 947 километров. Период обращения спутника вокруг Земли составлял 96.2 минуты. Спутник ПС-1 оставался на орбите до 4 января 1958 года. Успех запуска продемонстрировал научно-технический потенциал Советского Союза и вызвал серьёзные изменения в космических программах других стран, особенно США, начав космическую гонку между сверхдержавами. Этот исторический момент также стимулировал развитие космических технологий и методов, способствуя расширению международного сотрудничества в космических исследованиях и вдохновив новое поколение учёных и инженеров.

Современная космическая индустрия стремится к эффективному использованию ресурсов и пространства при запуске ракет-носителей. С этой целью был разработан стандарт CubeSat, предусматривающий использование унифицированных кубических модулей 10x10 см (U1) для размещения спутников. Такой стандарт позволяет компактно и эффективно использовать полезный объем ракеты для запуска малых спутников. Таблица классификации спутников по массе и размерная сетка спутников типа CubeSat показывают разнообразие малых космических аппаратов и их растущее присутствие в отрасли. Мировой тренд к созданию и запуску малых спутников усиливается благодаря их экономичности и доступности как для коммерческих, так и

некоммерческих исследований. Актуальность исследования особенно велика для Казахстана. Последний наноспутник был запущен в стране в 2018 году, а количество запусков подобных аппаратов в мире стремительно растет, отражая экспоненциальный рост интереса к таким технологиям. Казахстан имеет все возможности для развития этой сферы, благодаря наличию космодрома и тесным связям с крупными космическими компаниями.

Цель данной работы - разработка автоматически разворачиваемой антенной системы наноспутника, способной оптимизировать процесс его развертывания и обеспечить надежное функционирование в космических условиях. В работе будут рассмотрены современные методы проектирования и разработки наноспутниковых систем, проанализированы существующие подходы к автоматизации их развертывания, а также предложено оптимальное решение для эффективного и безопасного вывода наноспутника на орбиту.

1 Принципы работы спутников

Спутники работают на основе принципов орбитальной механики и радиоэлектроники. Они запускаются в космос с помощью ракет-носителей, которые выводят их на заданные орбиты вокруг Земли. Орбита спутника определяется его начальной скоростью и высотой, на которой он был выпущен. После достижения орбиты спутник поддерживает своё движение благодаря инерции и силе гравитации Земли, создающей центростремительное ускорение, которое уравнивает его инерционное движение.

Спутники оснащены различными системами для выполнения своих задач. Основными компонентами спутника являются: энергетическая система, система ориентации и стабилизации, телекоммуникационная система, научная аппаратура и система управления. Энергетическая система включает солнечные панели и аккумуляторы, которые обеспечивают спутник энергией. Система ориентации и стабилизации использует гироскопы и реактивные двигатели для поддержания правильной позиции спутника относительно Земли и Солнца. Система управления спутником осуществляется через команды, отправляемые с наземных станций. Эти команды корректируют орбиту, настраивают научные приборы и управляют сбором данных.

Радиоловительские спутники коротковолнового диапазона (УКВ), также известные как любительские радио спутники, являются малогабаритными искусственными спутниками, разработанными и запущенными в космос радиоловителями и различными образовательными и научными организациями. Эти спутники функционируют на частотах, отведённых для радиоловительской связи, и предоставляют радиоловителям возможность проводить эксперименты, устанавливать радиосвязь и обмениваться данными.

Основная причина популярности радиоловительских спутников КВ заключается в их доступности и возможности для радиоловителей участвовать в космических исследованиях и связи. Запуск и эксплуатация таких спутников требуют относительно небольших затрат по сравнению с профессиональными космическими миссиями. Радиоловители могут использовать свои знания и оборудование для проектирования, постройки и управления спутниками, что делает этот процесс весьма увлекательным и образовательным.

Радиоловительские спутники также способствуют международному сотрудничеству. Радиоловители из разных стран могут устанавливать связи друг с другом, обмениваться опытом и совместно работать над различными проектами. Это укрепляет международное сообщество радиоловителей и способствует обмену знаниями и технологиями.

Одной из главных особенностей радиоловительских спутников КВ является их образовательная ценность. Работа с такими спутниками позволяет радиоловителям и студентам получать практический опыт в области радиотехники, электроники, программирования и космических технологий. Участие в проектах по созданию и эксплуатации спутников помогает развивать

инженерные навыки и стимулирует интерес к научно-техническим дисциплинам.

Еще одним важным аспектом использования радиололюбительских спутников является возможность проведения научных экспериментов. Спутники могут быть оснащены различными датчиками и научными инструментами для сбора данных о космическом пространстве, атмосфере Земли и других явлениях. Эти данные могут быть использованы для проведения исследований и анализа, что вносит вклад в развитие науки.

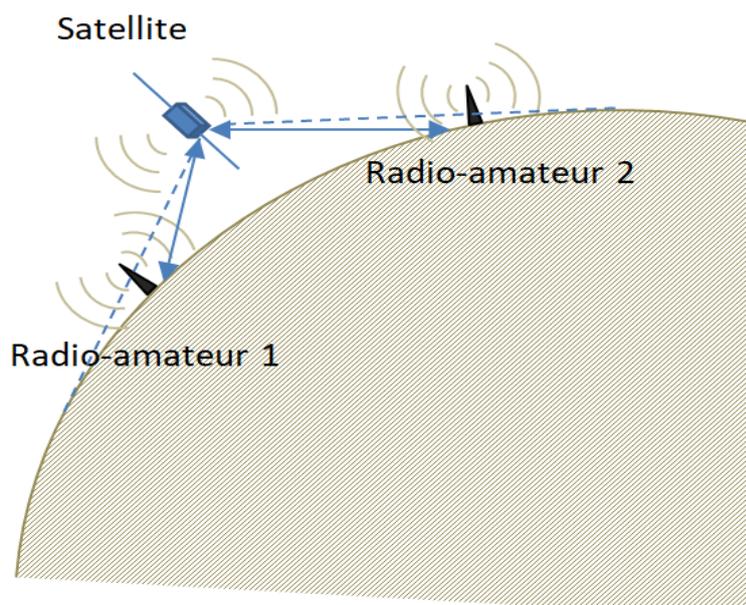


Рисунок 1.1 – Принцип работы радиололюбительских спутников

Далее будет представлено подробное описание стандарта CubeSat, его основных принципов, а также проведен анализ основных вариантов компоновки и наиболее часто встречающихся комплектующих.

1.1 Принципы работы спутников CubeSat

Спутники стандарта CubeSat представляют собой небольшие, стандартизированные космические аппараты, которые измеряются кубами с размерами 10x10x10 см (1U). Основной принцип CubeSat заключается в предоставлении доступной и простой платформы для космических исследований и коммерческих приложений. CubeSat является примером малого спутника, вес которого варьируется от нескольких сотен граммов до 10 кг. Такие спутники, благодаря небольшому размеру, можно развешивать совместно с основными полезными нагрузками космических аппаратов.

Главными особенностями спутников CubeSat являются их универсальность и масштабируемость. Они могут быть составлены из нескольких модулей 1U для получения более крупного спутника, например 2U или 3U, предоставляя больше места для приборов и систем. CubeSat обеспечивают платформу для различных экспериментов и исследований, начиная от телекоммуникаций и заканчивая мониторингом окружающей среды. Их популярность обусловлена относительно низкой стоимостью разработки и возможностью автоматизированного развертывания на орбите вместе с другими полезными нагрузками.

Конструкция CubeSat состоит из стандартных модульных компонентов, что упрощает сборку и тестирование. Каждый модуль может содержать различные системы, такие как питание, связь, навигация и полезная нагрузка. Это позволяет легко адаптировать спутник под конкретные задачи и миссии. Благодаря модульному подходу разработчики могут сосредоточиться на создании и тестировании отдельных компонентов, что повышает надёжность и снижает риск отказов.

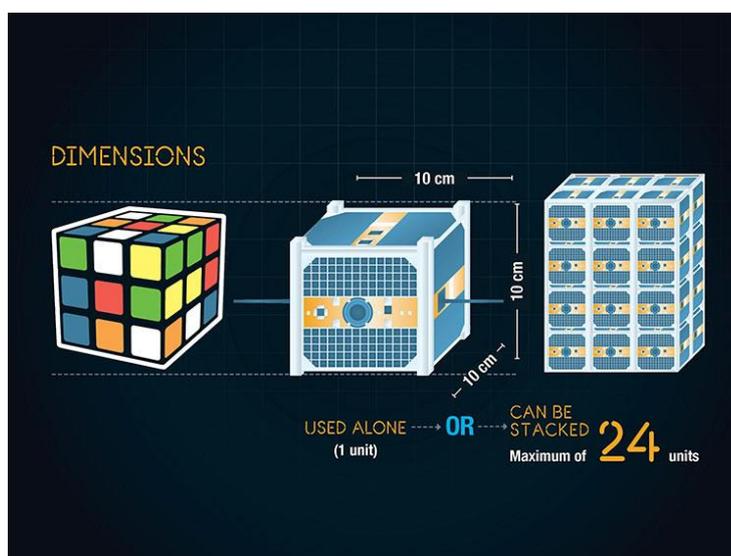


Рисунок 1.2 – Размерная сетка спутников типа CubeSat

Основные преимущества стандарта CubeSat:

- Снижение затрат:

Одним из основных преимуществ CubeSats является относительно низкая стоимость разработки и запуска по сравнению с традиционными спутниками. Стандартизация компонентов и использование коммерчески доступных технологий позволяют существенно сократить бюджетные затраты. Небольшой размер и стандартизированная конструкция упрощают интеграцию и запуск, позволяя запускать ракеты, несущие более крупные спутники. Это делает CubeSats доступными для университетов, малого бизнеса и даже стран, разрабатывающих космические программы.

- Быстрое развертывание:

CubeSats можно разработать и собрать гораздо быстрее, чем большие спутники, благодаря их модульности и простой конструкции. Это позволяет академическим и научным группам быстро реагировать на потребности исследований и вносить необходимые изменения в конструкции спутников без значительных задержек. Такая гибкость ускоряет инновационные циклы и позволяет проводить исследования в области использования передовых технологий.

- Коммуникационная система:

CubeSat состоит из передатчиков, приемников и антенн. Эта система позволяет спутнику обмениваться данными с наземными станциями. Антенны могут быть разного типа, включая дипольные, монопольные и патч-антенны, и часто они развертываются после вывода спутника на орбиту.

- Доступ к космосу для образовательных учреждений:

CubeSat открыли космическую отрасль для образовательных учреждений, которые ранее не могли участвовать в космических программах из-за высоких затрат и технических сложностей. Студенты и исследователи получают возможность разрабатывать, тестировать и управлять настоящими космическими миссиями, что существенно обогащает образовательный процесс и стимулирует интерес к науке и технике.

- Инновации и новые технологии:

Стандарт CubeSat способствует инновациям в области миниатюризации технологий и разработке новых спутниковых приложений. Малый размер и масса спутников требуют создания компактных, но эффективных компонентов, таких как микроэлектроника, маломощные передатчики и новые типы датчиков. Это стимулирует разработку передовых технологий, которые могут найти применение и в других областях.

- Увеличение частоты запусков:

Снижение стоимости и размеров спутников также позволяет увеличить частоту запусков. Это особенно важно для научных исследований, требующих актуальные данные о состоянии Земли или космической среды. Благодаря возможности запускать малые спутники совместно с другими миссиями или на коммерческих ракетах малого класса, ученые могут регулярно обновлять и расширять свои экспериментальные возможности.

- Устойчивость к рискам:

Небольшие размеры и сниженная стоимость каждого отдельного CubeSat позволяют использовать стратегии распределенного риска, такие как запуск спутников-сетей. Это уменьшает зависимость от одного аппарата и позволяет обеспечить непрерывность службы даже в случае потери одного или нескольких спутников.

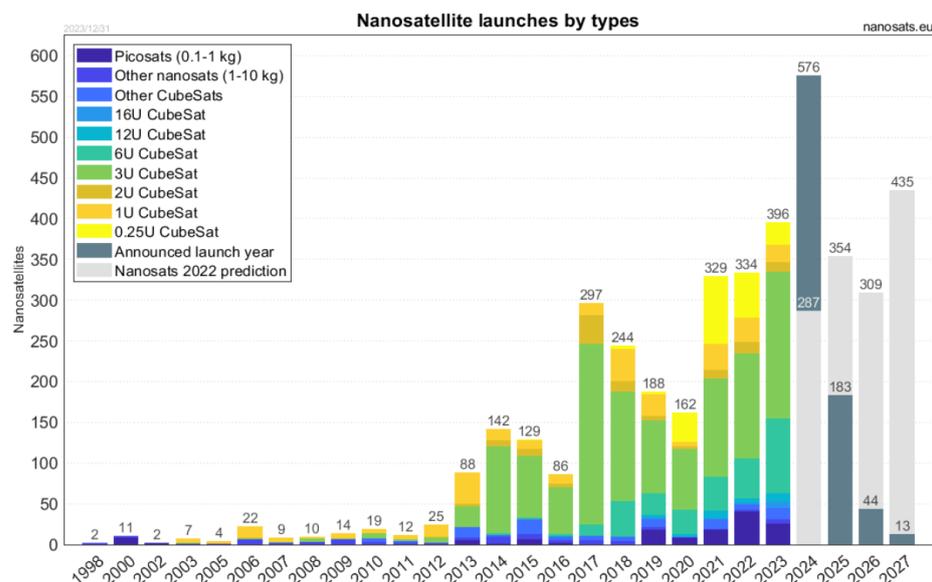


Рисунок 1.3 – Статистка запуска спутников тип CubeSat по годам

1.2 Компоновка спутников типа CubeSat

Компоновка спутников типа CubeSat является стандартизированным подходом к разработке небольших космических аппаратов, что позволяет добиться значительных успехов в их массовом производстве и запуске. Эти спутники предназначены для выполнения широкого спектра задач, от научных исследований до образовательных проектов, и имеют модульную структуру, позволяющую легко адаптировать их под различные миссии.

Технические детали компоновки CubeSat:

- Механические характеристики

Каждый CubeSat должен строго соответствовать определенным размерам и весу. Корпус CubeSat обычно изготавливается из алюминиевого сплава, такого как 6061-T6, который обеспечивает необходимую прочность при сравнительно низком весе и хорошей механической обрабатываемости. Поверхности, контактирующие с диспенсером, должны быть закалены методом анодирования для предотвращения холодной сварки и уменьшения износа при запуске и развертывании.

- Электрические спецификации

Электрическая система CubeSat должна включать многоуровневые защиты для предотвращения случайного включения. Это достигается через использование механических выключателей развертывания, которые активируются при выходе из диспенсера. Системы питания должны соответствовать стандартам AFSPCMAN 91-710, обеспечивающим безопасность полетов. Все электрические соединения должны иметь системы блокировки для предотвращения их случайного отсоединения.

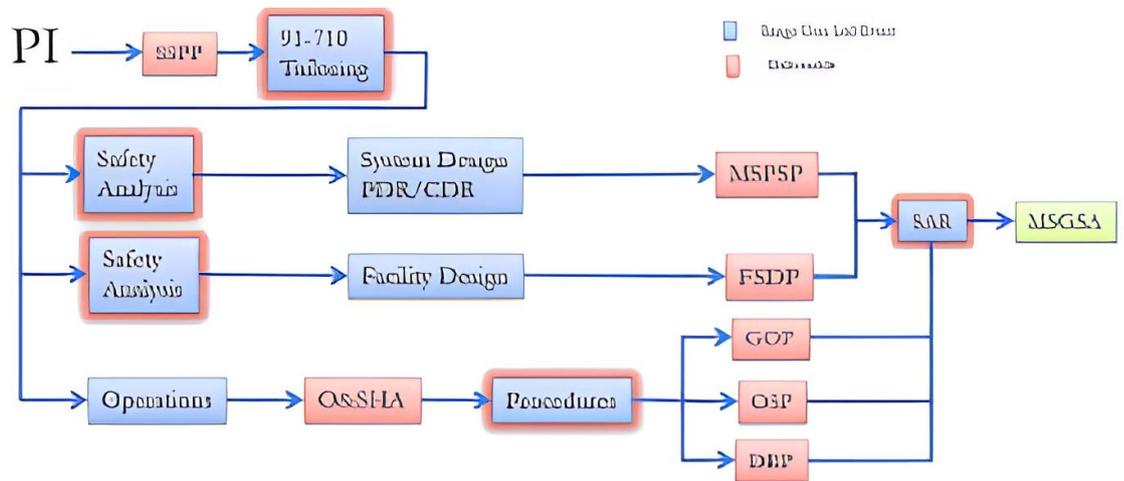


Рисунок 1.4 – Система работы по стандарту AFSPCMAN 91-710

- Требования к испытаниям

CubeSats подвергаются ряду тестов, включая тесты на вибрацию, термический вакуум и ударные нагрузки, для подтверждения их способности выдерживать условия запуска. Например, вибрационные испытания проводятся для имитации нагрузок, возникающих во время старта и выхода на орбиту, в то время как термовакуумные испытания имитируют космические температурные условия и вакуум.

CubeSat состоит из нескольких обязательных элементов:

- Бортовой компьютер:

Бортовой компьютер — это центральная часть CubeSat, координирующая работу всех остальных систем. Его задача — выполнять команды с Земли, обрабатывать данные датчиков и управлять исполнительными механизмами. Бортовой компьютер корабля управляет электрическими системами, системами связи, навигации и выполняет другие функции. Он действует как «мозг» спутника, определяя последовательность работы всех систем. Для достижения этой цели используются специальные алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие адаптироваться к изменяющимся условиям на орбите и непредвиденным ситуациям. В зависимости от типа миссии и требований к спутнику могут использоваться различные типы процессоров и архитектуры.

- Система питания:

В систему питания входят аккумуляторы и солнечные батареи. Солнечные батареи, расположенные на корпусе, обеспечивают питание спутника на светлой стороне орбиты, одновременно заряжая аккумуляторы, которые, в свою очередь, снабжают энергией спутник в тени. В зависимости от орбиты и продолжительности солнечных и теневых периодов рассчитывается количество необходимых панелей и их расположение.

- Модем и устройство связи:

Они отвечают за передачу и прием данных между спутником и наземной станцией. Модем преобразует сигналы из аналогового в цифровой формат и обратно, обеспечивая обмен данными между бортовым компьютером и внешним

миром. Устройство связи включает передатчики и приемники для передачи данных на Землю и получения команд от оператора. Радиочастоты и мощность передатчика выбираются исходя из требований к дальности связи и частотных диапазонов. Для повышения надежности обмена данными может применяться резервирование каналов связи.

- Трэк-система:

Трэк система ориентации отслеживает положение спутника в пространстве и обеспечивает его ориентацию в нужном направлении. Система включает датчики (гироскопы, магнетометры, солнечные датчики) и исполнительные механизмы (реакционные колеса, магнитные торкеры) для корректировки положения спутника. Трэк-система позволяет поддерживать ориентацию для эффективной работы солнечных панелей, антенн и приборов. Алгоритмы управления разрабатываются с учетом динамики спутника и требований к его ориентации.

- Антенна:

Антенна - важный компонент спутника, отвечающий за передачу и прием данных. Для обеспечения надежной связи антенна должна обладать широким углом обзора, особенно в условиях неопределенного положения спутника на орбите. В зависимости от типа миссии и требуемых частот используются различные типы антенн: дипольные, патчевые, спиральные и другие. Антенны могут быть как фиксированными, так и разворачиваемыми на орбите. Автоматически разворачиваемые антенны обеспечивают компактное хранение и разворачивание в космосе для работы на более низких частотах, что улучшает качество связи. Выбор антенны зависит от требований к дальности и скорости передачи данных.

- Полезная нагрузка:

Это научное оборудование или приборы, размещенные на спутнике для выполнения конкретной миссии. Полезная нагрузка зависит от назначения спутника. Например, CubeSat может быть оснащен камерами для съемки Земли, спектрометрами для изучения атмосферы или радиопередатчиками для проведения коммуникационных экспериментов.

Запуск CubeSat осуществляется с помощью ракетносителей, где они часто запускаются в качестве попутной нагрузки вместе с более крупными спутниками. Специальные пусковые контейнеры, такие как P-POD (Poly-Picosatellite Orbital Deployer), обеспечивают безопасное размещение и разворачивание CubeSat на орбите.

1.3 Особенности автоматически разворачиваемой антенны типа диполь

Для начала стоит дать определение дипольным типам антенны. Дипольными антеннами являются один из самых распространенных и простейших типов антенн который используется во многих радиосистемах.

Дипольная антенна состоит из двух проводников одинаковой длины, расположенных в одной линии и подключенных к передатчику или приемнику. Каждый проводник называется плечом антенны, а длина каждого плеча обычно равна четверти длины волны либо половине длины волны на которой антенна настроена. Простота и эффективность данного типа антенн делает их идеальным выбором для радиолюбителей.

Существуют различные типы дипольных антенн, включая полуволновый диполь, складной диполь и полуволновый диполь с удлинением. Полуволновый диполь — это классическая форма, описанная выше. Складной диполь отличается тем, что его проводники изогнуты и соединены на концах, что повышает его импеданс и делает его более широкополосным. Полуволновый диполь с удлинением используется для снижения длины антенны без изменения её резонансной частоты.

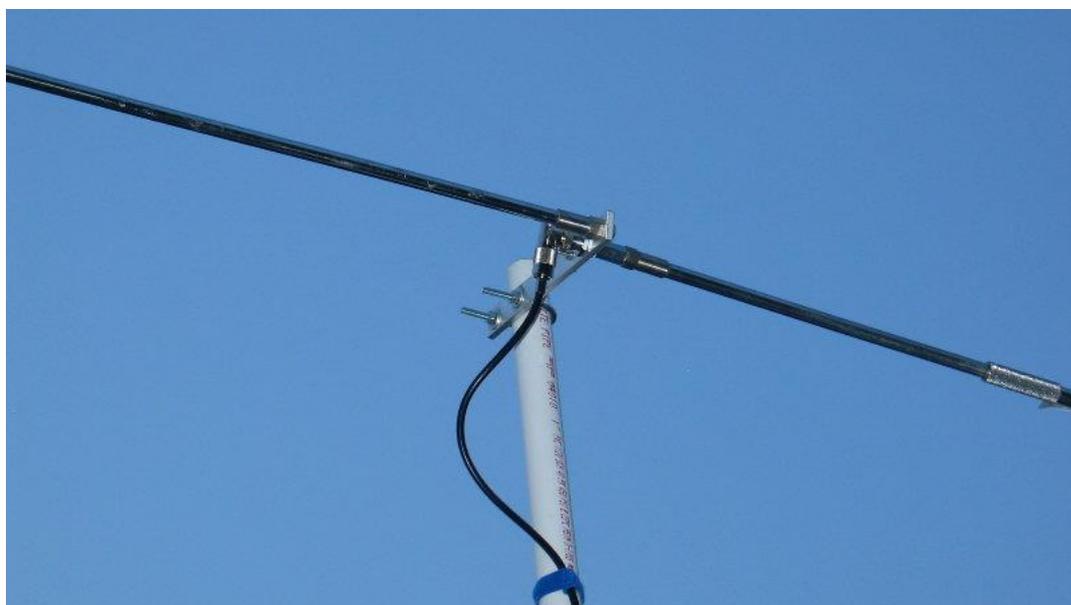


Рисунок 1.5 – Дипольная антенна

К плюсам данного типа антенных устройств можно отнести:

- Гибкость настройки: дипольные антенны легко настраиваются на любые диапазоны от КВ диапазона до УКВ диапазона.
- Согласование импеданса: простой дизайн позволяет максимально эффективно согласовать импедансы, что позволяет крайне эффективно передавать мощность, а также минимизирует потери.
- Простота установки: антенну типа диполь можно изготовить из подручных материалов, а также крайне легко установить в нужном положении в зависимости от поляризации.

Автоматически развертываемая антенна обеспечивает возможность компактного размещения антенны на этапе запуска и последующего разворачивания на орбите. Для этого используются различные механизмы, позволяющие антенне развернуться благодаря внутреннему напряжению

металла или пружинным механизмам. Основной принцип работы дипольной антенны заключается в возбуждении электрических токов, которые создают электромагнитные волны. Когда на антенну подаётся переменный ток высокой частоты, в плечах диполя возникают стоячие волны, что приводит к излучению электромагнитных волн в окружающее пространство. Дипольная антенна является симметричной, и её работа основана на эффекте резонанса.

Такая антенна обеспечивает уверенный прием сигналов в диапазоне от 14 до 28 МГц. В данном диапазоне волны отражаются в ионосфере, что позволяет спутнику поддерживать связь с землей на больших расстояниях. Конструкция антенны обеспечивает устойчивость к температурным перепадам и солнечной радиации, а использование стандартных, а также доступных материалов позволяет снизить стоимость производства.

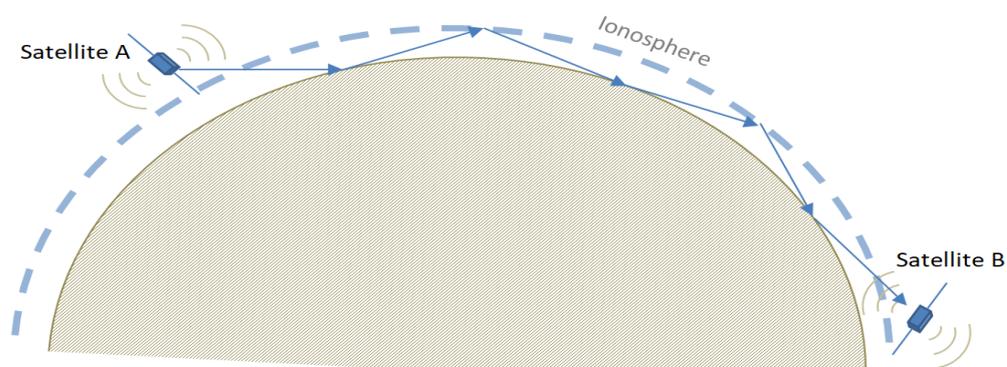


Рисунок 1.6 – Отражение волн КВ в ионосфере

Одним из основных преимуществ дипольной антенны является её простота конструкции и лёгкость изготовления. Она может быть изготовлена из доступных материалов и не требует сложного оборудования для настройки. Это делает её популярной как среди профессионалов, так и среди радиолюбителей.

Основные преимущества автоматических разворачиваемых дипольных антенн:

- Компактность:

Данные антенны дают возможность компактного хранения антенны до момента разворачивания позволяет снизить занимаемое место в спутнике.

- Простота конструкции:

В дипольных антеннах используются простые материалы и механизмы что позволяет снизить вероятность поломки в процессе разворачивания, а также повысить вероятность срабатывания.

- Надежность:

Дипольные антенны являются тщательно продуманным механизмом и обеспечивают надежное разворачивание и закрепление антенны в рабочем положении.

- Многофункциональность:

Данный вид антенн помимо своей прямой функции позволяет сориентировать спутник корректным способом относительно излучаемой плоскости.

Дипольные антенны находят применение в различных областях, включая радиовещание, телевидение, радиосвязь, радиолюбительство и телекоммуникации. Они могут использоваться как отдельно, так и в составе более сложных антенных систем, таких как антенны «волновой канал» и антенные решётки.

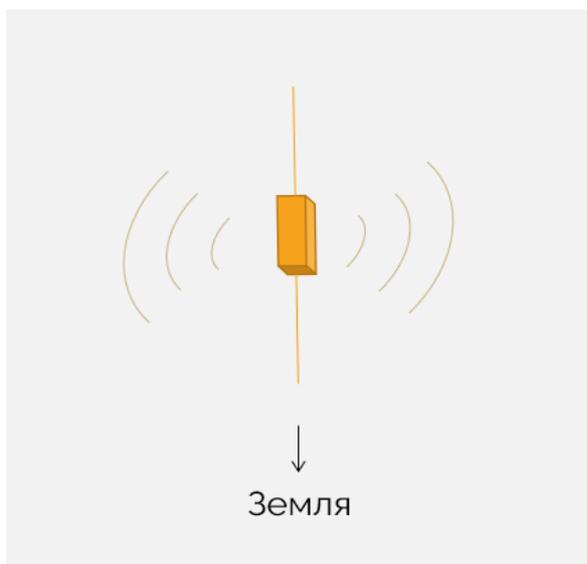


Рисунок 1.7 - Антенна – укороченный диполь, выполняющий дополнительно роль гравитационной стабилизации

2 Расчет и моделирование автоматически развертываемого антенного устройства радиолобительского спутника

В данной главе пойдет речь о моделировании антенного комплекса наноспутника, его конструктивных решениях, а также расчетных параметрах.

2.1 Выбор конструктивных решений по сборке антенного устройства

На данном этапе проекта происходит выбор способа построения спутника. Выбор происходит согласно таким параметрам как: цель миссии, масса полезной нагрузки, возможность принятия на борт ракеты-носителем, а также технических характеристик спутника.

При анализе потребностей и задач проекта был выбран формат корпуса 3U для размещения свернутой антенны, а также частотного фильтра и дополнительной полезной нагрузки. Антенны размещаются по внутренним сторонам корпуса, закрепленные нейлоновой или иной легкоплавкой леской в свернутом виде. Непосредственно внутри корпуса располагается согласующее устройство, представляющее собой печатную плату 10*10 см, закрепленную на болты или установленную на направляющие таким образом, чтобы соблюсти стандарты, заявленные в спецификации дизайна CubeSat. Так же стоит учитывать дополнительное пространство для установки бортового компьютера, системы питания и иных необходимых систем наноспутника.

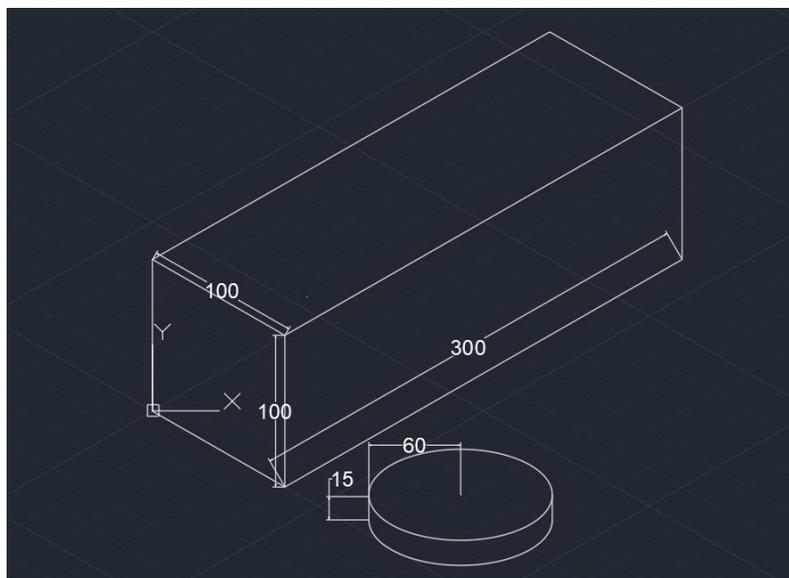


Рисунок 2.1 – Демонстрация соотношения антенны в свернутом виде относительно размеров спутника с сохранением натуральных размеров (размер указан в миллиметрах)

В качестве антенны выбрана конструкция диполя, имеющего 2 плеча длиной по 3.15 метров каждое. Выбор в пользу такой длины был сделан по

причине удобства монтажа, а также исходя из расчетов проведенных для каждой из частот.

$$F = \frac{K * \lambda}{2} \quad (2.1)$$

где F – длина диполя;

K - коэффициент укорочения, выбранный согласно графику Ротхаммеля (рисунок 2.2);

λ – длина волны.

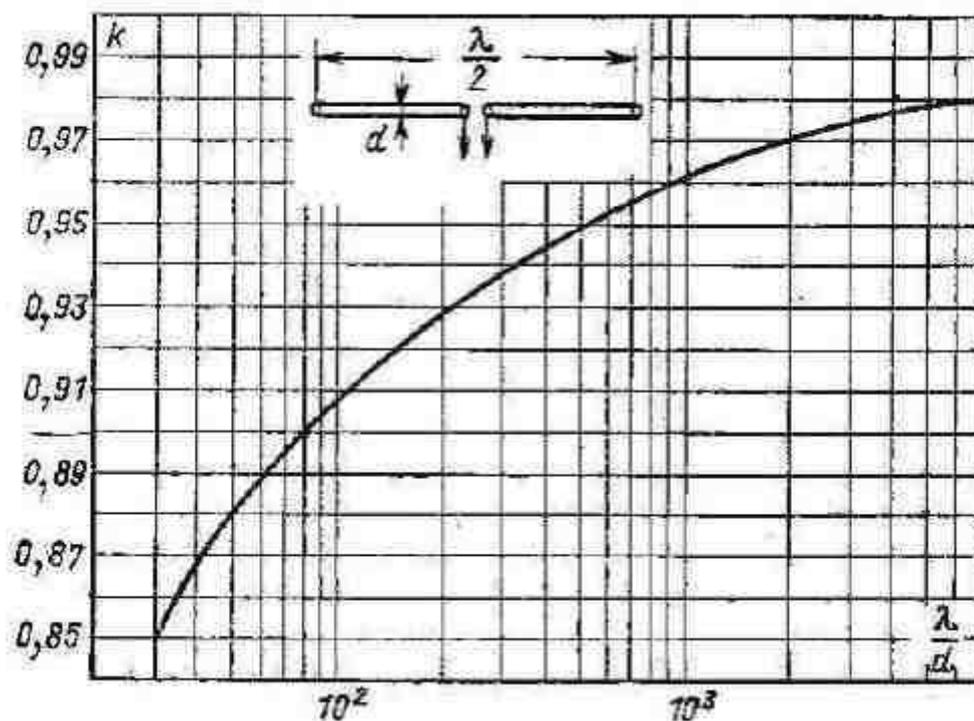


Рисунок 2.2 – График соотношения длины волны к диаметру вибратора, также известный как график Ротхаммеля

Данная конструкция антенны позволит корректно ориентировать спутник при выводе его на орбиту, а также непосредственно выполнять задачу по обеспечению связи с сателлитом на радиолюбительских частотах, а именно 14МГц, 21МГц и 28МГц. Также данное конструкторское решение выбрано по той причине, что для изготовления конкретной антенны можно использовать обыкновенную строительную рулетку, т.к. она обладает необходимыми характеристиками, а именно способностью к саморазвертыванию за счет ее внутреннего напряжения, созданного благодаря изгибу, а также необходимой длиной каждого плеча для вхождения в резонанс с волной.

В результате проведенных экспериментов был выведен оптимальный способ развертывания антенны. Развертывание антенны будет происходить за счет пережигания лески путем перегрузки резистора. Этот способ подходит по нескольким параметрам:

- Простота исполнения
- Надежность срабатывания
- Малогабаритность при хранении в свернутом виде

Антенны такого типа способны работать на указанном частотном диапазоне с учетом применения фильтра верхних частот, тем самым обеспечивая работу на нескольких диапазонах без серьезных помех связи на каждой конкретной частоте.

2.2 Моделирование дипольной антенны

Моделирование антенны — это крайне важный этап в построении антенны и в принципе при проектировании спутника. Для данной процедуры будет использована программа MMANA-GAL.Basic. Это наиболее доступная программа с широким функционалом, позволяющим смоделировать любой тип диполи, а также иные типы антенн и токопередатчиков.

MMANA-GAL — это мощный инструмент для моделирования и анализа антенн, разработанный Макото (JEЗННТ) и другими. Это программное обеспечение широко используется как радиолюбителями, так и профессионалами для проектирования и оптимизации различных типов антенн. Программа также позволяет проводить анализ параметров стоячей волны (SWR), импеданса и других ключевых характеристик антенны. Это помогает инженерам оптимизировать конструкцию антенны для достижения максимальной эффективности и минимизации потерь сигнала. Для спутниковых антенн это критически важно, поскольку даже небольшие потери могут значительно снизить качество связи.

MMANA-GAL предоставляет возможности для графического проектирования и анализа антенн, что делает его идеальным для использования в радиолюбительской и профессиональной среде. Программа позволяет пользователям создавать разнообразные антенные конструкции, анализировать их характеристики, такие как импеданс, усиление и радиационные паттерны, в различных частотных диапазонах. MMANA-GAL является возможностью моделирования взаимодействия между несколькими антеннами. В случае спутниковых систем часто требуется использование нескольких антенн для приёма и передачи сигнала на разных частотах или с разной поляризацией. MMANA-GAL позволяет исследовать влияние взаимного влияния антенн друг на друга и оптимизировать их расположение для минимизации интерференции.

MMANA-GAL включает в себя инструменты оптимизации размеров и параметров антенн для достижения максимальной производительности.

Также программа обеспечивает 3D визуализацию, что помогает лучше понять, как антенна будет функционировать в реальных условиях. Для данных целей присутствуют возможности моделирования среды моделирования. Программа поддерживает экспорт результатов моделирования в виде графиков и диаграмм, что облегчает анализ данных и подготовку отчётов. Это полезно как для индивидуальных пользователей, так и для команд инженеров, работающих над проектами спутниковых антенн.

Кроме того, MMANA-GAL предоставляет возможность импорта и экспорта моделей антенн в различных форматах, что делает её совместимой с другими программами для моделирования и анализа антенн. Это позволяет интегрировать её в более сложные цепочки проектирования и тестирования, что особенно важно для профессиональных инженеров, занимающихся разработкой спутниковых систем.

Таким образом, MMANA-GAL является незаменимым инструментом для проектирования и оптимизации спутниковых антенн. Её широкие функциональные возможности, точность моделирования и удобство использования делают её идеальным выбором для инженеров, стремящихся создавать надёжные и эффективные антенны для спутниковой связи.

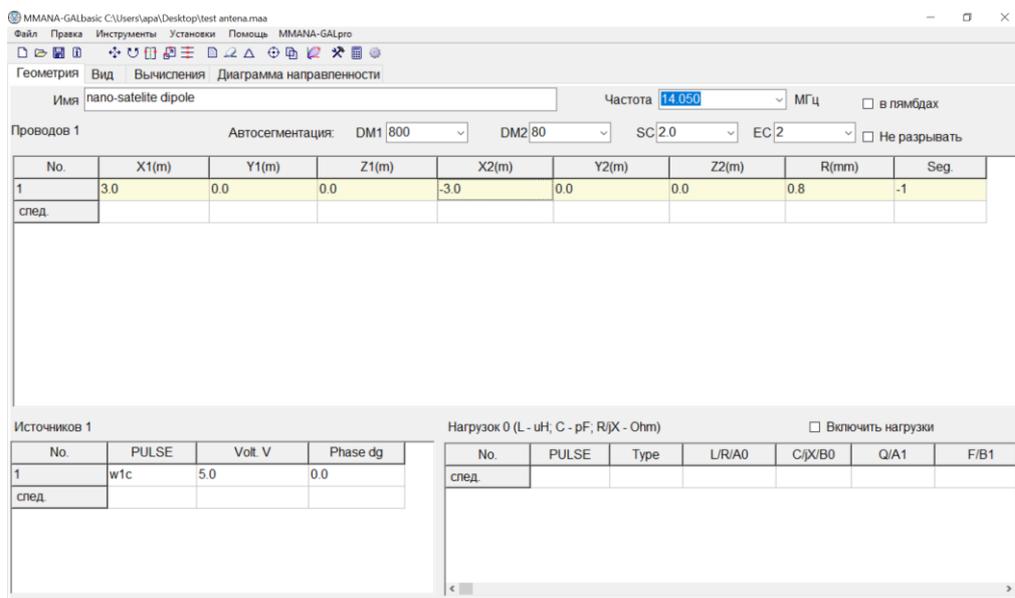


Рисунок 2.3 – Интерфейс программы MMANA-Gal для моделирования геометрии антенны

Моделирование начинается с создания объекта и описания его свойств и габаритов. В данном случае отдельно создаются 2 плеча антенны. Также задается источник питания, а также параметры проводника. Модель будет создана путем задания 3-мерных координат. Сопротивление проводника сохраняется на уровне 50 Ом, что является стандартом при моделировании спутникового диполя. Согласно техническому заданию, напряжение питания источника задается на уровне 5V.

Далее задаются параметры моделирования, т.е. вид пространства, а также свойства проводника. Для свойств проводника будет создан специальный паттерн, который подробным способом описывает параметры антенны, а именно ее форму, материал. В качестве среды распространения сигнала будет выбран пресет “Свободное пространство”. В результате моделирования будут получены параметры как КСВ (Коэффициент Стоячей Волны), а также диаграмма направленности антенны.

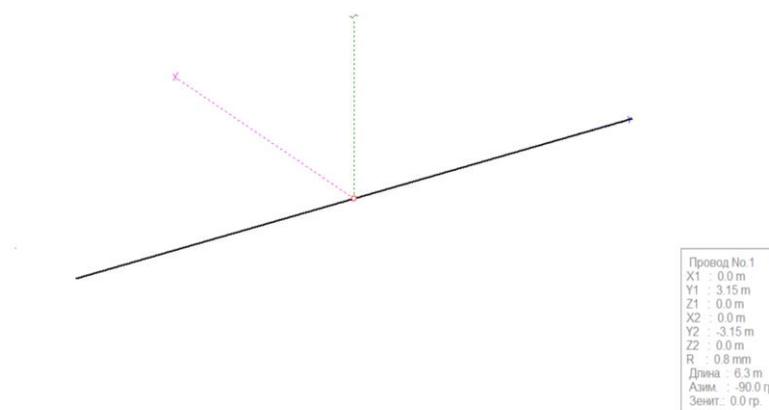


Рисунок 2.4 – Вид модели 2-плечевого диполя в 3-мерной системе координат

КСВ, или коэффициент стоячей волны, является важным показателем, который отражает степень согласования между антенной и передатчиком. Этот коэффициент измеряется при помощи прибора, известного как КСВ-метр. В идеальном случае КСВ должен стремиться к единице, что указывает на идеальное согласование, при котором отсутствуют потери мощности из-за отражений. Практические значения КСВ от 1,3 до 1,5 свидетельствуют о хорошей согласованности, тогда как значения от 1,6 до 2 указывают на потери, связанные с несовершенствами в высокочастотных соединениях. КСВ в диапазоне от 2,1 до 5 может сигнализировать о возможных неисправностях в антенне, а значения выше 5 обычно указывают на критические проблемы, такие как обрыв центральной жилы кабеля или антенны.

КСВ формируется из-за взаимодействия падающей и отраженной электромагнитных волн в линии передачи, где могут возникать неоднородности, такие как скачки волнового сопротивления. Эти отраженные волны могут возвращаться к источнику сигнала, что приводит к снижению эффективности передачи энергии и может вызвать повреждение радиостанции.

Таким образом, КСВ можно выразить формулой:

$$КСВ = \frac{(1+\gamma)}{1-\gamma} \quad (2.2)$$

где γ - коэффициент отражения т.е. отношение интенсивности отраженной волны к интенсивности падающей волны.

Настройка КСВ не только повышает качество передачи сигнала, но и защищает радиостанцию от возможных повреждений, вызванных возвращением части мощности назад к передатчику. Это делает настройку КСВ критически важной процедурой, которая может предотвратить не только потерю качества связи, но и избежать поломок оборудования.

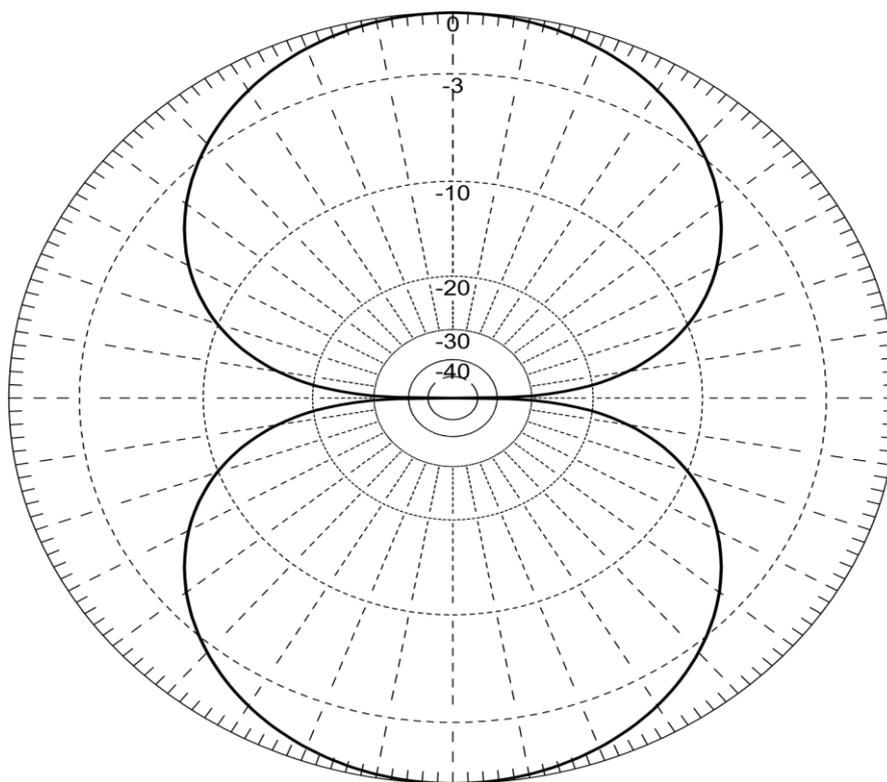


Рисунок 2.5 – Диаграмма направленности для смоделированной антенны

Диаграмма направленности — это графическое представление характеристик излучения антенны, показывающее, как антенна распределяет энергию в пространстве. Эта диаграмма важна для понимания, как антенна передаёт и принимает сигналы в различных направлениях и насколько эффективно она работает в желаемом направлении. Диаграмма направленности дипольной антенны имеет ряд специфических особенностей, а именно:

- Дипольные антенны обычно имеют рисунок направленности в форме восьмёрки в горизонтальной плоскости. Это означает, что максимальное излучение происходит перпендикулярно диполю, а в направлении вдоль оси диполя излучение минимально или отсутствует.

- Основной лепесток дипольной антенны широкий, что обеспечивает хорошее покрытие в области перед антенной. Это делает дипольные антенны идеальными для радиовещательных приложений, где необходим широкий угол охвата.

- Хотя основной лепесток является наиболее значимым, дипольные антенны также обладают боковыми лепестками, которые могут вызывать помехи, если они не контролируются должным образом. Однако при правильной установке и настройке влияние боковых лепестков можно минимизировать.

- Задний лепесток дипольной антенны, как правило, менее выражен, чем у более направленных антенн, таких как параболические антенны. Несмотря на это, необходимо учитывать этот аспект при планировании размещения антенны, чтобы минимизировать нежелательный приём или излучение в заднем направлении.

- Ширина лепестка дипольной антенны определяет угловой размер основного лепестка, в пределах которого антенна наиболее эффективно излучает или принимает сигналы. Широкий основной лепесток обеспечивает отличное охватное излучение, что делает дипольные антенны подходящими для применений, требующих равномерного распределения сигнала в большой зоне.

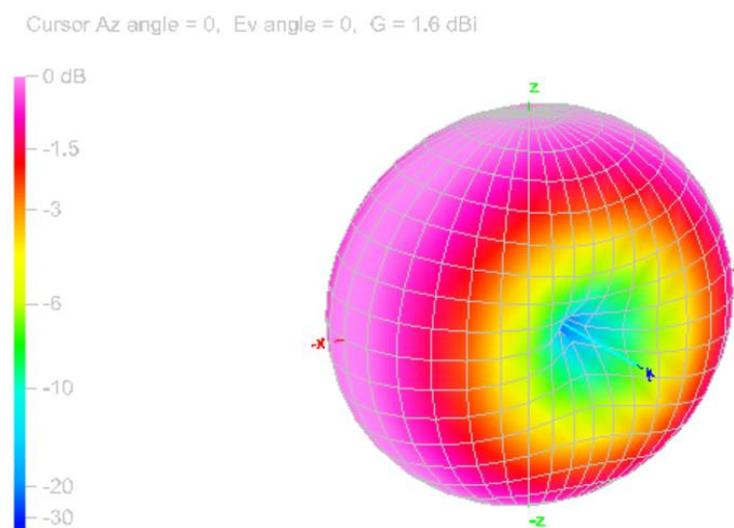


Рисунок 2.6 – Диаграмма направленности в 3-мерных координатах

2.3 Расчет и моделирование согласующего устройства для коротковолновой антенны спутника

Сама по себе антенна не универсальна для абсолютно всех частот, особенно учитывая тот факт, что присутствует ограничение длины, а также конфликты частот, т.е. сигналы на разных частотах перебивают друг друга. Для

корректного функционирования многодиапазонности устройства необходимо согласующее устройство.

Антенный тюнер, или устройство согласования антенн, представляет собой тип электронного устройства, которое регулирует сопротивление антенны в соответствии с ее собственным сопротивлением. Современные передающие и приемные устройства обычно включают в себя широкополосные каналы связи с входным и выходным сопротивлением 50 или 75 Ом. Поэтому для оптимальной настройки и реализации заданных параметров такого устройства необходимо обеспечить активную нагрузку сопротивлением 50 или 75 Ом как на приемной, так и на передающей части тракта. Для решения этой проблемы на самом деле существует дополнительное внешнее настроечное устройство, называемое антенным тюнером. Большинство антенных тюнеров делятся на три группы: Г-образные, Т-образные и П-образные тюнеры.

- Антенные тюнеры с Г-образной конфигурацией отличаются своей простотой в конструкции и способны эффективно работать. Их преимущества включают конструктивную простоту и способность обеспечивать высокую мощность при сравнительно небольших размерах. Антенные тюнеры с Г-образной конфигурацией широко применяются в радиотехнике для согласования импеданса антенн и передатчиков. Они обеспечивают эффективную передачу мощности от передатчика к антенне, минимизируя отражённые волны и потери сигнала.

Основной элемент Г-образного тюнера состоит из двух реактивных компонентов: индуктивности (катушки) и ёмкости (конденсатора), которые соединены в виде буквы "Г". Такая конфигурация позволяет гибко изменять параметры цепи для достижения нужного импеданса. В зависимости от конкретных условий и требований, тюнер может быть настроен как на увеличение, так и на уменьшение реактивного сопротивления.

Важным аспектом работы Г-образного тюнера является его способность адаптироваться к различным частотам. Это достигается изменением значений индуктивности и ёмкости, что позволяет тюнеру эффективно работать в широком диапазоне частот. В некоторых тюнерах используются переменные индуктивности и конденсаторы, что позволяет оператору легко настраивать тюнер под конкретные условия работы.

Эффективность Г-образного тюнера определяется его способностью минимизировать коэффициент стоячей волны (КСВ). Чем ниже КСВ, тем больше мощности передается от передатчика к антенне, что улучшает качество и дальность связи. Г-образные тюнеры особенно полезны в ситуациях, когда антенна не настроена точно на резонансную частоту передатчика, что часто встречается в мобильных и полевых условиях.

Одним из ключевых преимуществ Г-образного тюнера является его простота и компактность. Это делает его идеальным выбором для портативных и мобильных радиоустановок, где важно минимизировать размер и вес оборудования. Кроме того, простота схемы снижает стоимость и повышает

надёжность устройства, что особенно важно для радиолюбителей и профессиональных пользователей, работающих в сложных условиях.

Г-образные тюнеры также находят широкое применение в системах коротковолновой связи, где часто используются антенны с переменным импедансом. В таких системах тюнеры обеспечивают гибкость настройки и стабильность работы, что позволяет поддерживать надёжную связь на больших расстояниях.

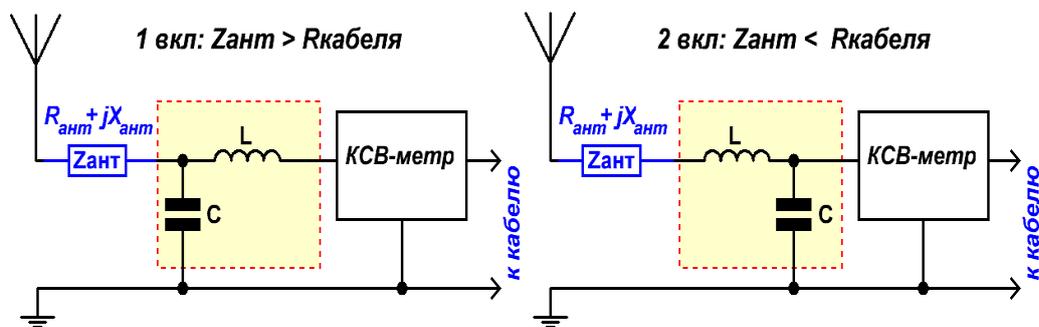


Рисунок 2.7 – Г-образные согласующие цепи антенных тюнеров

- Антенные тюнеры Т-образного типа являются важными устройствами в радиотехнике, используемыми для согласования импеданса между передатчиком и антенной. Они обеспечивают эффективную передачу мощности, минимизируя потери и отражённые волны, что критично для поддержания качественной радиосвязи. Т-образные тюнеры получили своё название из-за характерной конфигурации схемы, которая напоминает букву "Т".

Антенные тюнеры Т-образного типа оснащены тремя элементами регулировки, в отличие от двух в Г-образных моделях. Основной элемент Т-образного тюнера состоит из трёх реактивных компонентов: двух конденсаторов и одной индуктивности. Конденсаторы подключены параллельно антенне и передатчику, а индуктивность соединяет их в середине, образуя Т-образную схему. Такая конфигурация позволяет более гибко и точно настраивать параметры цепи для достижения оптимального импеданса. Несмотря на это, именно Т-образные тюнеры стали наиболее распространёнными как среди самодельных, так и среди промышленно производимых согласующих устройств.

Одним из ключевых преимуществ Т-образного тюнера является его высокая адаптивность к широкому диапазону частот. Это достигается за счёт возможности регулирования всех трёх компонентов схемы, что позволяет использовать тюнер с различными антеннами и передатчиками без необходимости значительных изменений конструкции. Такие тюнеры особенно полезны в ситуациях, когда антенны не настроены на резонансную частоту передатчика, что часто происходит в мобильных и полевых условиях. Т-образные тюнеры часто применяются в системах коротковолновой и ультракоротковолновой связи, где требуется высокая точность настройки и стабильность работы. В таких системах тюнеры обеспечивают надёжное

согласование импедансов, что критически важно для поддержания качественной и стабильной связи на больших расстояниях.

Они известны своей универсальностью и способностью эффективно работать в широком диапазоне импедансов на всех КВ диапазонах. Это делает их универсальными и широко применимыми в различных радиотехнических установках. Применение Т-образных тюнеров позволяет инженерам и радиолюбителям эффективно настраивать свои системы для максимальной производительности.

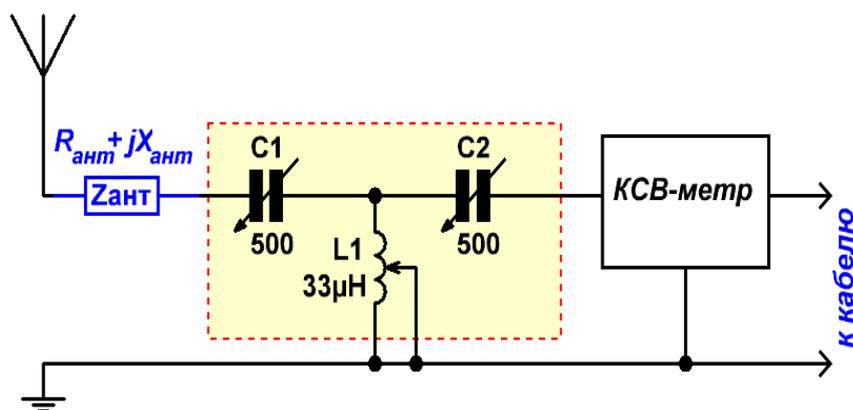


Рисунок 2.8 – Пример частотного фильтра на одно LC-звено

- Антенные согласующие устройства П-типа обладают рядом недостатков по сравнению с Т-образными тюнерами. Основной задачей этих устройств является согласование импеданса передатчика с импедансом антенны, что позволяет минимизировать отраженные волны и обеспечить эффективную передачу сигнала. П-тип конфигурации получил своё название из-за характерной формы схемы, напоминающей букву "П".

Согласующее устройство П-типа состоит из двух параллельных конденсаторов и одной индуктивности, подключенной последовательно между ними. Такая конфигурация обеспечивает гибкость настройки и позволяет использовать устройство для широкого диапазона частот и условий эксплуатации. Конденсаторы подключаются параллельно к антенне и передатчику, а индуктивность соединяет эти два компонента, образуя П-образную схему.

Принцип работы П-типа согласующего устройства заключается в изменении реактивных составляющих импеданса системы. Путем настройки значений конденсаторов и индуктивности можно достичь нужного импеданса, что позволяет эффективно согласовать передатчик и антенну. Конденсаторы в данной схеме регулируют реактивные составляющие как на входе, так и на выходе устройства, а индуктивность компенсирует остаточное реактивное сопротивление.

Для П-образных тюнеров требуется максимальная ёмкость, которая в четыре раза превышает аналогичный параметр Т-образных устройств. Эффективность П-тип согласующих устройств зависит от качества компонентов и точности их настройки. Высококачественные конденсаторы и индуктивности обеспечивают минимальные потери сигнала и высокую стабильность работы. Это особенно важно для профессиональных радиосистем, где требуется высокая надёжность и качество связи. Важно учитывать, что правильная настройка устройства требует понимания принципов работы и опыта в регулировке радиоаппаратуры.

Одним из ключевых преимуществ П-тип конфигурации является её способность работать с широким диапазоном частот. Это достигается благодаря возможности точной регулировки параметров всех трёх компонентов схемы. Переменные конденсаторы и индуктивность позволяют легко настраивать устройство под конкретные условия работы, обеспечивая оптимальное согласование импедансов. Это делает П-тип согласующие устройства особенно полезными для использования в радиолюбительских и профессиональных системах, где часто возникают изменения частоты и условий эксплуатации. К тому же диапазон согласования импедансов, особенно на диапазонах 160 и 80 метров, у П-тюнеров оказывается ниже.

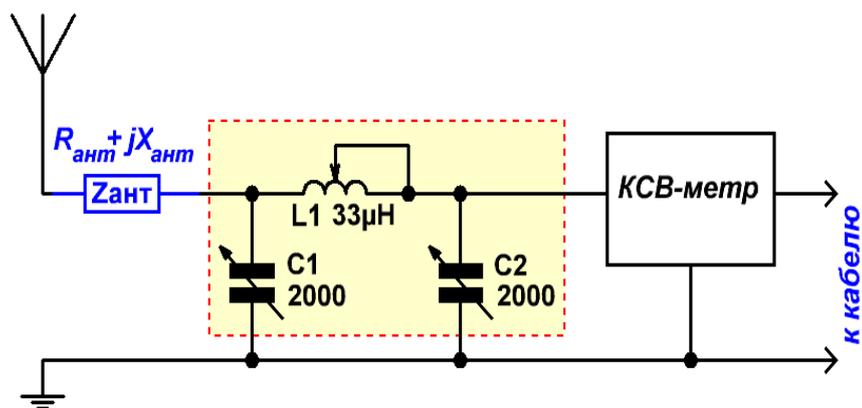


Рисунок 2.9 – Антенный тюнер П-образного типа

Согласующее устройство для антенны данного проекта будет представлять собой частотные фильтры, которые позволяют наиболее четко отрезать частоты выше необходимых, т.е. выше 14МГц, выше 21МГц и выше 28МГц при работе каждого фильтра соответственно. Принципиальная схема комбинированного фильтра представлена тремя параллельно соединенными частотными фильтрами, состоящими из звеньев Т-типа. При помощи специализированного ПО был проведен расчет звеньев для фильтра низких частот 3-го порядка с частотами среза 14МГц, 21МГц, 28МГц, а также сопротивлением 50 Ом. Полученные в результате расчетов значения не представлялось

возможным воплотить в реальность в связи с отсутствием на рынке компонентов с идентичными номиналами.

Было принято решение провести моделирование прибегнув к компонентам с максимально приближенными показателями. Моделирование схемы происходило в EasyEDA.

EasyEDA представляет собой онлайн-инструмент для разработки электронных схем и печатных плат (PCB). Это мощная и удобная в использовании платформа, которая предоставляет пользователям все необходимые инструменты для создания, симуляции и разработки электронных устройств. EasyEDA позволяет проектировать схемы, создавать печатные платы, проверять их на ошибки и отправлять на производство — все в одном интерфейсе. Одним из ключевых преимуществ EasyEDA является его доступность и простота использования. Платформа работает в веб-браузере, что устраняет необходимость в установке дополнительного программного обеспечения. Это означает, что проектировщики могут работать над своими проектами с любого устройства, имеющего доступ к интернету. Кроме того, EasyEDA предоставляет множество обучающих материалов и примеров, которые помогают новым пользователям быстро освоиться и начать работать с инструментом.

EasyEDA поддерживает совместную работу, что особенно полезно для командных проектов. Пользователи могут легко делиться своими проектами с коллегами, работать над схемами и печатными платами одновременно, а также оставлять комментарии и предложения. Это способствует более эффективной и продуктивной работе над сложными проектами.

Для проектирования спутниковых антенн EasyEDA предоставляет ряд важных преимуществ. Во-первых, платформа поддерживает создание сложных схем и печатных плат, что необходимо для разработки высокочастотных антенных систем. Встроенные инструменты для симуляции позволяют проверять работу схем и устранять ошибки до этапа производства, что экономит время и ресурсы.

Во-вторых, EasyEDA имеет обширную библиотеку компонентов, включая модели антенн и других высокочастотных компонентов. Это значительно упрощает процесс проектирования, поскольку пользователи могут выбирать из готовых элементов и интегрировать их в свои проекты. Легкий доступ к библиотеке компонентов также позволяет сократить время на поиск и закупку необходимых элементов.

Кроме того, EasyEDA поддерживает импорт и экспорт файлов в различных форматах, таких как Gerber, Altium и Eagle. Это обеспечивает совместимость с другими инструментами и позволяет интегрировать EasyEDA в существующие рабочие процессы. Возможность экспорта файлов в формат Gerber также упрощает процесс отправки проектов на производство, что особенно важно для быстрой разработки и тестирования прототипов спутниковых антенн. Платформа EasyEDA предоставляет инструменты для автоматической проверки и исправления ошибок в схемах и печатных платах. Эти инструменты помогают

обнаружить и устранить потенциальные проблемы на ранних этапах разработки, что повышает надёжность и качество конечных изделий. Для спутниковых антенн, где точность и надёжность имеют критическое значение, это является существенным преимуществом.

В результате была получена принципиальная схема согласующего устройства(рис. 2.10). Также при помощи приложения RFSim99 были получены графики частотных характеристик каждого ФНЧ.). На графиках видно, что фильтр незначительно ослабляет частоты до 14МГц, при этом ослабление основной частоты происходит менее чем на 0.09дБ. В это же время частоты выше 15МГц ослабляются на 3дБ и более, что позволяет корректно работать на данной частоте. Для фильтра на 21МГц потери будут составлять не более 0.5дБ что все еще приемлемо для данной частоты. Для фильтра 28МГц минимальные потери в 0.02дБ присутствуют на отрезке от 27.9МГц до 28.2МГц.

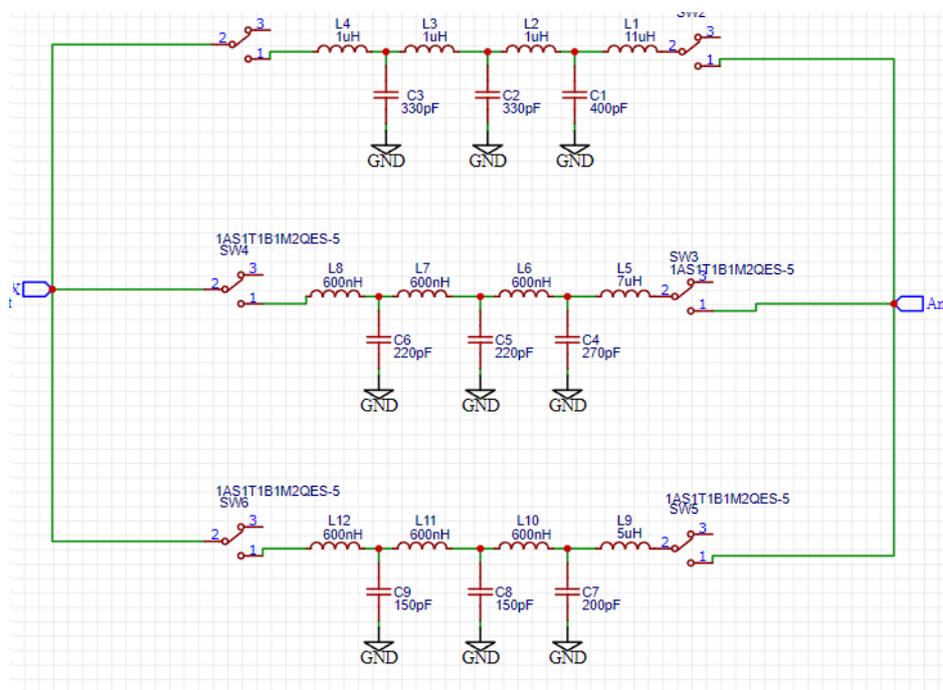


Рисунок 2.10 – Принципиальная схема частотных фильтров

В принципиальной схеме показаны 9 конденсаторов. По два конденсатора величинами 330 пФ, 220 пФ и 150 пФ. И по одному конденсатору величинами 400 пФ, 270 пФ и 200 пФ. Также было использовано 12 катушек индуктивности. Далее были подключены тумблеры для фильтрации частот.

Также можно просмотреть 3D модель макета согласующего устройства. Для просмотра нужно преобразовать схему в печатную плату. После преобразования появляется размер платы и компоненты. После установки компонентов начинается трассировка дорожек. Трассировку дорожек можно либо сделать вручную, либо через “Автотрассировку”. После преобразовываем плату в 3D модель.

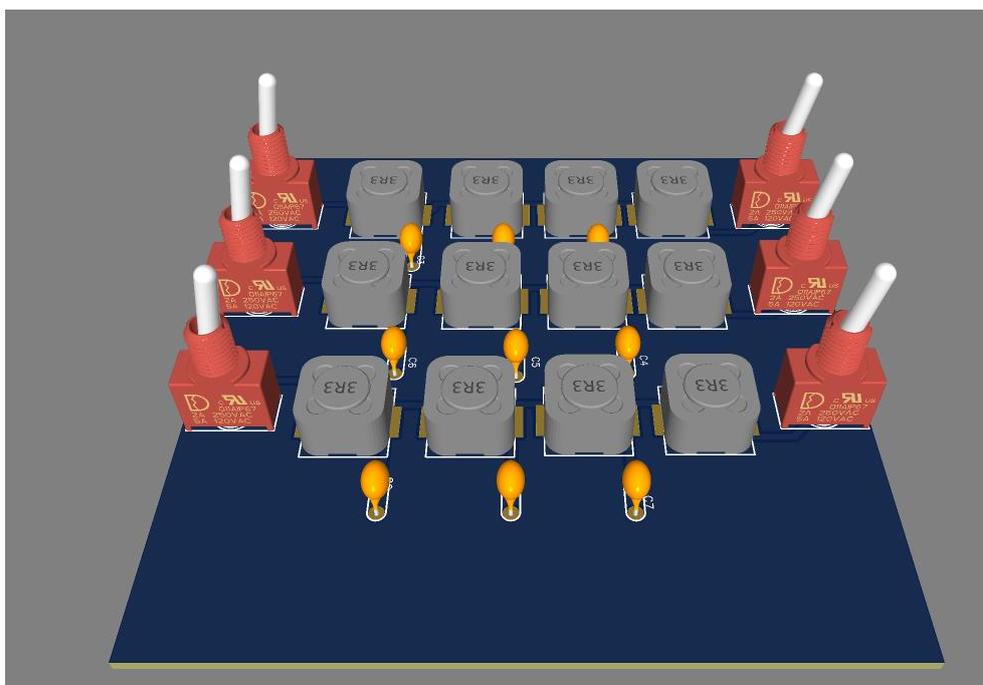


Рисунок 2.11 – 3D модель макета преобразующего устройства

Далее приступаем к фильтрации частот. Фильтрация частот – это процесс выделения или подавления определённых частотных компонентов сигнала. Этот процесс осуществляется с помощью фильтров, которые могут быть электронными, механическими или цифровыми устройствами. Фильтры играют ключевую роль в различных областях, таких как радиосвязь, обработка сигналов, аудиотехника и телекоммуникации.

Фильтры играют важную роль в системах передачи и обработки информации, улучшая качество сигналов и удаляя нежелательные частоты. Они находят применение в аудиосистемах для улучшения звука, в радиосвязи для выделения полезных сигналов и подавления помех, а также в медицинских приборах для фильтрации биологических сигналов.

Фильтры можно классифицировать по различным критериям, но основные типы включают низкочастотные (НЧ) фильтры, высокочастотные (ВЧ) фильтры, полосовые фильтры и режекторные фильтры.

Низкочастотные фильтры (НЧ-фильтры) пропускают сигналы с частотами ниже заданной граничной частоты и подавляют сигналы с частотами выше этой частоты. Они используются, например, для удаления высокочастотного шума из аудиосигналов. НЧ-фильтры могут быть реализованы с помощью пассивных компонентов, таких как резисторы и конденсаторы, или активных компонентов, таких как операционные усилители.

Высокочастотные фильтры (ВЧ-фильтры) пропускают сигналы с частотами выше заданной граничной частоты и подавляют сигналы с частотами ниже этой частоты. Они часто применяются для удаления низкочастотных шумов или для выделения высокочастотных составляющих сигналов.

Полосовые фильтры пропускают сигналы в определённом диапазоне частот и подавляют сигналы вне этого диапазона. Они используются в радио и телекоммуникациях для выделения нужных частотных диапазонов. Полосовой фильтр может быть реализован комбинацией НЧ и ВЧ фильтров.

Режекторные фильтры подавляют сигналы в определённом диапазоне частот и пропускают сигналы вне этого диапазона. Они полезны для удаления нежелательных частот, таких как гармонические искажения или частоты помех.

Фильтры могут быть реализованы как аналоговыми, так и цифровыми устройствами. Аналоговые фильтры могут быть пассивными или активными, в то время как цифровые фильтры реализуются с помощью алгоритмов обработки сигналов на цифровых устройствах, таких как микроконтроллеры или цифровые сигнальные процессоры (DSP).

Фильтры могут быть реализованы как аналоговыми, так и цифровыми устройствами. Аналоговые фильтры могут быть пассивными или активными, в то время как цифровые фильтры реализуются с помощью алгоритмов обработки сигналов на цифровых устройствах, таких как микроконтроллеры или цифровые сигнальные процессоры (DSP).

Принципы работы фильтров основаны на свойствах электрических цепей и их реакциях на различные частоты. Например, в НЧ-фильтре на основе RC-цепи (резистор-конденсатор) высокочастотные сигналы подавляются, поскольку конденсатор блокирует их прохождение, в то время как низкочастотные сигналы проходят через резистор.

Ниже представлены частотные характеристики устройства:

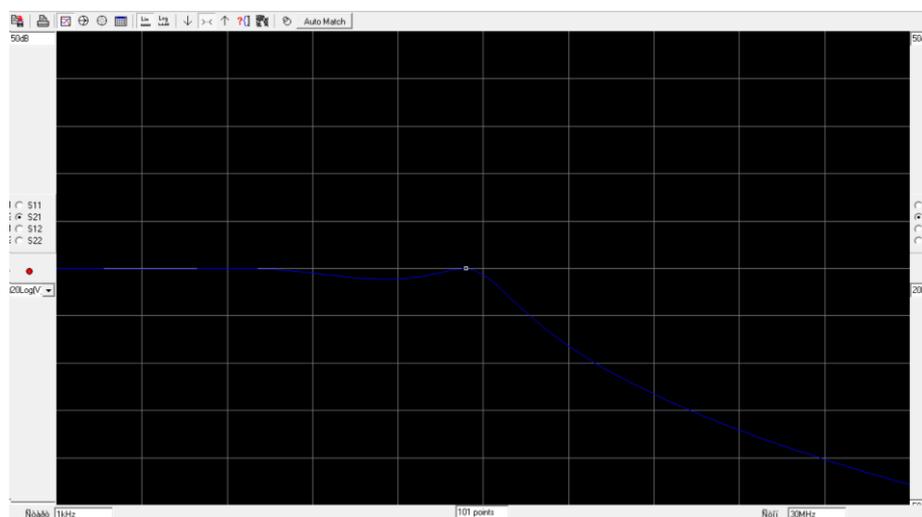


Рисунок 2.12 – Частотная характеристика фильтра 14МГц

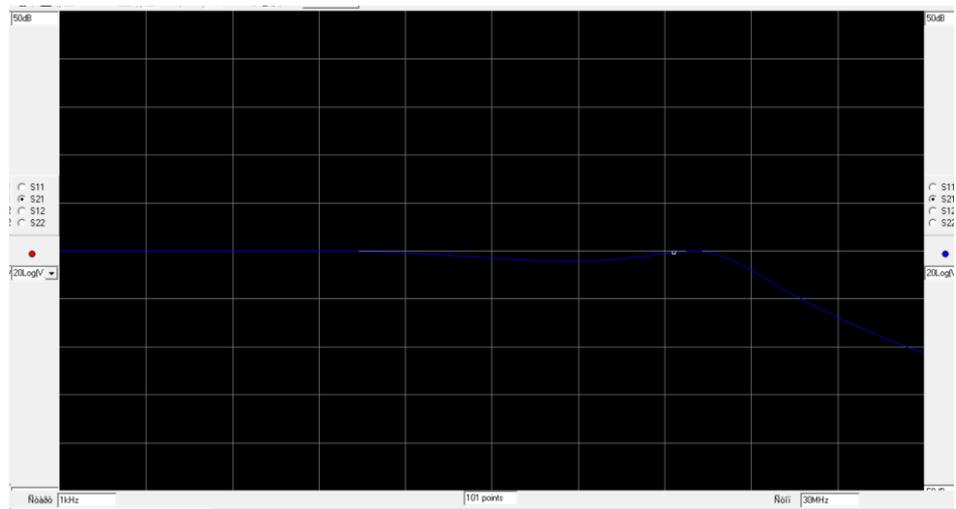


Рисунок 2.13 – Частотная характеристика фильтра 21МГц

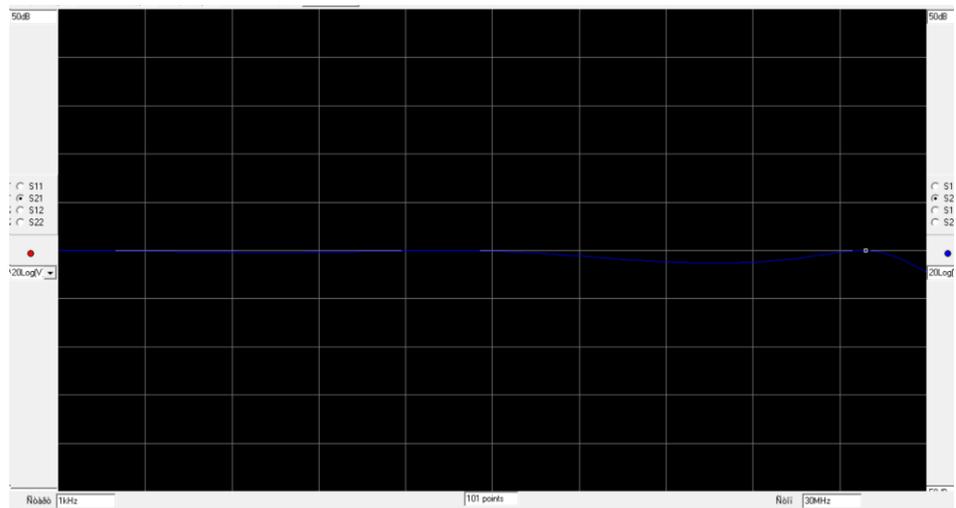


Рисунок 2.14 – Частотная характеристика фильтра 28МГц

3 Разработка и тестирование макета антенны и согласующего устройства

В этой главе будет представлено подробное описание процесса сборки макетной платы согласующего устройства, а также сборки антенны и установке в корпус. Заверением главы будут служить выводы, полученные в ходе работы над данным проектом.

3.1 Подбор и подготовка компонентов для сборки макета платы

На данном этапе проекта происходят финальные изменения теоретической части и переход к непосредственной реализации проекта. В ходе анализа рынка было принято целесообразное решение изготовить некоторые компоненты платы вручную.

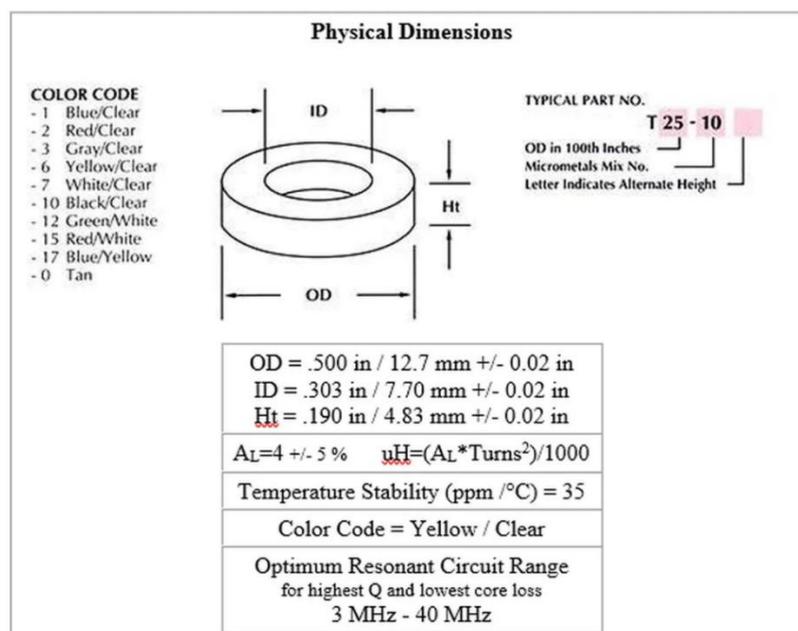


Рисунок 3.1 – Параметры и возможные вариации сердечников

На данном этапе основной задачей является разработка и подготовка катушек индуктивности для платы. При проведении данной работы следует начать с подбора сердечников, а также проволоки для обмоток. В качестве проволоки для обмотки была выбрана монолитная медная с диаметром 0.2мм. Данный выбор был сделан с учетом того что проводник с такими характеристиками будет оптимальным для изготовления обмотки сердечника. В качестве сердечников были выбраны тороидальный ферритовый сердечник T50-6, торомдальный ферритовый сердечник T30-2, а также ферритовые сердечники Amidon T25-6. Для проведения дальнейших работ необходимо было отмерить отрезок проволоки длиной от 30 до 60 см для проведения комфортной

работы по обмотке, далее будет происходить непосредственно намотка проводника на сердечник, в процессе необходимо будет произвести от 10 до 42 витка в зависимости от того, какой показатель индуктивности мы ожидаем получить. Материалы для сердечников выбираются исходя из потребностей и спецификации схемы. В случае данного проекта выбор был сделан в пользу Carbonyl 'E' и Carbonyl 'SF'. Carbonyl 'E'-порошковый материал с высоким объемным сопротивлением, используемый для катушек, работающих на частотах 2МГц и 20МГц. Carbonyl 'SF' материал предназначен для катушек с высокой добротностью и температурной стабильностью для частот 20 МГц - 50 МГц.

Расчет количества витков индуктора проводился по формуле:

$$L[\text{мкГн}] = A_L * \left(\frac{n}{100}\right)^2 \quad (3.1)$$

где A_L – Фиксированная величина для каждого сердечника, изменяемая в пределах 27мкГн– 48мкГн;

n- число витков.

Ниже приведена таблица (3.1) индукторов с показателями индуктивности, а также материалами, из которых состоят индукторы.

Таблица 3.1 – Индукторы и их параметры

Количество	Индуктивность	Тип сердечника	Кол-во витков
3	1 μF	T50-6	13
1	11 μF	T50-6	42
2	600nF	T25-6	15
2	600nF	T30-2	12
2	600nF	T50-6	10
1	7 μF	T50-6	36
1	5 μF	T50-6	31

Для сборки платы необходимо подготовить плату, т.е. протравить дорожки питания, провести лужение данных элементов, залудить заземляющий контакт. Процесс подготовки платы — это крайне важная процедура, где необходимо соблюсти все технологические процессы для достижения необходимого результата.

Начинается данный этап с подготовки трафарета для травления. Печать происходит на глянцевой ламинированной бумаге для фотопечати магнитными чернилами. Именно такая последовательность обеспечивает возможность для переноса трафарета на медную часть текстолита за счет неплотной пропитки бумаги чернилами. Далее происходит перенос при помощи утюжка. Трафарет прикладывается на материал платы, затем утюжится, далее смываются излишки бумаги. Таким образом трафарет оказывается на плате. Большую важность имеет

качественный перенос, а также аккуратная смывка. Неосторожность на данном этапе может привести к дефектам дорожек, а также некорректной работе платы. Далее происходит травление по трафарету.

Химический состав на основе хлорида железа ($FeCl_3$) является наиболее подходящим решением для использования в приборостроении и радиоэлектронике. Благодаря окислительным свойствам вещество активно вступает в реакцию с металлами, а также их солями и оксидами. Для начала работы необходимо приготовить раствор хлорного железа. Для этого понадобятся:

- Термостойкая неметаллическая емкость
- Неметаллический инструмент для размешивания
- Горячая дистиллированная вода (60-80°C)
- Средства защиты

При травлении пластин хлористым железом весовые соотношения в растворе поддерживают в соотношении 1:1-1:3. Скорость травления увеличивается с уменьшением коэффициента, т.е. с увеличением концентрации раствора.

Хлоридное железо добавляют небольшими порциями в налитую в емкость воду при постоянном перемешивании. Полное растворение занимает примерно 20 минут, продолжительность зависит от объема. Полученный состав оставляют на 12 часов, а затем фильтруют в емкость для хранения. Его можно использовать неоднократно.

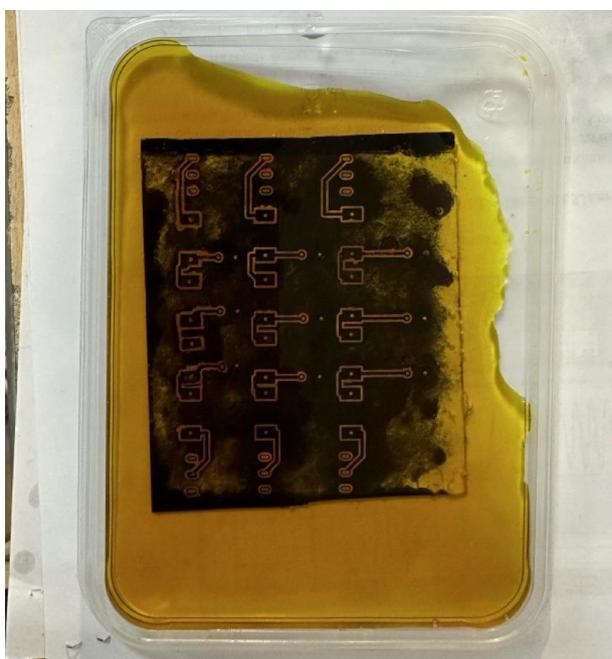


Рисунок 3.2 – Процесс травления платы в растворе хлорного железа

При травлении плата помещается дорожками вверх, ее следует переворачивать, при этом помешивая раствор. Продолжительность травления варьируется в зависимости от температуры раствора и его концентрации. По

окончании процедуры плата изымается из раствора и промывается холодной проточной водой. Результатом процедуры является готовая к лужению плата.

Процесс лужения проводится для защиты медных составляющих от окисления. Во время лужения металлические изделия погружают в расплавленное олово или покрывается слоем припоя при помощи паяльника, что позволяет равномерно покрыть поверхность детали. Для выявления наиболее оптимального способа лужения был проведен анализ статей в сети интернет по данной тематике. Существуют несколько типов типов лужения, каждый из которых применяется в зависимости от задач, которые ставятся в проекте.

Ниже приведены некоторые способы:

- Лужение припоем при помощи паяльника
- Лужение сплавом Вуда
- Лужение сплавом Розе
- Химическое лужение

Анализируя способы, было принято решение использовать способ лужения паяльником, как самый доступный в плане материалов, так и в плане применяемых технологий. Способы лужения суррогатными сплавами являются токсичными за счет наличия в составе ~50% металлического висмута, 25% свинца и 12.5% кадмия. Также к минусам способа стоит отнести крайнюю хрупкость соединений, особенно при недостаточном нагреве сплава. Способ химического лужения не подходит в связи с усложнённым доступом к реагентам, а также необходимостью глубокого понимания процесса и т.к. это не является основной темой исследования, было принято решение отказаться от данного способа. У химического лужения есть неоспоримые плюсы, а именно высокая плотность, равномерность покрытия, а также антифрикционные качества, однако для данной работы не требуется такая точность лужения. Таким образом выбор пал на лужение паяльником. Лужение происходит путем нанесения паяльником разогретого припоя на непротравленные части платы.

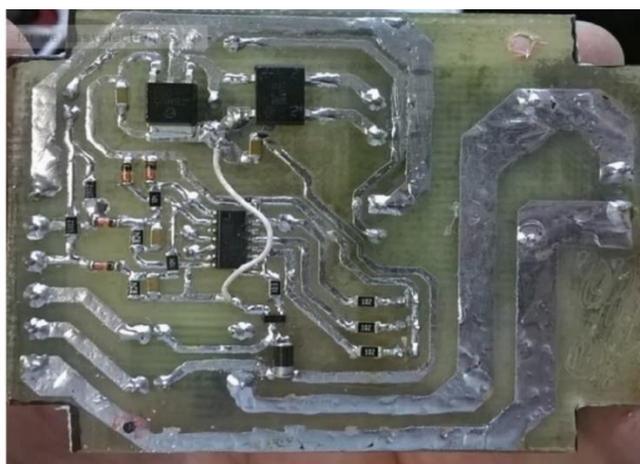


Рисунок 3.3 – Пример лужения при помощи паяльника

Таким образом происходит подготовка компонентов к сборке в целостный макет.

3.2 Сборка макета согласующего устройства и антенны

В ходе сборки макета будут возможны некоторые конструктивные изменения, а также будут созданы различные его итерации для проведения экспериментов, а также разного рода тестов.

Сборка макета начинается с проверки целостности коммутационных дорожек, а также качества лужения, дабы избежать окисления контактов. При выявлении дефектов на полотне проводится его восстановление путем напайки облуженного многожильного медного провода. Рекомендуется использовать провода типа ПГВА (Провод Гибкий Винилхлорид-пластикат Автотракторный) для получения наиболее качественного контакта, обусловленного наличием большого количества меди в сплаве, а также отсутствием оксидной пленки на жилах. После восстановления видимых дефектов (при их наличии) происходит более глубокая диагностика путем прозвонивания линий питания. Таким образом проявляются дефекты, которые недоступны для обнаружения невооруженным взглядом. Далее происходит поиск непосредственно дефекта, далее удаляется при помощи паяльника.

Далее будет необходимо подготовить места для распайки компонентов. Данный процесс происходит путем высверливания отверстий под компоненты. Сверление проводится на станке сверлом 3мм2. Разметка под высверливание отверстий подготавливается на этапе травления медного слоя платы, как это показано на рисунке 3.3. В рамках этой процедуры крайне важно соблюдать нанесенную разметку, так как в противном случае это может нанести непоправимый ущерб для проекта, вплоть до необходимости полного перепроизводства.

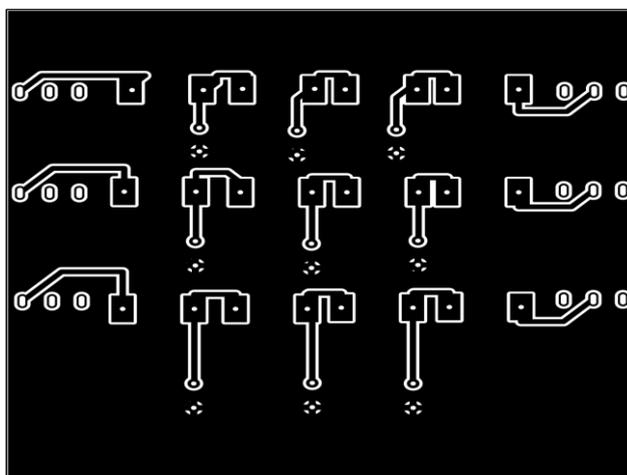


Рисунок 3.4 – Маска для травления медного слоя платы
После данной процедуры плата полностью готова к работе с ней

Далее происходит непосредственно сборка макета. Сборка проводится путем пайки компонентов на заранее подготовленные места пайки. Важно отметить, что перед сборкой все места контакта должны быть залужены, т.е. контактные ножки компонентов, отверстия под пайку т.д. При работе с конденсаторами необходимо учитывать полярность, так как это может привести к их порче, а также травмам в результате экспериментов. Первоначально были запаяны наиболее сложные для пайки компоненты, т.е. тумблеры типа ON/ON. Проблема монтажа заключается в способе крепления тумблеров, предусмотренном его производителем. Для качественной посадки тумблеров на их места было проведено 5 процедур пайки, для того чтобы максимально качественно закрепить тумблер на месте, а также обеспечить качественный контакт, при этом избежав коротких замыканий. После каждой процедуры проводится прозвон цепи, дабы обнаружить потенциальные короткие замыкания. Далее впаиваются индукторы и конденсаторы в, соответствии с картой, где указаны типы индуктора, количество витков в соответствии с индуктивностью (см. таблицу 3.1). После сборки основной части платы происходит подготовка коммутационных кабелей. Для этого необходим коаксиальный кабель с сопротивлением 50 ом, а также 2 разъема типа BNC. Один из концов кабеля зачищается от оплетки, его жила подсоединяется путем пайки к выводам тумблеров, его заземляющий контакт подсоединяется к общему заземлению. Таким же образом обрабатывается кабель, подсоединяемый к антенному устройству. Таким образом получается схема, где согласующее устройство выступает промежуточным звеном между антенной и приемником сигнала.

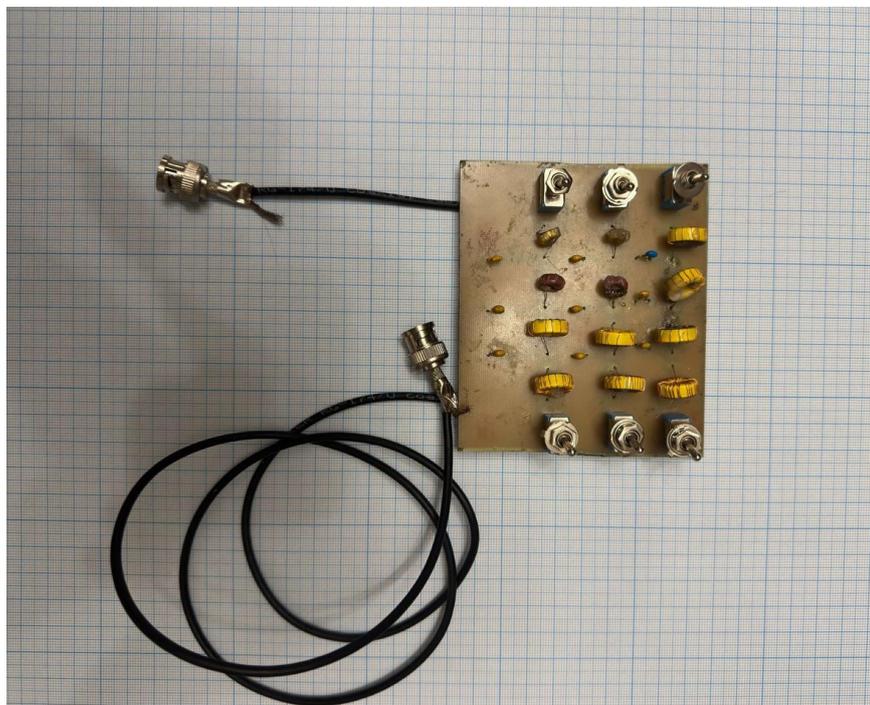


Рисунок 3.5 – Готовый макет согласующего устройства

3.3 Тестирование макета и проведение экспериментов

Экспериментальная часть дипломного проекта является завершающей. В рамках данной части проводится проверка целостности конструкции, а также ее тестирование в различных режимах.

В рамках экспериментальной части проведены испытания антенного устройства со сторонним устройством в роли частотного фильтра. Тесты проводились на частоте 14МГц. При подключении через BNC-разъем сразу же проявился фоновый шум, что свидетельствовало об исправности антенны, а также ее способности принимать сигнал. До подключения согласующего устройства КСВ антенны составил 2.2, что является не самым качественным показателем. При таком показателе КСВ передача данных будет серьезно затруднена. При подключении согласующего устройства КСВ составил 1.01, что является отличным показателем, при котором антенна практически полностью входит в резонанс с волной на выбранной частоте (14МГц).

Далее запланированы эксперименты:

- Проведение тестов каждого отдельного фильтра на отдельной плате.
- Тестирование ФНЧ отдельно от согласующей части схемы (последнего LC-звена)
- Проведение тестов с включением в схему конденсатора с подстраиваемым номиналом

Данные тесты направлены на выявление потенциальных дефектов, а также усовершенствования устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения дипломного проекта были выполнены анализ, моделирование и сборка макета автоматически развертываемой антенной системы наноспутникам, а также следующие задачи:

- Выбор схемных и конструктивных решений для антенной системы.
- Расчёт и моделирование характеристик антенны.
- Расчёт и моделирование характеристик согласующего устройства.
- Разработка печатной платы согласующего устройства.
- Создание действующей макетной реализации антенной системы.
- Выполнение тестовых испытаний антенной системы.

В результате проведенной работы сделаны выводы о надежности системы автоматически развертываемых антенн, а также перспективах развития данного конструктивного решения.

Конструкция демонстрирует работу в нескольких диапазонах, при этом существует потенциал дальнейшей работы и исследований в данном направлении.

Автоматически развёртываемая КВ-антенна наноспутника представляет собой инновационное решение, которое обладает значительным потенциалом для привлечения внимания и интереса радиолюбителей по всему миру, оцениваемого в размере около трех миллионов человек. Разработка наноспутников в Казахстане обладает огромными перспективами, и это проект демонстрирует наше стремление к внедрению передовых технологий в космической сфере.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 И. В. Гончаренко. Антенны КВ и УКВ. Ч.1-5. Радиософт, 2006.
- 2 Отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе «Радиолюбительский наноспутник нового поколения – SU-1». Алматы, 2023 г.
- 3 Отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе “Радиолюбительский спутник нового поколения- SU-1”, авт. Жигалов В. А.
- 4 CUBESAT DESIGN SPECIFICATION
https://webcitation.org/6ABSpR8qR?url=http://www.cubesat.org/images/developers/cds_rev12.pdf
- 5 Теория радиоволн: антенны <https://habr.com/ru/articles/158273/>
- 6 CubeSat Design Specification Rev. 14.1 The CubeSat Program, Cal Poly SLO
https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf
- 7.Миниатюрные антенны для малых комичеких аппаратов типа CubeSat
<https://cyberleninka.ru/article/n/miniaturnye-antenny-dlya-malyh-kosmicheskikh-apparatov-cubesat/viewer>
- 8 Хажгалиева А.А. Дипломный проект “Проектирование спутника учебного назначения”
https://info.aues.kz/diploms/2014/frts/tns/Hazhgalieva_AUES.pdf
- 9 Инструкция к написанию аннотации <https://disszakaz.ru/publikatsii/kak-napisat-annotatsiyu-k-state/>
- 10 Надежно как швейцарские часы, CubeSaty и надежность
<https://habr.com/ru/articles/739678/>
- 11 <https://db.satnogs.org/satellite/BYLD-5095-5765-9404-4681>

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Леготкин Максим Владимирович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Разработка автоматически развертываемой антенной системы наноспутника

Научный руководитель: Сунгат Марксұлы

Коэффициент Подобия 1: 2.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 3

Знаки из здругих алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

30.05.2024
Дата

Марксұлы С
проверяющий эксперт

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Леготкин Максим Владимирович

Тақырыбы: Разработка автоматически развертываемой антенной системы наноспутника

Жетекшісі: Сұнғат Марксұлы

1-ұқсастық коэффициенті (30): 2.3

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0.9

Әріптерді ауыстыру: 2

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 3

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні 30/05/2024

Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Леготкин Максим Владимирович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Разработка автоматически развертываемой антенной системы наноспутника

Научный руководитель: Сунѓат Марксұлы

Коэффициент Подобия 1: 2.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 3

Знаки из здругих алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

Дата 30/05/2024

Заведующий кафедрой



ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу

Леготкин Максим Владимирович

6B07112 – Electronic and Electrical Engineering

Тема: «Разработка автоматически развертываемой антенной системы наноспутника»

В последние годы актуальность исследований в области космических технологий значительно возросла. Особое внимание уделяется разработке малых космических аппаратов, таких как наноспутники, что обусловлено их экономической эффективностью и широкими возможностями применения в научных исследованиях и телекоммуникациях. В этом контексте работа Леготкина Максима Владимировича заслуживает особого внимания, поскольку она направлена на решение одной из актуальных задач — разработку автоматически развертываемой антенной системы для наноспутника.

Работа содержит обширный теоретический обзор существующих решений в области антенных систем для космических аппаратов, что свидетельствует о глубоком понимании студентом текущих трендов и научных подходов в выбранной области исследований. Важной частью работы является анализ конструктивных и схемных решений, выбор наиболее эффективных материалов и технологий для создания антенны.

Экспериментальная часть работы, включающая расчет и моделирование характеристик антенны, разработку печатной платы и создание действующего макета антенной системы, была выполнена на высоком уровне.

Отметим участие в научных конференциях, где представлял результаты своей работы, что свидетельствует о его способности аргументировано и ясно излагать материал, а также обсуждать научные вопросы с профессиональным сообществом.

Работа Максима Владимировича Леготкина является актуальной, научно обоснованной и имеет значительный практический потенциал. Работа рекомендуется к защите с присвоением степени бакалавра по специальности 6B07104 – Electronic and Electrical Engineering, и оценивается на оценку 87 (хорошо).

Научный руководитель:
ассоц-профессор, к.т.н



Жигалов В.А.

РЕЦЕНЗИЯ

На дипломную работу

Леготкин Максим Владимирович

Специальность: 6B07112 – Electronic and Electrical Engineering

На тему: «Разработка автоматически развёртываемой антенной системы наноспутника»

ЗАМЕЧАНИЕ К РАБОТЕ

В работе студента Леготкина Максима Владимировича описывается процесс анализа, разработки и сборки автоматически развёртываемой антенной системы наноспутника.

Первая глава включает в себя анализ и стандарта CubeSat, а также антенных устройств типа диполь.

Во второй главе приведено проектирование конструкции, расчет и моделирование антенны, а также ее согласующего устройства.

В третьей главе подробно описывается полный процесс сборки макета автоматически развёртываемой антенной системы, а также подведение итогов реализации проекта.

Оценка работы

Студент отлично ориентируется в теоретическом материале, работа выполнена согласно техническому заданию к дипломной работе, соблюдены все стандарты университета по написанию дипломных работ.

Считаю, что дипломная работа выполнена на 90%, а дипломант, Леготкин Максим Владимирович, заслуживает присвоения академической степени бакалавра специальности 6B07112 – Electronic and Electrical Engineering.

Рецензент
PhD, асоц.проф.,
Алматинского университета
энергетики и связи им. Г.Даукеева



Алмуратова Н.К.

«00» 05 2024 г.