ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
(г. Воронеж)

Факультет авиационного радиоэлектронного оборудования

«К ЗАЩИТЕ»

Начальник кафедры № 103

полковник С. Попов
(воинское звание, подпись, фамилия)

«__ » июня 2021 г.

Разработка аппаратуры бортовой РЛС

Обнаружения воздушных целей в Х-диапазоне
(наименование темы)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

10.3.19.066.0 00 ПЗ
(обозначение документа)

КУРСАНТА
курсанта
(воинское звание)
Иванова.Д.И.
(фамилия и инициалы)

(подпись)

«__» июня 2021 г.

РУКОВОДИТЕЛЬ

доктор технических наук

профессор Н.Тихомиров
(воинское звание, подпись, фамилия)

«__» июня 2021 г.

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина
(г. Воронеж)

_____
(гриф)

УТВЕРЖДАЮ
НАЧАЛЬНИК ФАКУЛЬТЕТА № 10
ПОЛКОВНИК
И. Клочков
«30» сентября 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу

(на дипломный проект)

Курсанту 10 факультета, 5 курса
факультет, курс

рядовому
воинское звание

Иванову Дмитрию Игоревичу
фамилия, имя, отчество

Тема: **Разработка аппаратуры бортовой РЛС обнаружения воздушных целей в X-диапазоне**

Руководитель: доктор технических наук, с.н.с. Тихомиров.Н.М.

Консультанты: кандидат технических наук, доцент полковник Попов.С.А

Начало проектирования 14 апреля 2021 г.

Срок представления к защите 21 мая 2021 г.

Начальник кафедры № 103
полковник
С. Попов
« 30 » сентября 2020 г.

УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

I. Содержание (перечень подлежащих разработке вопросов) и исходные данные

Вопросы, подлежащие разработке:

Введение.
1 Постановка задачи
2 Особенности разработки активной фазированной антенной решетки (АФАР) бортовой радиолокационной станции
3 Разработка основных узлов АФАР
3.1 Структурной схема БРЛС
3.2 Структурная схема и принцип работы АФАР
3.3 Разработка АФАР
3.3.1 Разработка излучателя для АФАР
3.3.2 Построение диаграммы направленности и выбор амплитудного распределения АФАР
3.3.3 Разработка модуля антенного полотна
3.4 Разработка СВЧ тракта приемо-передающего модуля (ППМ)
3.4.1 Принцип работы ППМ и основные технические характеристики
3.4.2 Структурная схема и принцип действия
3.4.3 Основы построения сложнофункциональной монолитной интегральной схемы
3.4.4 Расчет габаритных размеров корпуса ППМ
3.4.5 Выбор элементной базы
3.4.6 Построение структурной и электрической принципиальной схем СВЧ тракта ППМ
3.4.7 Расчет коэффициента шума
3.5 Разработка СВЧ распределительной системы
3.5.1 Структурная схема и основные принципы построения
3.5.2 Разработка сумматора-делителя 2:1
3.5.3 Разработка сумматора-делителя 4:1
3.5.4 Разработка СВЧ распределительной платы
3.6 Разработка алгоритма расчета амплитудно-фазового распределения (АФР)
4 Дополнительный раздел (БЖД)
4.1 Постановка задачи
4.2 Опасные и вредные факторы, возникающие в процессе выполнения работы
4.2.1 Обеспечение электробезопасности
4.2.2 Обеспечение пожаробезопасности
4.2.3 Классификация устройства по условиям эксплуатации
4.2.4 Меры защиты от опасного воздействия СВЧ излучения
Заключение
Список использованных источников

Исходные данные для проектирования:

Необходимо разработать АФАР на отечественной элементной базе, работающую в X-диапазоне частот: диапазон частот (ГГц) - 9,7-10,3, максимальная дальность действия (км) – 200 (при $\sigma_ц$ = 3 м^2), сектор электронного сканирования по углу места - $\pm 45^0$, по азимуту - $\pm 60^0$, габариты ШхВхГ (м) - 0,7х0,7х0,4. Разработка АФАР БРЛС должна в себя включать разработку следующих составных частей:
- Разработка антенной решетки (излучатель, модуль антенного полотна);

- Разработка СВЧ тракта, а также определение основных технических характеристик цифровой части приемо-передающего модуля (ППМ);
- Разработка СВЧ распределительной системы (СВЧРС);
- Разработка алгоритма расчета коэффициентов амплитудного и фазового распределений для системы управления лучом (СУЛ).

II. Материалы, представляемые к защите:

а) Графическая часть работы – чертежи и схемы (графические документы работы)

Общий объем графической части должен составлять 8-10 листов формата А1

Графическая часть должна содержать: иллюстративный материал ВКР

б) Пояснительная записка.

Объем записки не более 100 листов в текстовом редакторе Word.

Пояснительная записка должна содержать:

1. Титульный лист.
2. Задание на дипломную работу.
3. Содержание.
4. Введение (формулировка целей и задач и краткая характеристика работы).
5. Основная часть (должна состоять из разделов и подразделов в соответствии с перечнем вопросов, подлежащих разработке, которые указаны в п.1 настоящего задания).
6. Заключение (основные результаты, полученные в результате проектирования, апробация полученных результатов).
7. Список использованной литературы.
8. Приложения (по необходимости).
9. Ведомость дипломной работы
10. Заверительный лист.

в) Программные продукты, использованные при моделировании.

Среда программирования MathCad, MatLab (имитационное моделирование, расчет надежности, военно-экономическое обоснование)

В пояснительной записке представить листинг программ расчета.

III.Методические указания:

3.1. Содержание выпускной квалификационной работы (ВКР) определяется в соответствии с п.1 настоящего задания. В разделах необходимо:

Введение. Обосновать актуальность выбранной темы данной ВКР, связанной с разработкой активной фазированной антенной решетки (АФАР) бортовой радиолокационной станции (БРЛС) обнаружения воздушных целей в Х-диапазоне частот на основе отечественной элементной базы. Показать, что в настоящее время к АФАР приковано особое внимание в сфере разработки БРЛС.

Первый раздел. Рассмотреть постановку задачи при разработке блока бортовой радиолокационной станции (в части АФАР) на отечественной элементной базе, работающей в Х-диапазоне частот, обеспечивающей максимальную дальность обнаружения воздушных целей 200 км с ЭПР не более 3 $м^2$, обзором по углу места $\pm 45^0$, по азимуту $\pm 60^0$, полоса частот 9700 – 10300 МГц.

Второй раздел. Провести анализ особенностей разработки АФАР БРЛС, которая должна включать разработку следующих составных частей: разработка антенной решетки (излучатель, модуль антенного полотна); разработка СВЧ тракта, а также определение основных технических характеристик цифровой части приемо-передающего модуля (ППМ); разработка СВЧ распределительной системы (СВЧРС); разработка алгоритма расчета коэффициентов амплитудного и фазового распределений для системы управления лучом (СУЛ).

Третий раздел. Обосновать и разработать структурную схему БРЛС с АФАР, содержащую следующие основные составные части: антенная решетка, приемо-передающий модуль (ППМ), система управления лучом, СВЧ распределительная система, синтезатор частот, СВЧ приемник, вычислитель. Построить диаграмму направленности и выбрать амплитудное распределение АФАР по разработанному алгоритму расчета амплитудно-фазового распределения.

Четвертый раздел. Показать, что данная выпускная квалификационная работа посвящена разработке блока бортовой радиолокационной станции, а именно активной фазированной антенной решетке. Отметить, что разработка узлов АФАР велась на ЭВМ (привести название машины). Указать, что пользователям ЭВМ необходимо знать основные правила электробезопасности, а также пожаробезопасности, а также владеть информацией о специфике воздействия на человека вредных факторов и методах борьбы с ними. Приняв во внимание вышеперечисленное, необходимо рассмотреть возможности обеспечения безопасной для жизни человека работу.

В заключении обобщить основные результаты, полученные в результате проектирования, сделать выводы, выработать рекомендации по использованию разработанных схемных решений.

3.2 Содержание графической части ВКР и структура пояснительной записки отрабатываются в соответствии с п. 2. настоящего задания. Порядок их разработки и представления определяется методическими указаниями по выполнению ВКР.

3.3 Последовательность выполнения ВКР по этапам устанавливается календарным планом ее выполнения, составленным курсантом в первую неделю работы. В плане отмечаются основные этапы работы, не превышающие 10% от всего объема работ, и сроки представления отчетных материалов руководителю. Полная готовность ВКР должна быть не позднее указанного на первой странице срока представления работы. План утверждается руководителем выпускной квалификационной работы. Ответственность за своевременное представление материалов лежит на исполнителе ВКР.

3.4 Разработка материалов, имеющих гриф секретности, осуществляется в соответствии с требованиями приказа МО РФ № 010 от 2005 года.

IV. Рекомендуемая литература:

1 Червань Д.А., Халимов Н.Р. Методические указания по выполнению выпускной квалификационной работы по специальности «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования». Воронеж: ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), 2015. - 67с.;

2 О.Г. Вендик, М.Д.Парнес. Антенны с электрическим сканированием. 2001. 252с.

3 Д.И. Воскресенский. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. М.: Радиотехника, 2012. 744с.

4 В.Л. Гостюхин, В.Н. Трусов, А.В. Гостюхин. Активные фазированные антенные решетки. М. :Радиотехника, 2011. 303с.

5 Б.А. Панченко, Е.И.Нефёдов. Микрополосковые антенны. М.: Радио и связь, 1986. 144с.

6 Р.С. Хансен. Фазированные антенные решетки, 2-е издание. М.: Техносфера, 2012. 560с.

7 Zhi Ning Chen, Michael Y.W. Chia. Broadband planar antennas. Wiley, 2006.-260p.

8 Debatosh Guha, Yahia M.M. Antar. Microstrip and printed antennas. Wiley, 2011.- 506p.

9 Kin-Lu Wong. Compact and broadband microstrip antennas. Wiley, 2002.-301p.

10 И.Н. Ростокин. Теория физических волн. Муром.: «ВлГУ», 2014. 119с.

11 Влияние поляризации зондирующего радиосигнала на эффективность выделения отклика надводной цели // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015,вып.(№)3. С. 140–152.

12 Проектирование полосковых устройств СВЧ. Ульяновск.: «УлГТУ», 2001.123с.

13 Ю.Е. Мительман. Проектирование антенных систем в ANSOFT HFSS. Екатеринбург.: «УрФУ», 2012. 49с.

14 Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск / В.Н. Тяпкин, А.Н. Фомин, Е.Н. Гарин, Ю.Л. Фатеев, В.П. Бердышев, А.А. Наговицын, А.В. Темеров, В.Г. Сомов, И.В. Лютиков. Красноярск.: «СФУ», 2011. 536с.

15 15. А.В. Вайсблат. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. М.: Радио и связь, 1987. 120с.

16 Карпов Ю. Отечественные транзисторные усилители СВЧ // Компоненты и технологии. 2007, вып.(№)1. С. 1-7.

17 Активные фазированные антенные решетки / В.Л. Гостюхин, В.Н. Трусов, К.Т. Климов, Ю.С. Данич. М.: Радио и связь, 1993. – 270 с.

18 Е.Е. Дмитриев. Основы моделирования в Microwave Office 2009.–2011. 175с.

19 ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Стандартинформ, 2016.

20 Правила устройства электроустановок. 7 издание. 2009 - 220с.

21 Свод правил 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: 2009.

22 ФЗ - 123 Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон [принят Гос. Думой 04.07.2008]

23 ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М.: Стандартинформ, 2006.

24 Обеспечение надежности авиационного радиоэлектронного оборудования. Разработка военно-эксплуатационных вопросов в курсовых и дипломных проектах/ Под. ред. В.Ф. Воскобоева. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1989.

Подпись руководителя полковник С. Попов

« 30 » сентября 202 0 г.

Задание принято к исполнению « 30 » сентября 202 0 г.

Подпись курсанта

Содержание

Введение.....
1 Постановка задачи.....
2 Особенности разработки АФАР бортовой радиолокационной станции.
3 Разработка основных узлов АФАР.....
3.1 Структурная схема БРЛС.....
3.2 Структурная схема и принцип работы активной фазированной антенной решетки…….
3.3 Разработка антенной решетки.....
3.3.1 Разработка излучателя для антенной решетки.....
3.3.2 Построение диаграммы направленности и выбор амплитудного распределения антенной решетки……
3.3.3 Разработка модуля антенного полотна.....
3.4 Разработка СВЧ тракта приемно-передающего модуля (ППМ).....
3.4.1 Принцип работы приемно-передающего модуля и основные технические характеристики.
3.4.2 Структурная схема и принцип действия.....
3.4.3 Основы построения сложно функциональной монолитной интегральной системы..
3.4.5 Выбор элементной базы.....
3.4.6 Построение структурной и электрической принципиальной схем СВЧ тракта ППМ.....
3.4.7 Расчет коэффициента шума.....
3.5 Разработка СВЧ распределительной системы.....
3.5.1 Структурная схема и основные принципы построения.....
3.5.2 Разработка сумматора - делителя 2:1.....
3.5.3 Разработка сумматора - делителя 4:1.....
3.5.4 Разработка СВЧ распределительной платы.....
3.6 Разработка алгоритма расчета амплитудно-фазового распределения (АФР)..
4 Дополнительный раздел (БЖД).....
4.1 Постановка задачи.....
4.2 Опасные и вредные факторы, возникающие в процессе выполнения работы.
4.2.1 Обеспечение электробезопасности.....
4.2.2 Обеспечение пожаробезопасности.....
4.2.3 Классификация устройств по условиям эксплуатации.....
4.2.4 Меры защиты от опасного воздействия СВЧ излучения.....
Заключение.....
Список использованных источников.....

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ,ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В РАБОТЕ

АФАР-

БРЛС-

ФАР-

РЛС-

ПФАР-

ВКС-

СВЧ(РС)-

СУП-

КПД-

ППМ-

ФЛАН-

КСВ-

МШУ-

МИС-

МАП-

РПМ-

БЭК-

Введение

Темой данной ВКР является разработка активной фазированной антенной решетки (АФАР) бортовой радиолокационной станции (БРЛС) обнаружения воздушных целей в Х-диапазоне частот на основе отечественной элементной базы.

Х-диапазон – самый распространенный и дальний по обнаружению. Его название происходит от аббревиатуры Х (секретный), используемой в годы Второй Мировой войны. Электромагнитный спектр таких РЛС достигает от 8 до 12 ГГц, то есть длина волны составляет от 3,75 до 2,5 см.

В настоящее время к АФАР приковано особое внимание в сфере разработки БРЛС.На сегодняшний момент самую важную часть БРЛС составляет фазированная антенная решетка (ФАР).Существует два типа решеток: пассивная и активная, соответственно, это ПФАР и АФАР.

ПФАР отличается от АФАР тем, что у пассивной системы сигнал с фазовращателей поступает на один приемопередатчик, тогда как в активной решетке каждая ячейка имеет свой приемопередатчик, и их число может превышать тысячу штук. Если в пассивной решетке повредится передатчик, то радар перестает функционировать. Если же у активной решетки выйдут из строя передатчики нескольких ячеек, то радар продолжит свою работу, что делает систему АФАР более надежной.

Но главное отличие активной решетки от пассивной – это чувствительность и возможность работы активной системы на нескольких частотах одновременно, что означает, что АФАР способна одновременно сопровождать десятки целей, делать картографирование местности, глушить и защищаться от помех радара противника. На сегодняшний день наиболее известными БРЛС с АФАР являются: «ЖУК-А(Э)» и «БЕЛКА Н-036». «ЖУК-А(Э)» является экспортным вариантом разрабатываемой «ЖУК-А», предназначенным для поставки индийским ВВС. Следовательно, разработка БРЛС с АФАР для отечественных ВКС является актуальной задачей.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей данной ВКР является разработка блока бортовой радиолокационной станции (АФАР) на отечественной элементной базе, работающей в Х-диапазоне частот, обеспечивающей максимальную дальность обнаружения воздушных целей 200 км с ЭПР не более 3 м2,обзором по у глу места ±450, по азимуту ±600, полоса частот 9700 – 10300МГц.
Основные параметры разрабатываемого блока приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные параметры разрабатываемого блока БРЛС (АФАР).

Диапазон частот, ГГц	9,7-10,3
Максимальная дальность действия, км	200
Угол качания луча (угол места), град.	±450
Угол качания луча (азимут), град.	±600
ЭПР цели, м2 3	
Габариты (ДхВхГ), м	0,7х0,7х0,4

Разработка АФАР БРЛС должна в себя включать разработку следующих составных частей:
- Разработка антенной решетки (излучатель, модуль антенного полотна);
- Разработка СВЧ тракта, а также определение основных технических характеристик цифровой части приемо-передающего модуля (ППМ);
- Разработка СВЧ распределительной системы (СВЧРС);
- Разработка алгоритма расчета коэффициентов амплитудного и фазового распределений для системы управления лучом (СУЛ).

2 ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ АФАР БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Преимуществами передающих АФАР является отсутствие общего тракта, по которому передается суммарная мощность, и тот факт, что сложение мощностей многих передатчиков осуществляется в пространственном луче, что снимает проблемы, связанные с возможностью электрического пробоя тракта. Для обеспечения когерентности колебаний во всех передатчиках они должны быть синхронизированы с помощью единого возбудителя. Управление фазой в передающих АФАР производится фазовращателями, включенными на входе генератора или в предварительных каскадах усиления, т.е. в местах с малым уровнем мощности, что снижает потери, вносимые фазовращателями. Аналогично в приемных АФАР фазовращатели могут быть помещены не на входе приемника, а на выходе ВЧ-усилителя или, что удобнее, в тракте промежуточной частоты. Применение АФАР позволяет реализовать распределение амплитуд в элементах антенны изменением мощности отдельных передатчиков или регулированием усиления приемника.

Разработка АФАР для БРЛС обусловлена рядом сложностей:

- габаритные размеры;
- масса;
- относительно небольшой КПД.

К этому добавляются сложности разработки АФАР на отечественной элементной базе, а именно:

- слабое развитие электронной промышленности;
- сравнительно небольшой выбор диэлектрических материалов.

Наилучшим решением является построение антенной решетки на основе множества одинаковых излучателей и приемо-передающих модулей с использованием микрополосковой технологии.

Антенные решетки делятся на линейные, поверхностные и объемные. Наибольшее распространение получили линейные антенные решетки, ввиду менее сложного математического описания. По методу управления лучом решетки делятся на механические, электромеханические и электрические [1]. Принцип работы первых заключается в том, что для управления ДН антенны необходимо поворачивать саму антенну.

Недостатки этого метода
были описаны выше. Вторые характеризуются поворотом отдельного элемента (например, облучателя зеркальной антенны).
Принцип работы третьих заключается в изменении амплитудно-фазового распределения (АФР) в раскрыве решетки.
«Преимущества антенн с электрическим сканированием:
- в одном луче складывается мощность большого числа излучателей;
- извлечение большего количества полезной информации из сигналов, которые приняты каждым элементом в отдельности;
- надежность работы антенны выше, за счет того, что при выходе одного излучателя из строя, АР продолжит работу с минимальными потерями [2].

Недостатки антенн с электрическим сканированием:

- достаточно высокая сложность;
- высокая стоимость;
- высокие эксплуатационные расходы.»

Так как антенная решетка состоит из множества однотипных элементов, то в простейшем случае (линейка излучателей) закон распределения тока будет выглядеть следующим образом: Inexp(in).
Максимум диаграммы направленности может быть найден с помощью следующего выражения (1):

$$\theta_{гл}=\arcsin(\varphi/\kappa d)=\arcsin(\varphi\lambda/2\pi d) \quad (1)$$

Изменение положения диаграммы направленности (ДН) антенной решетки может быть достигнуто, исходя из формулы (1), двумя способами:
- изменением длины волны (изменение частоты);
- изменением фазы.

Соответственно, в первом варианте антенная решетка называется с частотным сканированием, а во втором варианте - с фазовым. Антенные решетки основанные на фазовом сканировании называются фазированными антенными решетками (ФАР). С целью получения на выходе отдельного излучателя требуемого уровня выходного сигнала необходимо включить в антенную решетку управляемый активный элемент – управляемый усилитель, управление которым может быть достигнуто за счет использования перед обычным усилителем управляемого аттенюатора. Данный вид антенных решеток получил название активных фазированных антенных решеток (АФАР).

3 РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ УЗЛОВ АФАР

3.1 Структурная схема БРЛС

БРЛС с АФАР содержит следующие основные составные части:

- Антенная решетка
- ППМ
- Система управления лучом
- СВЧ распределительная система
- Синтезатор частот
- СВЧ приемник
- Вычислитель



Рисунок 1 - Структурная схема БРЛС

3.2 Структурная схема и принцип работы активной фазированной антенной решетки

Антенная решетка, ППМ и СВЧ распределительная входят в состав активной фазированной антенной решетки (АФАР).

Структурная схема разрабатываемого блока представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структурная схема АФАР

На СВЧ распределительную систему подается несколько сигналов высокой мощности, где они делятся на соответствующее количество ППМ. Далее сигнал в каждом ППМ делится на 4 канала. В каждом канале в соответствии с заданным амплитудно-фазовым распределением сигнал изменяется по фазе и амплитуде, усиливается и затем приходит на отдельный излучатель антенной решетки, после чего излучается в пространство.

3.3 Разработка антенной решетки

Антенная решетка представляет собой антенну, состоящую из множества излучателей, разнесенных на заранее рассчитанное расстояние друг от друга и расположенных в определенной конфигурации. Как было отмечено ранее, в данной ВКР используется плоская активная фазированная антенная решетка.

Найдем необходимое количество каналов антенной решетки. Для этого воспользуемся основным уравнением радиолокации (2).

$$Dmax = \sqrt[4]{\frac{Ризл * Gизл * Ar * \sigma}{(4 * \pi)^2 * Prmin}} \quad (2)$$

Dмакс– максимальная дальность действия БРЛС;
Ризл – мощность излучаемого сигнала (4);
Gизл– коэффициент усиления антенной решетки на передачу (5);
Prmin– минимальная мощность на входе, приемника при которой возможно обнаружить отраженный от цели сигнал;
Ar– эффективная площадь антенны (3);
σ – ЭПР цели

$$Ar = \frac{Gr * \lambda^2}{4 * \pi} \quad (3)$$

Gr – коэффициент усиления на прием (6);
λ – длина волны.

Зададимся следующими параметрами, приведенными в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры для расчета количества каналов антенной решетки

Наименование параметра	Значение параметра
Чувствительность приемника, Вт	1e-17
Мощность, передаваемая одним излучателем, Вт	5
Коэффициент усиления одного излучателя, раз	3,5

$$Ризл = N * Ризл1 \quad (4)$$

$$Gизл = N * Gизл1 \quad (5)$$

$$Gr = N * 0{,}5 * Gизл1 \quad (6)$$

Ризл1 – мощность, передаваемая одним излучателем;
Gизл1 – коэффициент усиления одного излучателя;
N – количество каналов.
Подставив (4 - 6) в 2 получим

$$Dmax = \sqrt[4]{\frac{N^3 Ризл1 * Gизл1^2 * \lambda^2 * \sigma * 0{,}5}{(4 * \pi)^3 * Prmin}} \quad (7)$$

Выразив из формулы (7) N, получим следующее выражение (8):

$$N = \sqrt[3]{\frac{Dмакс^4 * (4 * \pi)^3 * Prmin}{Ризл1 * Gизл1^2 * \lambda^2 * \sigma * 0{,}5}} \quad (8)$$

Мощность на выходе каждого канала ППМ примем равной 5 Вт, а коэффициент усиления одиночного излучателя примем равным не менее 3,5 раз или 5,5 дБ. Подставив значения параметров в формулу (4.2.7) и округлив результат, получим (9)

$$N = \sqrt[3]{\frac{200000^4 * (4 * \pi)^3 * 10^{-17}}{5 * 3{,}5^2 * 0{,}029^2 * 3 * 0{,}5}} = 747 \quad (9)$$

Следовательно, для обеспечения дальности 200 км необходимо, чтобы антенная решетка состояла не менее чем из 747 излучателей. Существует два основных способа размещения излучателей в антенной решетке: прямоугольный и треугольный (гексагональный), изображенные на рисунке 3 [3].

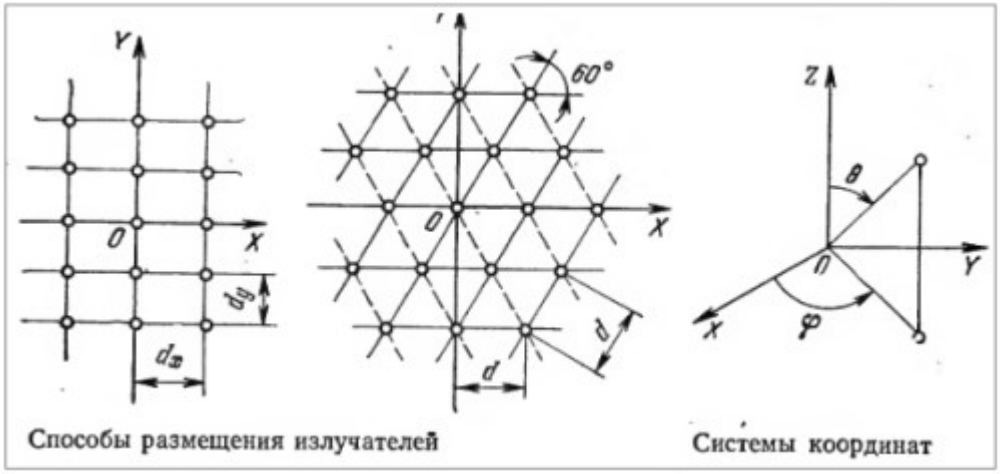

Рисунок 3 – Размещение излучателей.

При прямоугольном размещении излучателей максимальное расстояние между элементами антенной решетки по оси x и y рассчитывается из условий (10 - 11)

$$\frac{d_{xmaxrec}}{\lambda_{min}} \leq \frac{1}{1 + \sin\theta_{xmax}}$$

(10)

$$\frac{d_{ymaxrec}}{\lambda_{min}} \leq \frac{1}{1+\sin\theta_{xmax}}$$

(11)

$$\frac{d_{xmaxtri}}{\lambda_{min}} \leq \frac{2}{\sqrt{3}} * \frac{1}{1+\sin\theta_{xmax}}$$

(12)

$$\frac{d_{ymaxtri}}{\lambda_{min}} \leq \frac{1}{1+\sin\theta_{ymax}}$$

(13)

Подставив известные данные из ТЗ получим: $dxmaxrec$ **= 15 мм**; $dxmaxrec$ **= 16 мм**; $dxmaxtri$ **= 17,3 мм**; $dymaxtri$ **= 16 мм**.

При гексагональном размещении излучателей максимальное расстояние между излучателями по оси x больше 17,3 мм > 15 мм. Этот факт позволяет достичь большего коэффициента усиления при использовании такого же количества излучателей, и следовательно, удешевить разрабатываемую антенную решетку. Так как в антенной решетке будут использоваться четырехканальные приемо-передающие модули, необходимо обеспечить, чтобы в каждом ряду количество излучателей было кратно 4. К тому же целесообразно использовать симметричную антенную решетку в обеих плоскостях, так как это позволит при отклонении луча получать симметричную диаграмму направленности. С помощью алгоритма, написанного в среде МАТЛАБ, была получена антенная решетка, изображенная на рисунке (4) [4].

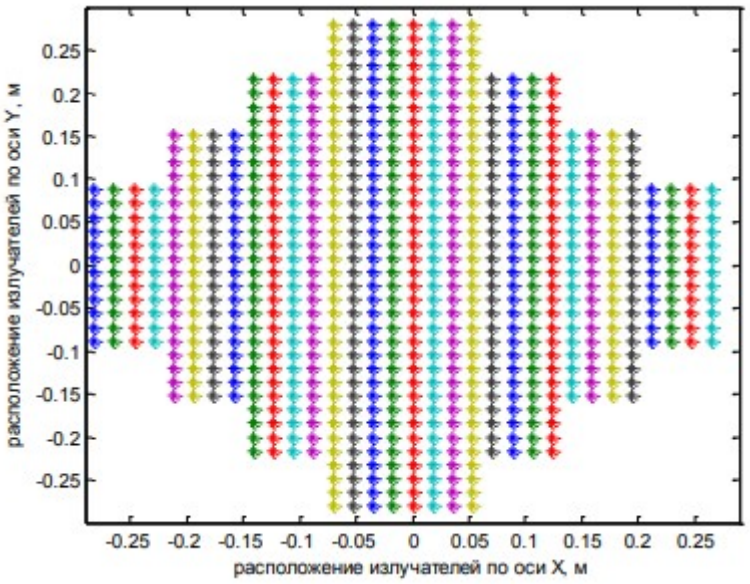

Рисунок 4 – Распределение излучателей в антенной решетке при прямоугольном размещении.

Максимальное количество излучателей по оси x составило $Nxmax$ = 32, по оси y – $Nymax$ = 36. Общее количество излучателей можно пересчитать,

сложив количество излучателей каждой линии по x (14):

$$N = 8 * 8 + 16 * 8 + 24 * 8 + 32 * 12 = 768 \quad (14)$$

С помощью формул (15) и (16) рассчитаем апертуру антенны по оси x и y.

$$L_x = d_{xmaxtri} * N_{xmax} \quad (15)$$

$$L_y = d_{ymaxtri} * N_{ymax} \quad (16)$$

Апертура антенны по оси **x** $Lx = 17{,}6 * 32 = 563{,}2$ **мм**, а по оси y Ly =16*36=576 мм. Также были рассчитаны координаты излучателей при гексагональном размещении. На рисунке (5) приведены результаты расчета.

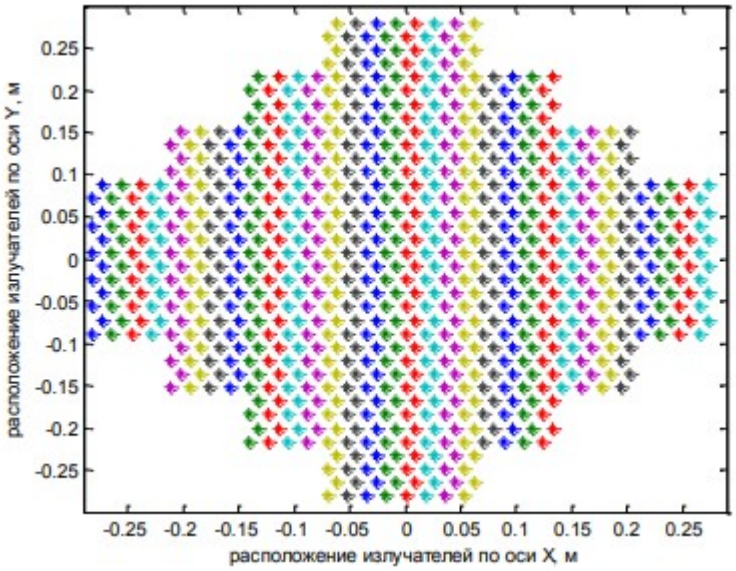

Рисунок 5 – Размещение излучателей и их координаты при гексагональном размещении

После приведения формы антенной решетки к гексагональной необходимо учесть небольшое увеличение апертуры по x (17)

$$Lx = dxmaxtri * Nxmax + 0{,}5 * dxmaxtri \quad (17)$$

В результате чего получим: $Lx = 17{,}6 * 32 + 0{,}5 * 17{,}6 = 572$

Ly **=16*36=576 мм.**

3.3.1 Разработка излучателя для антенной решетки

В данной ВКР было уделено отдельное внимание разработке излучателя. Она включает в себя следующие этапы:

- выбор типа излучателя;
- выбор вида излучателя;
- создание модели в и оптимизация ее параметров;
- выбор разъема;
- разработка технологии монтажа;

- построение диаграммы направленности.

3.3.1.1 Выбор типа излучателя

В бортовых радиолокационных станциях применяют следующие типы излучателей:

- печатные;
- волноводные;
- плоские спиральные антенны.

Анализ современных БРЛС с АФАР показал, что широкое применение получили микро полосковые излучатели. На рисунке (6) представлена антенная решетка БРЛС «ЖУК-АЭ».



Рисунок 6 – БРЛС «ЖУК-АЭ».

Их использование обусловлено в первую очередь компактностью, а также более низкой массой, что является одним из наиболее важных параметров при использовании РЛС на борту летательных аппаратов. К тому же они имеют более простую конструкцию [5]. Отмечается и ряд недостатков таких как, изменение параметров печатных плат от температуры и трудность конструирования. Так как преимущества использования микро полосковых антенн преобладают над недостатками и помимо этого в ходе проектирования будут найдены решения их преодоления, будем использовать данный тип излучателя.

3.3.1.2 Выбор вида излучателя

Существует множество видов микро полосковых излучателей, из которых можно выделить основные и наиболее часто применяемые в современном вооружении и оснащении летательных аппаратов. Это антенна «Вивальди», патч-антенна, а также печатный диполь. Виды микро полосковых излучателей приведены на рисунке (7).

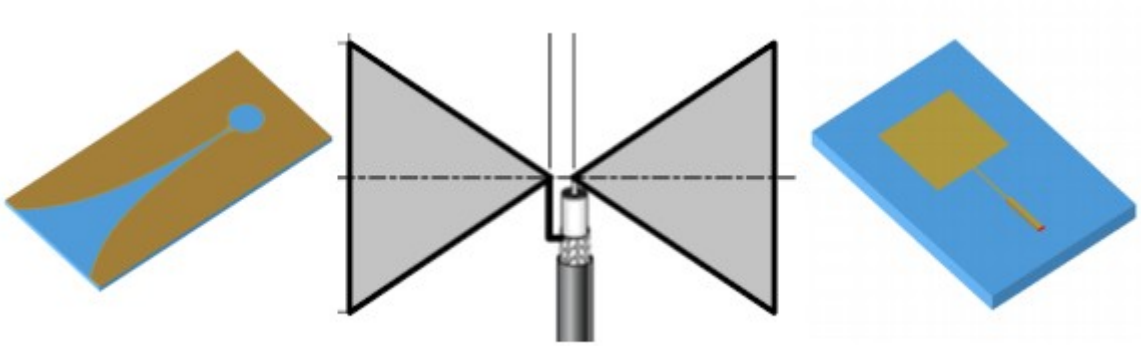

Рисунок 7 – Микрополосковые антенны.

У патч-антенны есть ряд неоспоримых преимуществ. Во-первых, она проста в разработке и моделировании, что уменьшает затрачиваемое время на получение необходимой геометрии. Во-вторых, более простая конструкция позволяет при необходимости оперативно подстраивать параметры излучателя. Ну и в-третьих, меньшие габариты позволяют использовать этот вид излучателя в антенных решетках в большом количестве, что позволяет получать на выходе антенной решетки большую мощность и более гибкую вариативность при выборе положения луча [6]. Самыми распространенными являются круглый, обычный прямоугольный, и множество разновидностей прямоугольного или круглого излучателей, полученных с помощью изменения или дополнения геометрии. При выборе типа излучателя была рассмотрена и зарубежная литература, а именно [23-25].

Чаще всего внесение коррективов в стандартную геометрию патча обусловлено недостаточной полосой частот [10]. Более широкая полоса выгодна при использовании диэлектрика с относительно большой неравномерностью диэлектрической проницаемости. Также при выборе вида излучателя необходимо учитывать тип поляризации. Для обеспечения линейной поляризации нужно использовать излучатели с симметричной геометрией.

Исходя из вышесказанного, было решено использовать прямоугольный излучатель. Касательно поляризации необходимо отметить, что горизонтальная поляризация предпочтительнее, так как аэродинамические цели и летательные аппараты имеют преимущественно горизонтальную ориентацию элементов конструкции [11]. На рисунке (8) изображена прямоугольная патч-антенна состоящий из питающего стержня -1, земли – 2, диэлектрика – 3 и самого патча – 4 .

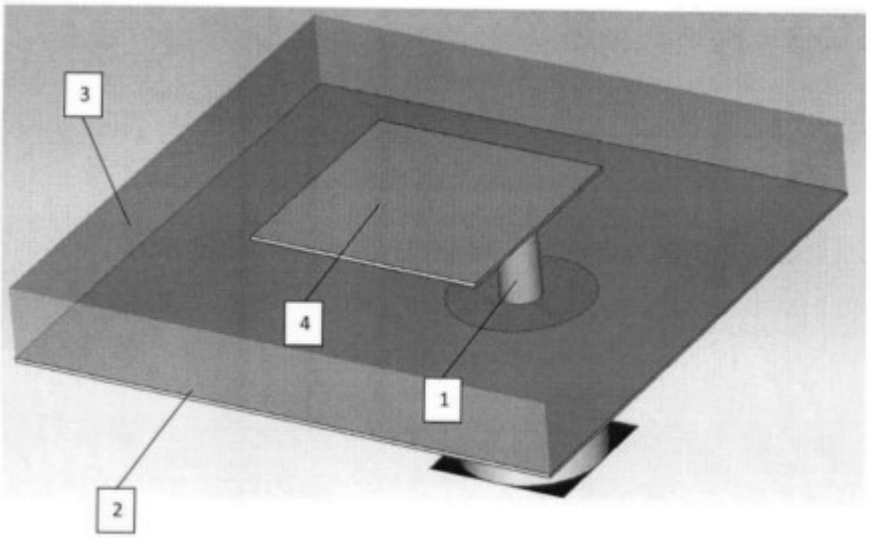

Рисунок 8 – обычная прямоугольная патч-антенна.

«При приближенном подходе, основанном на теории длинных линий, в отрезке учитывается возбуждение лишь квази Т-волны» [1]. «Распределение поля вдоль торцевых и боковых щелей в резонансном режиме соответствует низшей резонансной частоте, когда длина отрезка полосковой линии близка к половине квази Т-волны. Энергия запасенная в поле квази Т-волны при резонансе, достаточно велика.» [1]. Распределение электрического поля вдоль торцевых и боковых щелей представлено на рисунке (9). Приняв во внимание условие, что длина патча должна быть равна нечетному числу полуволн, магнитные токи в торцевых щеляхявляются синфазными. В направлении нормали к поверхности патча будетнаблюдаться максимум излучения торцевых щелей. На рисунке (10) представлено направление эквивалентного магнитного тока. Если же предположить, что длина патча равна четному числу полуволн квази волны, то тогда излучения в плоскости ортогональной поверхности патча не будет. Силовые линии электрического поля изображены на рисунке (11).

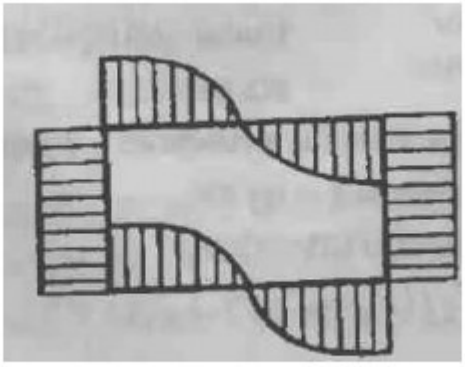

Рисунок 9 – Распределение электрического поля

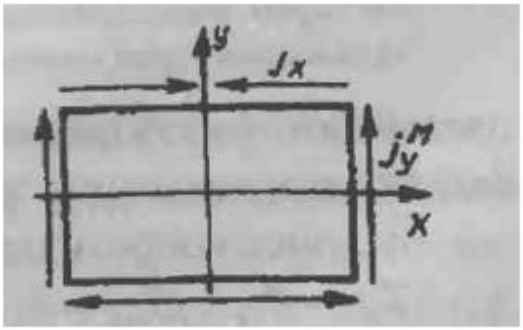

Рисунок 10 – Распределение эквивалентного магнитного тока

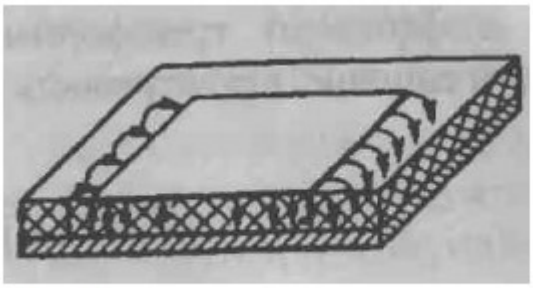

Рисунок 11 – Силовые линии электрического поля

3.3.1.3 Выбор диэлектрика и толщины подложки

При выборе диэлектрика я руководствовался, прежде всего, возможностями отечественного производства СВЧ-диэлектриков. Наиболее распространенными являются диэлектрики ФЛАН, ФАФ-4Д и ФФ.
После изучения линейки диэлектрических материалов марки ФЛАН, был сделан выбор в пользу материала ФЛАН-3,8 параметры которого приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные параметры ФЛАН 3,8

Марка	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс диэлектрических потерь	Диапазон рабочих температур	Сопротивление изоляции	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом*м
ФЛАН-3,8	3,8±0,15	0,0012	от -60 до +150	-	$5*10^{16}$

В таблице 4 представлены возможные варианты толщины медной фольги и толщины подложки компании «РОСИЗОЛИТ».

Таблица 4 – Толщины подложки и фольги

Толщина медной фольги, мкм	18
	35
	50
Толщина диэлектрика, мм	1±0,1
	1,5±0,1
	2±0,1
	2,5±0,15
	3±0,15
	4±0,27
	5±0,3
	10±0,3

3.3.1.4 Расчет размеров излучателя

Размеры излучателя определяются исходя из заданной длины волны и межэлементного расстояния между излучателями. Также необходимо помнить, что геометрия излучателя влияет на поляризацию электромагнитной волны. Ширина патча W находится с помощью формулы (18):

$$W = 0.48 * \lambda eff \quad (18)$$

λeff – длина волны в диэлектрике (19);

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (19)$$

λ0 - длина волны в свободном пространстве [12].

Исходя из максимально возможного расстояния между излучателями, рассчитаем линейные размеры геометрии излучателя: $a = dxmaxtri$, b $= dymaxtri$.Толщина подложки определяется исходя из соотношений (20 – 22).

$$\frac{w}{h} = \frac{8*e^A}{e^{2A}-2}, \text{ при A} \geq 1{,}52 \quad (20)$$

$$A = \frac{Z_0}{60}\left(\frac{\varepsilon_r+1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+1}\left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r}\right) \quad (21)$$

$$h \geq 0.06 * \lambda_{eff} \quad (22)$$

Подставив $Z0$ = 50 Ом и εr = 3,8, получим $h \geq 0.92$ мм.

Современные технологии позволяют производить большое количество расчетов за малое время. Это позволило определить точку запитки патча с помощью более грубого параметрического анализа и наиболее точной оптимизации.В результате деления всего антенного полотна на модули возникает сложность объединения земли всех излучателей. Эта задача решается следующим образом. Так как и приемо-передающие модули (ППМ)

и модули антенного полотна (МАП) необходимо жестко на чем-то закрепить, то можно создать каркас (раму), перегородки которого будут обеспечивать слияние земель всех излучателей посредством крепления их на винты (12).

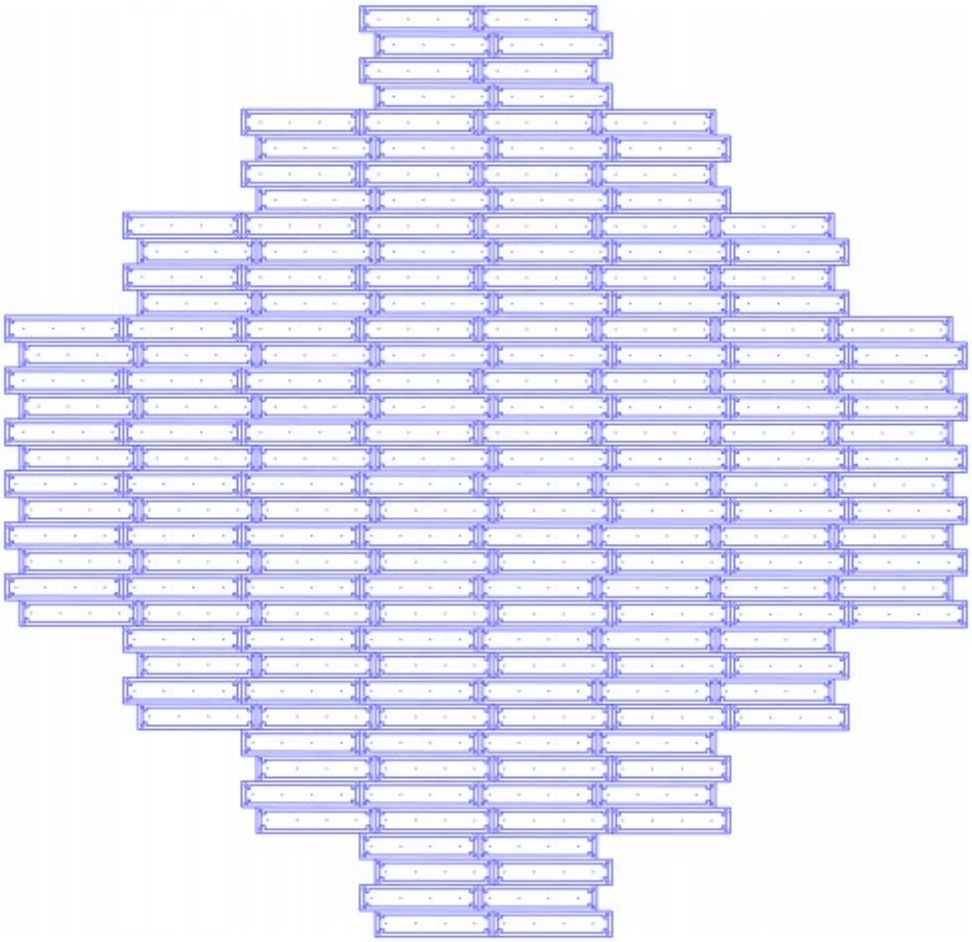

Рисунок 12 – Каркас (рама) антенной решетки

3.3.1.5 Моделирование прямоугольного патча

Моделирование и оптимизация параметров патч-антенны будет производиться в ANSYS HFSS [13]. Выберем начальные размеры патча исходя из формул, приведенных в п.п.3.3.1.4. В итоге получим: толщина диэлектрической подложки $hdiel$ = 2…3 мм; ширина стороны патчаw =6.5 мм; размеры подложки, а именно, длина и ширина – соответственно 17,6 мм и 16 мм. Модель прямоугольного патча представлена на рисунке (13).

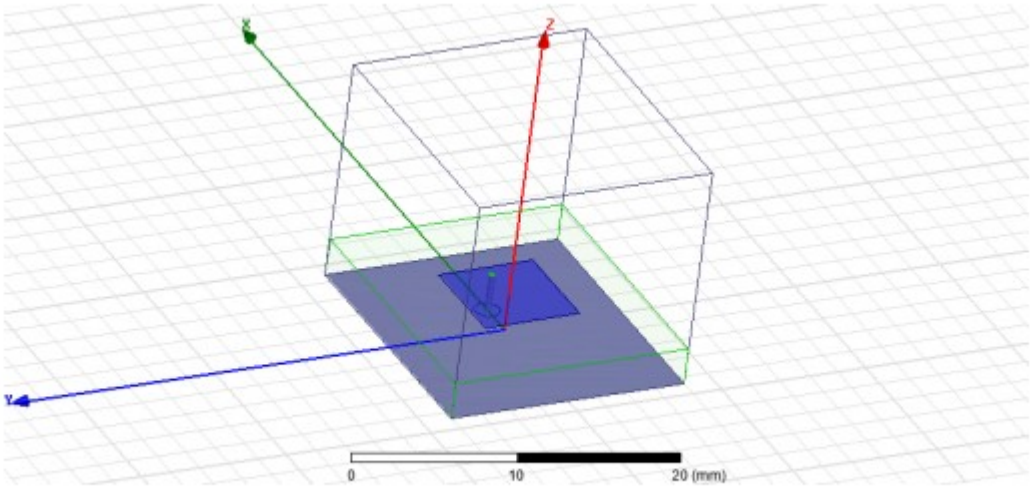

Рисунок 13 – модель прямоугольного патча

После оптимизации размеров были получены характеристики,изображенные на рисунках (14-16).

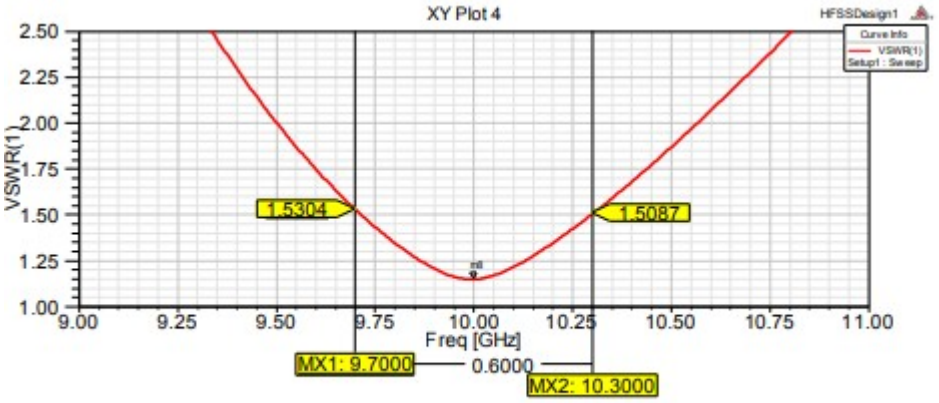

Рисунок 14 – КСВ прямоугольного патча

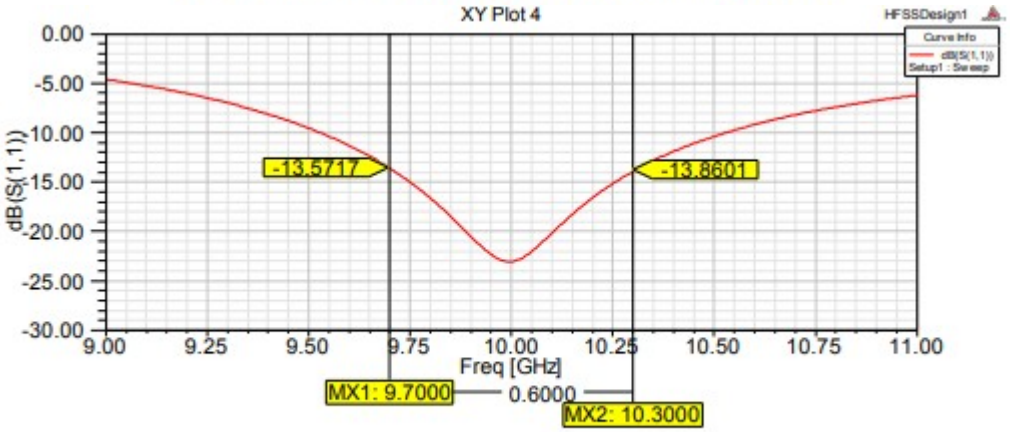

Рисунок 15 – Коэффициент отражения прямоугольного патча

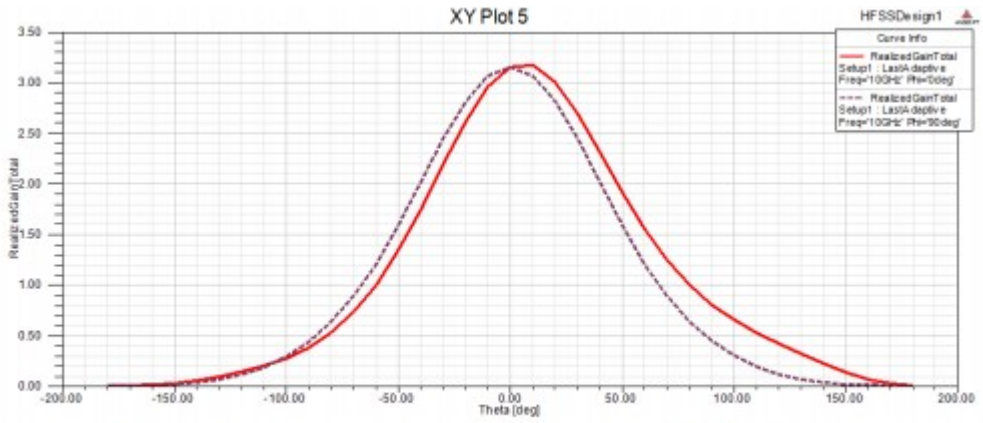

Рисунок 16 – Диаграмма направленности в УМ и АЗ плоскостях

Ширина полосы данного излучателя по уровню -10 дБ (рисунок 15) составляет всего 10% (1 ГГц). Этого результата может быть недостаточно при нестабильности диэлектрической проницаемости ±0,15. Модель, изображенная на рисунке (13) была изменена с целью расширить полосу частот. В результате были сделаны спилы углов и диагональные прорези [7]. Полученная модель изображена на рисунке 17.

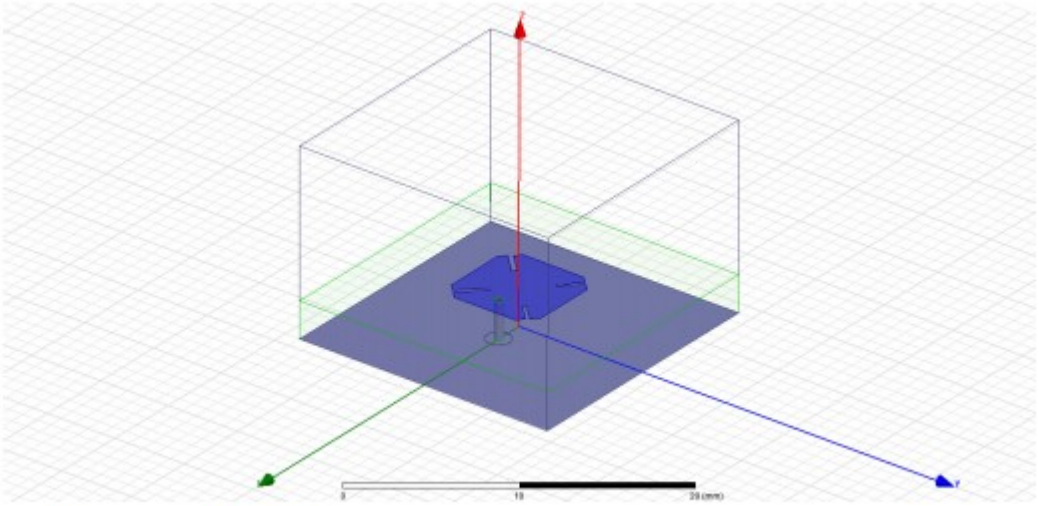

Рисунок 17 – Геометрия излучателя после модернизации

На рисунке (18) приведен эскиз патча. Его размеры приведены в таблице (5).

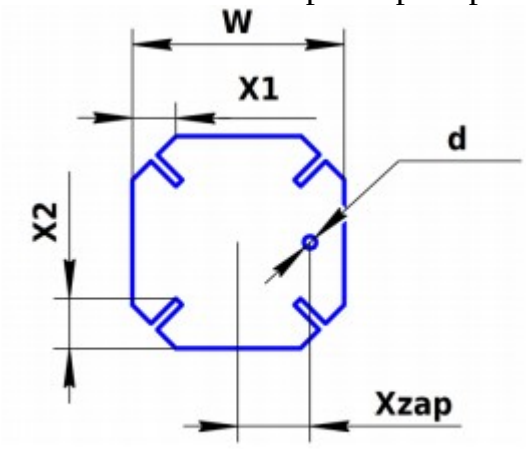

Рисунок 18 – Геометрия патча

Таблица 5 – Основные размеры патча

Параметр	Значение параметра
W, мм	6,5
d, мм	0,4
X1, мм	1,05
X2, мм	1,65
Xzap, мм	1,9

На рисунке 19 представлено распределение напряженности электрического поля на поверхности патча.

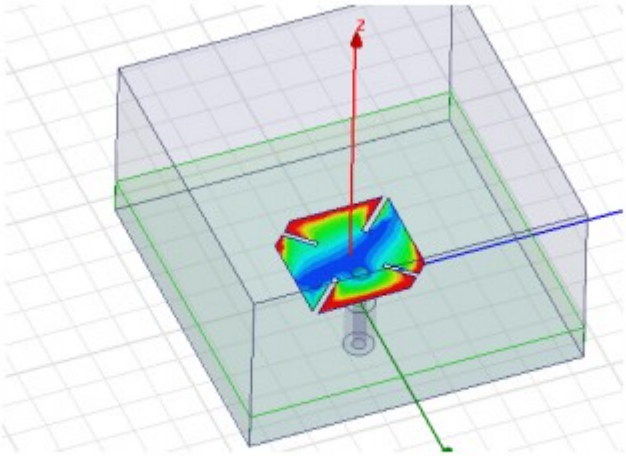

Рисунок 19 – распределение напряженности электрического поля на поверхности патча

Графики основных параметров излучателя представлены на рисунках (20 – 21). Так как у ФЛАН-3.8 сильная нестабильность диэлектрической проницаемости по сравнению с зарубежными аналогами, выбор излучателя с широкой полосой частот оказался оправданным. На рисунке 20 представлен график зависимости КСВ от возможной нестабильности диэлектрической проницаемости.

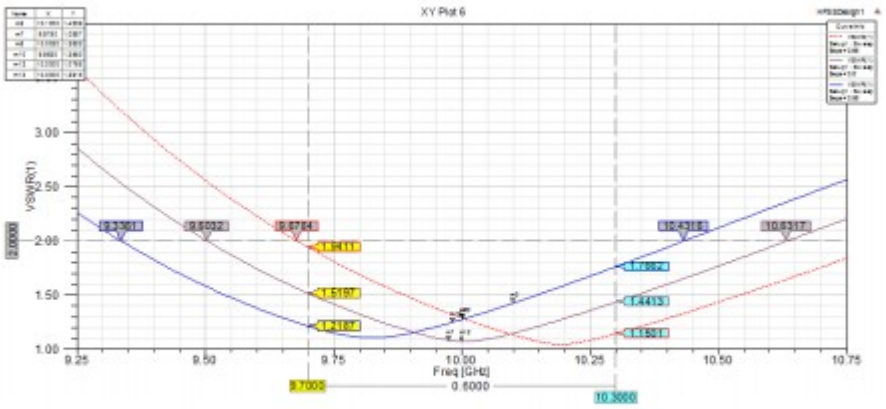

Рисунок 20 – КСВ в зависимости от диэлектрической проницаемости

(Красн - 3,65, Син – 3,95, Кор – 3,8)

Выбор толщины подложки осуществлялся в диапазоне от 2 до 3 мм. На рисунке (21) представлены зависимости КСВ излучателя от толщины подложки.

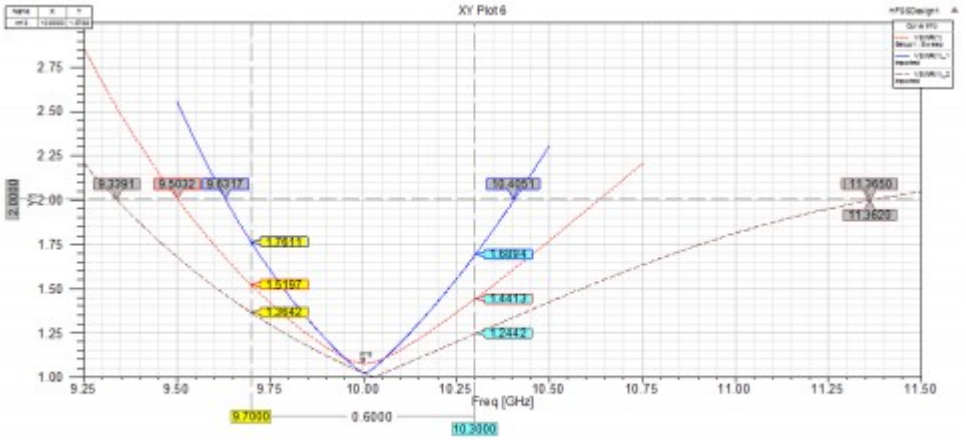

Рисунок 21 – значения КСВ при разной толщине подложки

Проведя оптимизацию геометрии с целью получить наилучшее согласование в заданной полосе частот, а также максимально достижимый коэффициент усиления, толщина подложки была выбрана равной 2,5 мм.

3.3.1.6 Выбор разъема для излучателя

После проведения анализа отечественного рынка СВЧ-разъемов выбор был сделан в пользу разъема СРГ-50-972В (22) ПАО "Иркутский релейный завод".

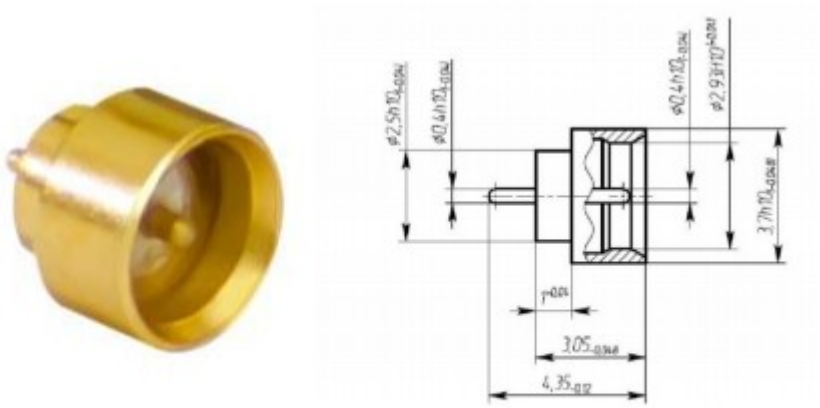

Рисунок 22 - СРГ-50-972В

Основные параметры СРГ-50-972В приведены в таблице 6

Таблица 6 – Технические характеристики СРГ-50-972В

Параметр	Значение параметра
Диапазон частот, ГГц	0-18
Номинальное волновое вопротивление, Ом	50
КСВн, не более	1,35
Прямые СВЧ-потери, дБ, не более	0,35

Выбор данного разъема обусловлен лишь тем фактом, что в открытых источниках невозможно найти какого-либо аналога данного разъема отечественного производства.
Так как монтаж разъемов к микро полосковым излучателям достаточно сложен, необходимо разработать технологию данного процесса.
Существует ряд сложностей. Во-первых, при креплении разъема к экрану необходимо обеспечить прочное сочленение, что осложняется слабой адгезией выбранного диэлектрика с жилой контакта разъема. Во-вторых, необходимо обеспечить замыкание жилы разъема на патч. В-третьих, недопустимо замыкание жилы разъема на экран, что может быть вызвано некачественной пайкой данного разъема. В результате была выбрана технология, тщательно описанная в следующем подпункте.

3.3.1.7 Выбор технологии монтажа разъема

Исходный материал (заготовка) представлен на рисунке 23.



Рисунок 23 – печатная плата после сверления

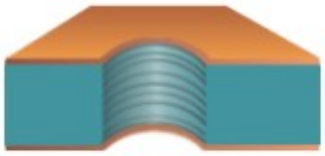

Рисунок 24 – печатная плата после сверления

После этого необходимо очистить отверстие от наноса смолы на медные торцы слоев. Это реализуется путем травления в серной кислоте, в растворе перманганата, с помощью плазмохимической очистки или гидрообразивной обработки.

Результат представлен на рисунке 25.

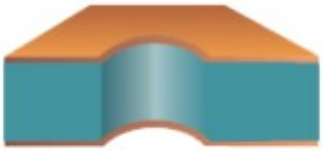

Рисунок 25 - печатная плата после очистки от смолы

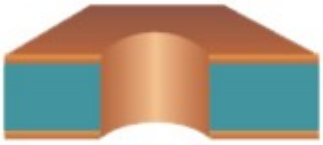

Рисунок 26 – Металлизация отверстия

После этого вытравливается весь нижний слой металлизации. Далее вытравливается необходимая геометрия излучателя. На нижнюю часть диэлектрической платы наносится клеящий состав. После этого печатная плата присоединяется к листу металла толщиной 2 мм с заранее просверленными отверстиями под разъем. Далее припаиваем разъем. Со стороны излучающей поверхности вводим достаточное количество припоя в отверстие. Таким образом, получено хорошее сочленение жилы разъема и патча, а также повышена адгезия между разъемом и платой.

3.3.1.8 Построение диаграммы направленности одиночного излучателя

Диаграмму направленности всей антенной решетки с помощью ANSYS HFSS вычислять довольно трудоемкая задача, поэтому воспользуемся возможностью экспортировать ДН одиночного излучателя в MATLAB [4]. Постоим в ANSYS HFSS графики ДН RGain(θ, φ =0) и RGain(θ,φ=90), что будет являться диаграммой направленности соответственно по азимуту (27) и углу места (28). На рисунке (29) представлен график трехмерной диаграммы направленности одиночного излучателя, а на рисунке (30) представлен график полученной нормированной диаграммы направленности. Импортируем данные графиков в формат xls. Полученные значения вставим в алгоритм, написанный в среде MATLAB. Построим графики одиночного излучателя.

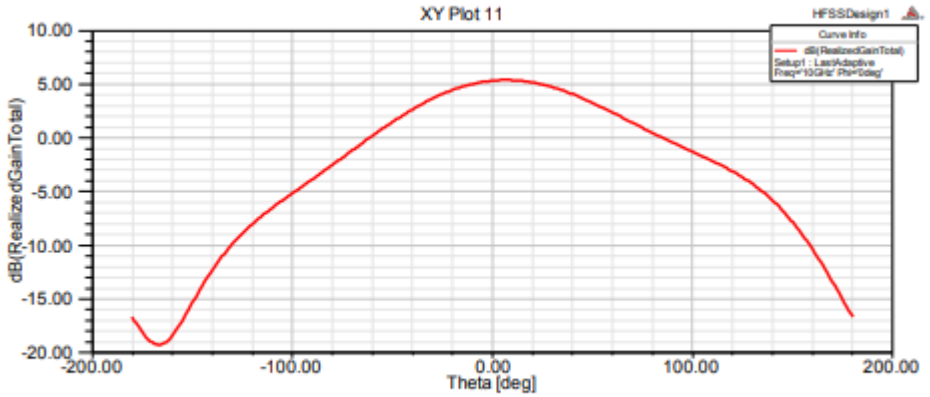

Рисунок 27 - RGain(θ, φ =0)

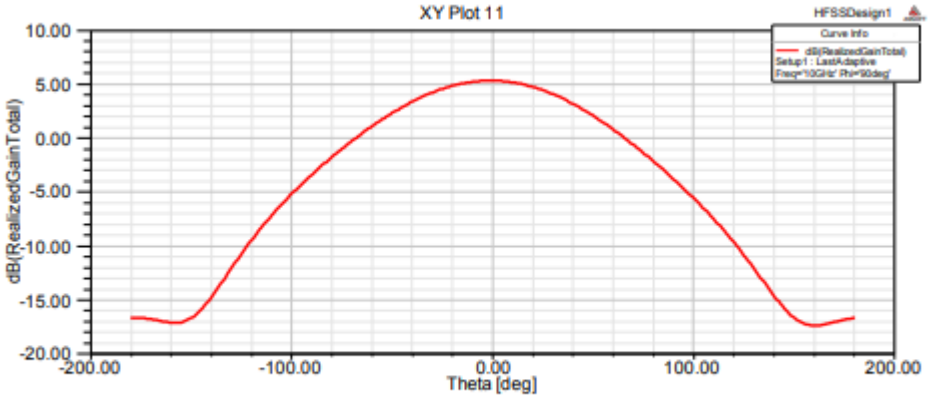

Рисунок 28 - RGain(θ,φ=90)



Рисунок 29 – Трехмерная диаграмма направленности одиночного излучателя

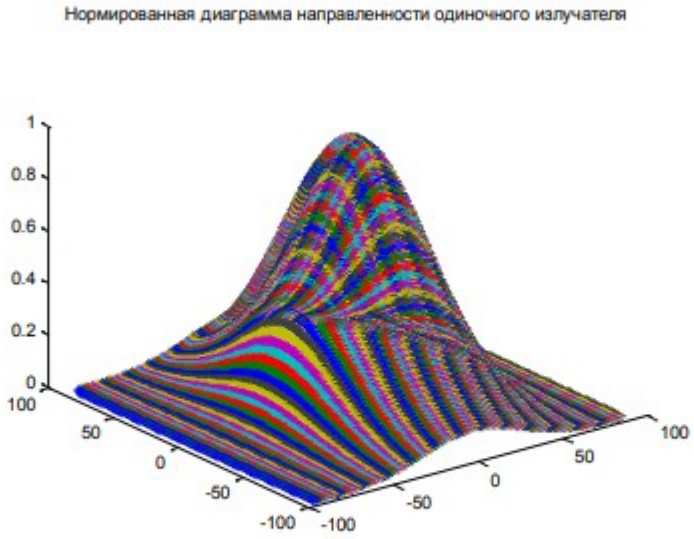

Рисунок 30 – Нормированная диаграмма направленности одиночного излучателя импортированная в MATLAB

3.3.2 Построение диаграммы направленности и выбор амплитудного распределения антенной решетки

Так как количество излучателей достаточно велико, то согласно [1] данную антенную решетку можно представить в виде бесконечно длинной решетки. Тогда диаграмму направленности антенной решетки можно представить в виде (20).

$$f(\theta, \phi) = f0\ (\theta,\phi) * fxy(\theta,\phi) \quad (20)$$

$f0(\theta, \phi)$ – диаграмма направленности одиночного излучателя,

$fxy(\theta,\phi)$ – множитель антенной решетки.

Диаграмма направленности одиночного излучателя получена при его моделировании и последующем расчете в ANSYS HFSS [13]. Таким образом, расчет диаграммы направленности антенной решетки сводится к нахождению множителя антенной решетки.

Множитель антенной решетки с произвольным расположением излучателей можно рассчитать с помощью формулы (21)

$$fxy = \sum_{m=1}^{Nx}\sum_{n=1}^{Ny} A_{mn} * \exp[ik * \sin(\theta(mdx * \cos(\phi) + ndy * \sin(\phi)))] \qquad (21)$$

В нашем случае антенная решетка представляет собой квадрат 32х36 с нулевыми амплитудами отсутствующих излучателей. Если каждый ряд излучателей характеризуется одним и тем же амплитудным распределением, то множитель можно представить в виде произведения двух множителей fNx (22) и fNy (23).

$$f_{Nx} = \sum_{m=1}^{Nx} |A_m| * \exp[im(k * dx * sin\theta * cos\varphi - \psi_{ix})] \qquad (22)$$

$$f_{Ny} = \sum_{n=1}^{Ny} |A_n| * \exp[in(k * dy * sin\theta * sin\varphi - \psi_{iy})] \qquad (23)$$

ψix − прогрессивный линейный набег фазы вдоль оси X;
ψiy − прогрессивный линейный набег фазы вдоль оси Y;
θ– азимут; φ − угол места.
В итоге были получены графики зависимости множителя антенной решетки по мощности от угла поворота в азимутальной и угломестной плоскостях рисунок (31). Нормированный множитель антенной решетки в трехмерном виде представлен на рисунке (32).

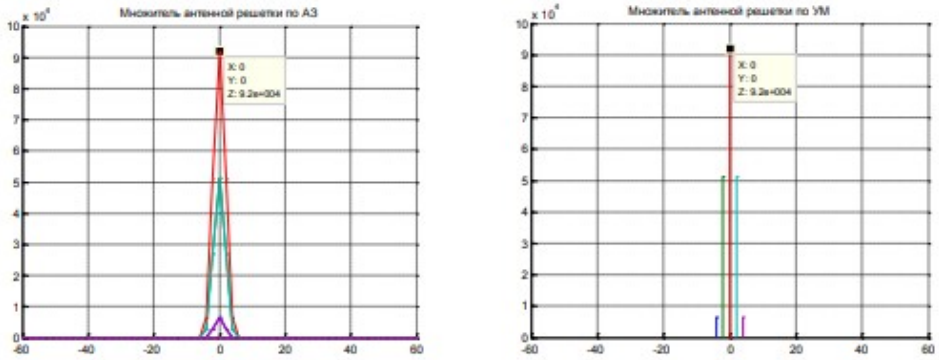

Рисунок 31 – Множитель антенной решетки в азимутальной и угломестной плоскостях

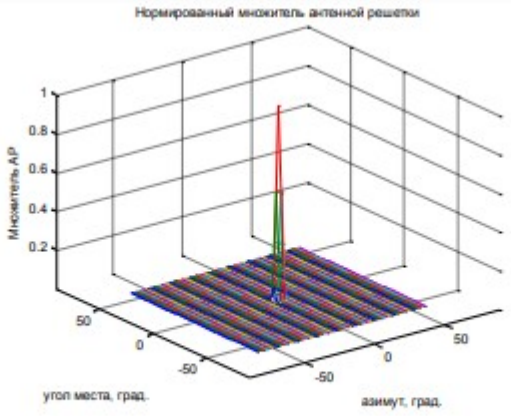

Рисунок 32 – Нормированный множитель антенной решетки

При расчете амплитудного распределения необходимо помнить, что антенная решетка имеет круглую форму. Это обстоятельство легко учесть перейдя к цилиндрической системе координат [14]. Используя полученные в ANSYS HFSS ДН одиночного излучателя по азимуту и углу места, а также формулы для расчета множителя антенной решетки, рассчитаем ДН антенной решетки в азимутальной и угломестной плоскостях. Полученные графики при равномерном амплитудном распределении приведены на рисунке (33).

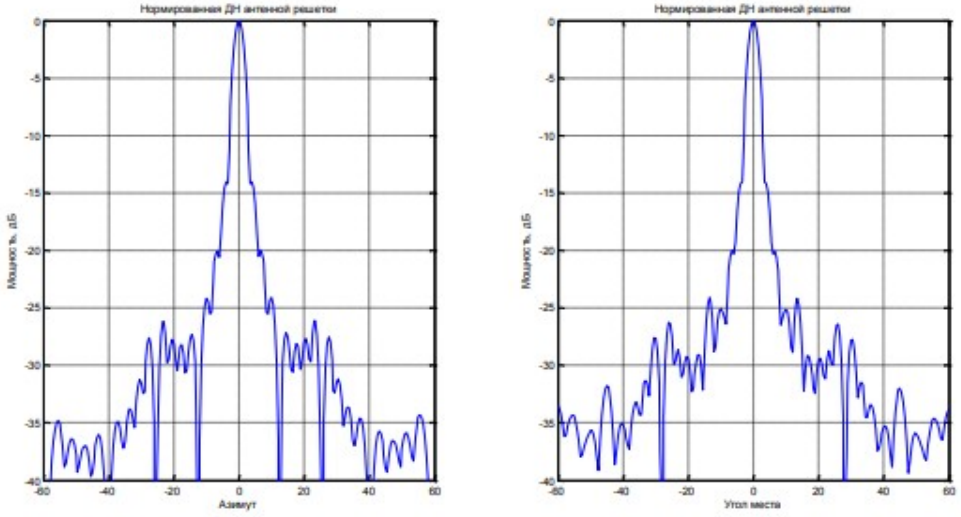

Рисунок 33 – графики нормированной диграммы направленности по азимуту и углу места

Для построения диаграмм был использован алгоритм, описанный в подразделе 3.5. По графику (33) видно, что первый боковой лепесток по азимуту расположен на 230 и его уровень составляет -26 дБ. Боковой лепесток по углу места расположен на 13,50 и составляет -24 дБ. Полученные значения не удовлетворяют требованию предъявляемому к уровню боковых лепестков, а именно, уровень первого бокового лепестка (УБЛ1) не должен превышать -35 дБ.

С целью подавления боковых лепестков необходимо изменить амплитудное распределение. Рассмотрим несколько основных амплитудных распределений. В таблице (7) приведены функции распределения и основные

характеристики ДН АР [2]. Уменьшение уровня первого бокового лепестка влечет за собой снижение эффективной изотропно излучаемой мощности (PG), где P – мощность, подводимая к антенной решетке, а G – полный коэффициент усиления антенной решетки.

Таблица 7 – Виды амплитудных распределений и их характеристики

Вид антенной решетки	Амплитудное распределение	УБЛ1, дБ	Снижение эффективной изотропно излучаемой мощности, дБ	Δ	n
круглая/прямоугольная	1	-13,3	0	-	
Прямоугольная	$cos^n(\frac{\pi * \varepsilon}{2})$	-22,9	-1,8	-	1
		-31,4	-3,5		2
		-39,3	-4,8		3
		-46,7	-5,8		4
Прямоугольная	$\Delta + (1-\Delta) * \cos(\frac{\pi * \varepsilon}{2})$	-17,6	-0,3	0,5	-
		-20	-0,6	0,316	
		-22,4	-1,2	0,1	
		-22,9	-1,8	0	
Прямоугольная	$\Delta + (1-\Delta) * cos^2(\frac{\pi * \varepsilon}{2})$	-44	-2,7	0,08	-
Круглая	$1-(1-\Delta) * \varepsilon^2$	-20,6	0,964	0,5	-
		-22,4	0,917	0,316	
		-24,2	0,818	0,1	
		-24,6	0,75	0	
Круглая	$(1-\varepsilon^2)^n$	-30,6	0,555	-	2
		-36	0,438		3
		-40,9	0,36		4
Круглая	$\frac{1+6*(1-\varepsilon^2)^2}{7}$	-34	0,74	-	-
Круглая	$\frac{3+18*(1-\varepsilon^2)^2+8*(1-\varepsilon^2)^2}{29}$	-41,4	0,68	-	-

В таблице (8) приведены значения соответствующие проектируемой антенной решетке.

Таблица 8 – Расчетные значения при разных амплитудных распределениях

Амплитудное распределение	УБЛ1(азимут), дБ	УБЛ1(угол места), дБ	Снижение эффективной изотропно излучаемой мощности, дБ	Δ	n
1	-26	-24,2	0	-	
$1-(1-\Delta)*\varepsilon^2$	-27,5	-25,4	-1,02	0,5	-
	-28,3	-26,15	-1,48	0,316	
	-29,8	-27,2	-2,09	0,1	
	-30,7	-28,4	-2,4	0	
$(1-\varepsilon^2)^n$	-35	-32	-4,01	-	2
	-38	-35	-5,2		3
	-43	-39	-6,14		4
$\frac{1+6*(1-\varepsilon^2)^2}{7}$	-27,8	-27,7	-3,15	-	-
$\frac{3+18*(1-\varepsilon^2)^2+8*(1-\varepsilon^2)^2}{29}$	-28,7	-28,69	-3,36	-	-

Исходя из данных, полученных при моделировании рассмотрим амплитудное распределение
$(1-\varepsilon 2)n$, где n=2,3,4. Полученные графики приведены на рисунках (34 – 36).

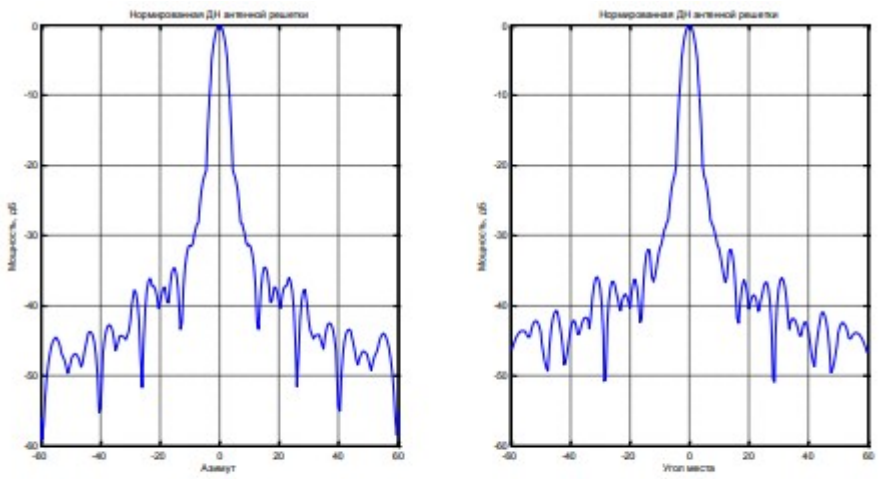

Рисунок 34 – График ДН при n=2

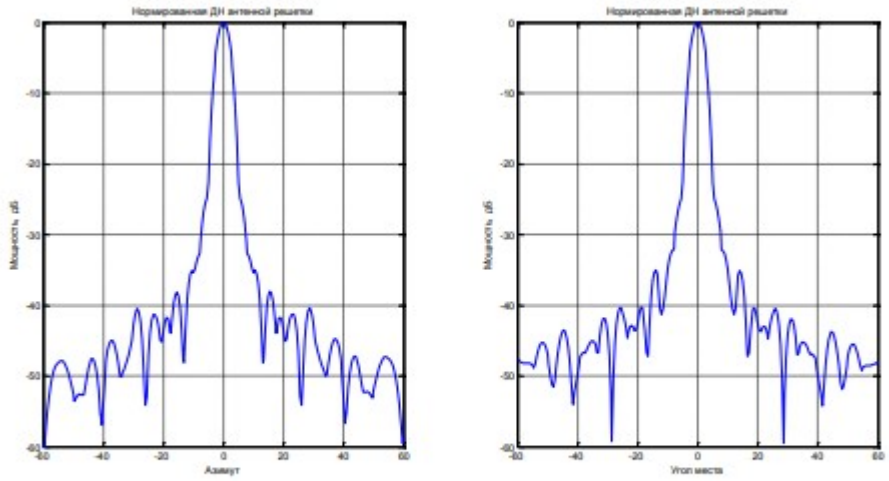

Рисунок 35 – График ДН при n=3

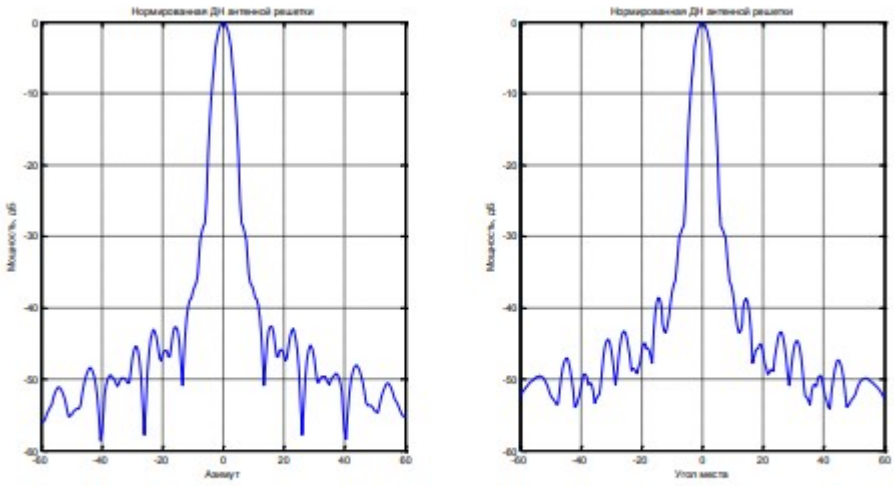

Рисунок 36 – График ДН при n=4

Использование амплитудного распределения при n=4 (36) приведет к падению эффективной изотропно излучаемой мощности примерно на 6 дБ, но при этом первый боковой лепесток по азимуту не превосходит -40 дБ, а по углу места -39 дБ. Следовательно, улучшается помехозащищенность и скрытность. К тому же улучшается электромагнитная совместимость с другими радиоэлектронными устройствами. В виду конструктивных особенностей проектирования антенной решетки невозможно добиться того, чтобы сектором сканирования АФАР являлся прямоугольник со сторонами 600*2 и 450*2. Эмпирически было доказано, что полученная антенная решетка способна сканировать пространство в диапазоне эллипса, радиусы которого составляют 450 и 600.
На рисунке (37) представлены отклонения луча в обеих плоскостях.

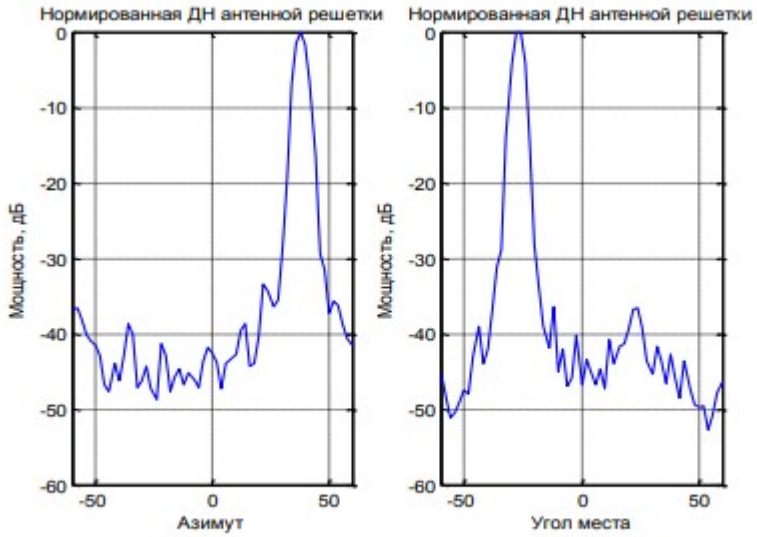

Рисунок 37 – Диаграммы направленности АР при θ =38^0 и φ =-27^0

3.3.3 Разработка модуля антенного полотна

При проектировании антенной решетки необходимо учитывать размеры отпускаемого с производства листа диэлектрика, а также его массу. С целью обеспечения лучшей ремонтопригодности, а также более легкой сборки конструкции антенной решетки, было решено комплектовать излучатели по количеству каналов приемо-передающих модулей в так называемые модули антенного полотна (МАП). Следовательно, МАП должен состоять из 4 излучателей. Рассчитаем количество модулей антенного полотна NМАП по формуле (24).

$$N_{\text{МАП}} = \frac{N}{4} \qquad (24)$$

N – количество каналов всей решетки.

В результате получим: ***N*МАП = 192**

Рассчитаем линейные размеры МАП по формулам (25-27). Учтем, что $dxmaxrec$ = 15 мм; $dxmaxrec$ = 16 мм; $dxmaxtri$ = 17,3 мм; $dymaxtri$ = 16 мм.

***L*МАП = *dxmaxtri*∗*N*излМАП** **(25)**

W*МАП = *dymaxtri **(26)**

H*МАП = *dymaxtri **(27)**

***L*МАП – длина МАП**;

***W*МАП – ширина МАП**;

NизлМАП – количество излучателей в одном МАП; Модуль антенного полотна состоит непосредственно из платы диэлектрика с вытравленной с одной стороны топологией излучателя, а также металлического основания, слоя «земли». В программе «КОМПАС-3D» был построен эскиз модуля

антенного полотна, изображенный на рисунке 38, а также эскиз слоя «земли», изображенный на рисунке 39.

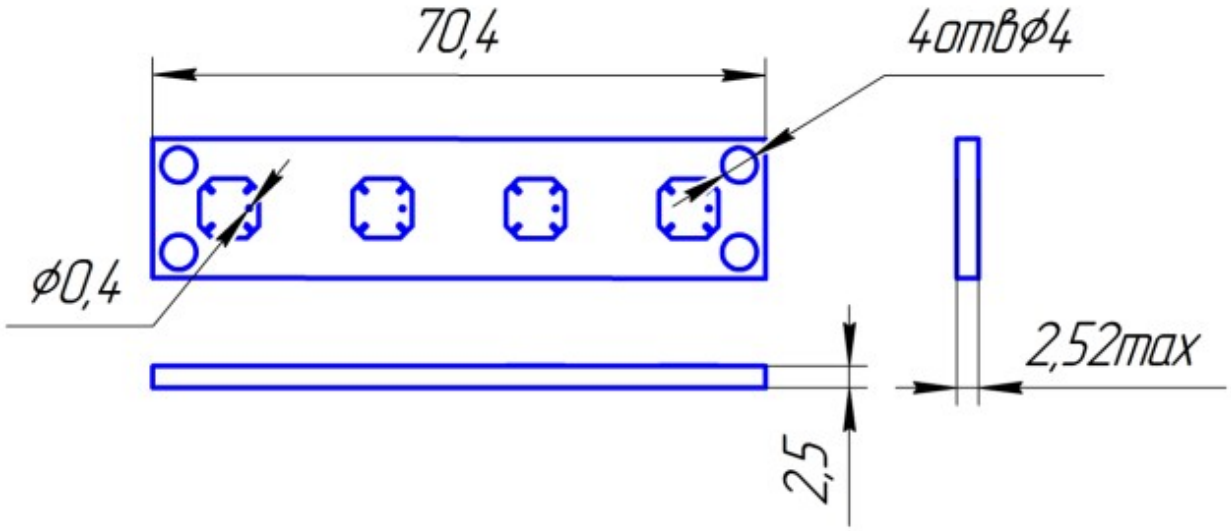

Рисунок 38 – Модуль антенного полотна

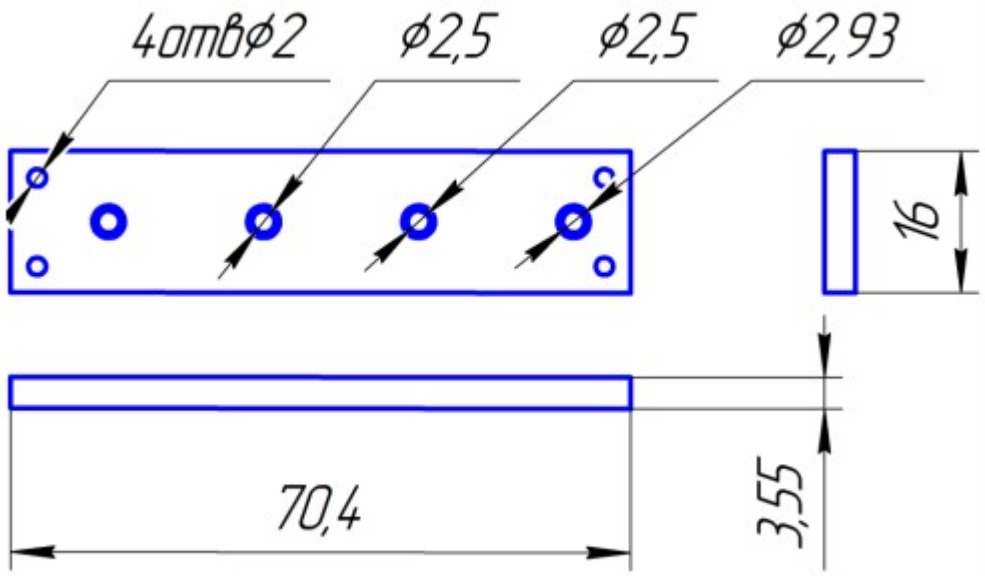

Рисунок 39 – слой «земли» модуля антенного полотна

3.4 Разработка СВЧ тракта приемо-передающего модуля (ППМ)

3.4.1 Принцип работы приемо-передающего модуля и основные технические характеристики

Приемо-передающий модуль предназначен для приема и передачи СВЧ сигналов. Он должен позволять управлять фазовым и амплитудным распределением излучателей антенны, так как АФАР требует электронного управления лучом. Это необходимо для того, чтобы сигналы от разных излучателей синфазно сложились в нужной точке пространства. Управление

амплитудным распределением, прежде всего, необходимо для подавления боковых лепестков диаграммы направленности антенной решетки, а также для правильного приема отраженного сигнала. В таблице 9 приведены основные технические характеристики разрабатываемого СВЧ тракта ППМ.

Таблица 9 – Основные технические характеристики

Параметр	Значение параметра
Выходная мощность, Вт	5
Коэффициент усиления приемного тракта, дБ	35
Дискрет фазовращателя	5,625
Дискрет аттенюатора	0,751
Коэффициент шума, не более, дБ	4
Неравномерность коэффициента усиления в полосе частот 9,7-10,3 ГГц, дБ	2
КСВн по входу, не более	1,5
Точка компрессии на прием, дБм	-16
Предельно допустимая входная мощность, мВт	1

3.4.2 Структурная схема и принцип действия

ППМ - приемо-передающий модуль – это устройство, предназначенное для приема и передачи СВЧ – сигнала с требуемым АФР (амплитудно-фазовым распределением). Необходимость ППМ для АФАР заключается в том, что для использования электронного изменения положения луча необходимо задавать определенную начальную фазу в каждом излучателе. Также в случаях радиоэлектронной борьбы необходимо изменять форму луча, создавать провалы в ДН антенной системы. Структурная схема ППМ содержит непосредственно переключатели работы ППМ на передачу или прием, перестраиваемый фазовращатель, перестраиваемый аттенюатор, МШУ, выходной усилитель, компенсирующий усилитель, ограничительное устройство, а также схему управления ППМ. На рисунке (40) представлена стандартная схема построения ППМ.

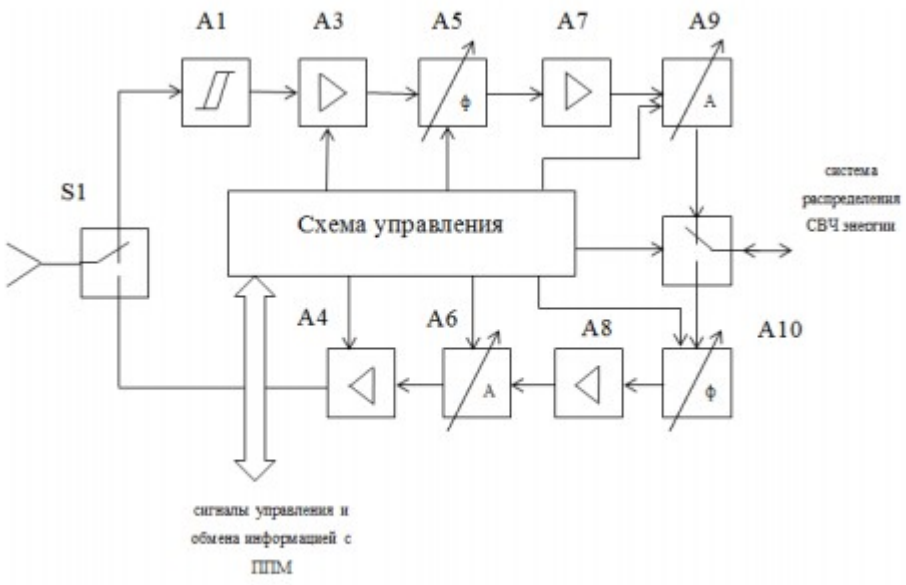

Рисунок 40 – Стандартная схема построения ППМ

S1, S2 – переключатели;
A1 – ограничительное устройство;
A2 – схема управления устройствами ППМ;
A3 – малошумящий усилитель (МШУ);
A4 – выходной усилитель;
A5 – фазовращатель;
A6 – аттенюатор;
A7 – компенсирующий усилитель;
A8 – компенсирующий усилитель;
A9 – аттенюатор;
A10 – фазовращатель

Рассмотрим принцип работы ППМ на передачу. Сигнал пришедший из СВЧ распределительной системы поступает на ключ S2, который предварительно выставлен в положение на передачу с помощью сигнала управления, поступившего со схемы управления. После этого сигнал попадает на фазовращатель A10, где он сдвигается на заранее рассчитанное значение по фазе, переданное со схемы управления. Потери в фазовращателе могут достигать 10 дБ, поэтому необходимо усилить сигнал. С этой целью в схеме присутствует компенсирующий усилитель, увеличивающий уровень сигнала, на уровень потерь в ФВ. Далее сигнал поступает на управляемый аттенюатор, в котором сигнал ослабляется на заранее рассчитанное и установленное значение, соответствующие нужному амплитудному распределению. После чего сигнал приходит на выходной усилитель, где происходит его окончательное усиление. Далее через ключ S1, заранее выставленный в положение на передачу, сигнал поступает на излучатель. Принцип работы ППМ на прием во многом похож на передачу. На ключ S1, заранее выставленный в положение на прием, поступает принятый

излучателем сигнал. Далее он идет на ограничитель, в котором проверяется, не превышает ли принятый сигнал предельного допустимого значения входной мощности малошумящего усилителя. Если превышает, то он ограничивается до требуемого уровня, и далее соответственно, поступает на МШУ. После усиления сигнал поступает на фазовращатель А5. При прохождении ФВ сигнал может быть ослаблен, вследствие чего, его необходимо восстановить до прежнего уровня мощности с помощью усилителя А7. Далее в управляемом аттенюаторе сигнал ослабляется для установки требуемого амплитудного распределения на заранее переданное значение со схемы управления. После чего сигнал поступает на ключ S2,выставленный в положение на прием, и далее попадает в СВЧ распределительную систему. Схема, изображенная на рисунке (40), имеет недостаток. Так как фазовращатели и аттенюаторы в разных каналах не предполагается использовать и на прием и на передачу одновременно, можно сделать вывод об избыточности схемы. На рисунке (41) приведена оптимизированная схема ППМ. Так как в авиационной технике малые габариты являются одним из главных параметров, будем использовать микро полосковые технологии.

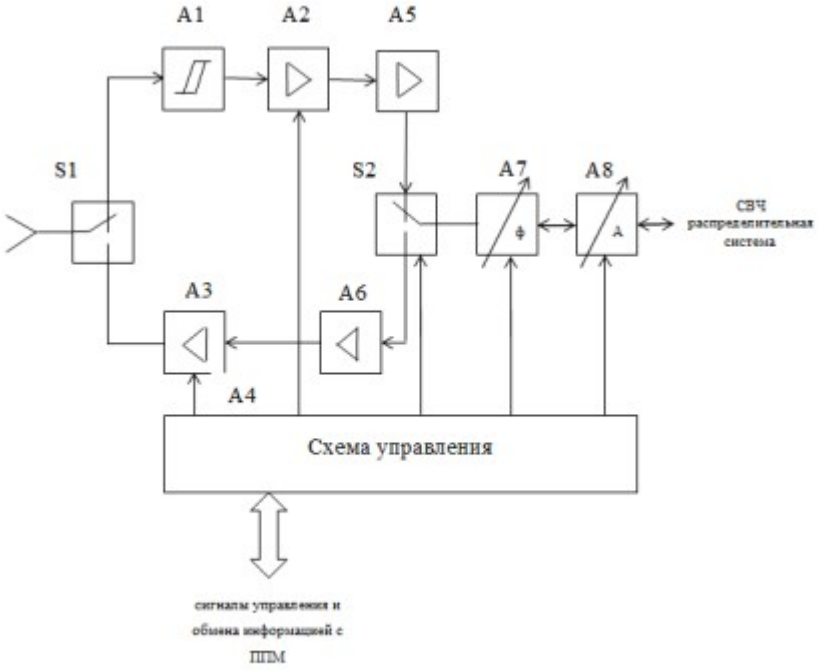

Рисунок 41 – Оптимизированная схема ППМ

Основные характеристики ППМ приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Основные характеристики ППМ

Параметр	Значение параметра
Диапазон частот, ГГц	9,7-10,3
Выходная мощность, Вт (дБ)	5 (7)
Входная мощность мВт (дБм)	1 (0)
Усиление в приемном тракте, не менее, дБ	30
Коэффициент шума, не более, дБ	4-5

3.4.3 Основы построения сложнофункциональной монолитной интегральной схемы

Чаще всего аттенюатор, фазовращатель и переключатель размещают вместе в виде так называемой сложно функциональной монолитной интегральной схемы (СФМИС). Структурная схема СФМИС представлена на рисунке 42

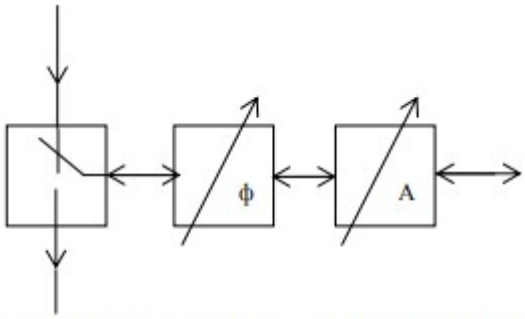

Рисунок 42 - Структурная схема СФМИС

3.4.4 Расчет габаритных размеров корпуса ППМ

Габаритные размеры корпуса ППМ имеют очень большое значение с точки зрения выбора исполнения элементной базы. Они определяются и исходя из размеров модуля антенного полотна. Для обеспечения возможности крепления МАП к каркасу антенной решетки размеры ППМ выбираются меньше. К тому же при проектировании и расчете корпуса ППМ необходимо брать в расчет расположение излучателей в антенной решетке относительно друг друга. Вдобавок, АФАР излучает достаточно большую мощность, в результате чего выделяется большое количество тепла. В таком случае чаще всего используются системы жидкостного охлаждения. В результате необходимо предусмотреть расстояние по вертикали между рядами ППМ. Исходя из всего выше сказанного мной были получены следующие эскизы корпуса ППМ.

На рисунке 43 изображены виды спереди и сзади корпуса ППМ с основными размерами.

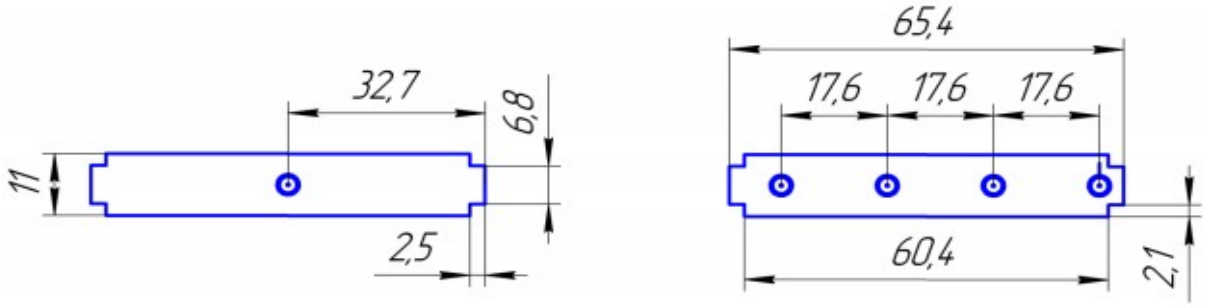

Рисунок 43 – вид спереди и вид сзади корпуса ППМ

На рисунке 44 представлены габаритные размеры корпуса ППМ (вид сверху).

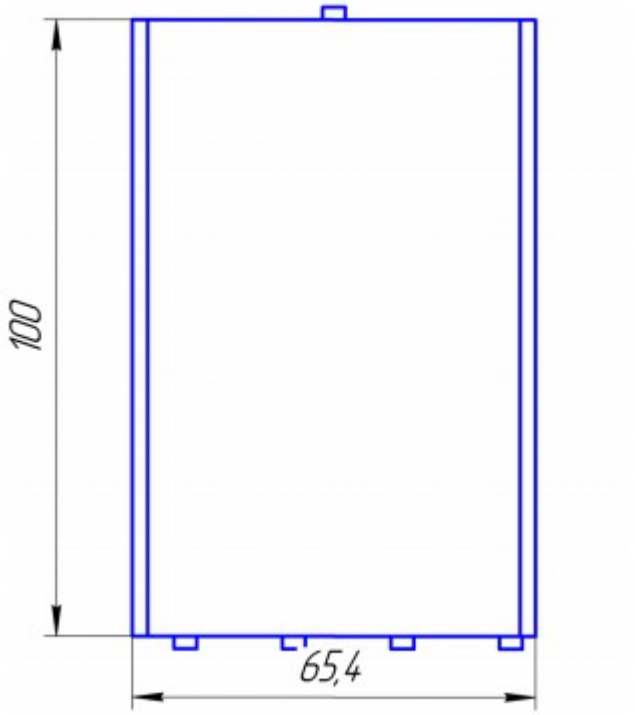

Рисунок 44 – корпус ППМ (вид сверху)

3.4.5 Выбор элементной базы.

Одной из особенностей при проектировании данной АФАР является использование отечественной элементной базы. Для проектирования ППМ по структурной схеме, изображенной на рисунке (41), необходимо выбрать следующие узлы:

- Предусилитель мощности;
- СФМИС;
- Переключатели (Коммутаторы);
- Ограничитель;
- Выходной усилитель;
- Малошумящий усилитель (МШУ);
- Циркулятор
- Делитель.

Проведя анализ современного отечественного рынка радиоэлектронных средств, я выбрал несколько вариантов компонентов, удовлетворяющих требованиям ТЗ.

3.4.5.1 Выбор циркулятора.

Основными параметрами циркулятора являются: - Количество плеч; - Диапазон рабочих частот; - Прямые потери; - Обратные потери; - КСВн по входу; - Массогабаритные показатели. Так как нам необходимо разделить только лишь приемную и передающую части, то количество плеч, которое нам потребуется равно 3. Диапазон частот 9,7 – 10,3 ГГц. 53 Ниже приведена таблица (11) моделей циркуляторов производства компании НП ОАО «ФАЗА», работающих в заданной полосе частот, и их основных параметров.

Таблица 11– Основные модели и параметры циркуляторов НП ОАО «ФАЗА»

Модель циркулятора	Диапазон частот, ГГц	Полоса частот, %	Прямые потери, дБ	Обратные потери, дБ	КСВ, не более	Массогабаритные показатели	Проходящая мощность, не более, Ватт
ФПЦН2-100-fц (101-fц)	8-14	5	0,4	22	1,3	2 г	25
		10	0,5	22			
ФПЦН2-84-10,0	9,5-10,5		0,3	20	1,3	4 г	5
ФПЦН2-84-10,1	9,7-10,3		0,3	22	1,3	4 г	5

Также были отобраны модели циркуляторов, работающих в полосе частот 9,7-10,3 ГГц, производства ОАО «Завод Магнетон» (12)

Таблица 12 – Циркуляторы ОАО «Завод Магнетон»

Модель циркулятора	Диапазон частот, ГГц	Прямые потери, дБ	Обратные потери, дБ	КСВ, не более	Проходящая мощность, не более, Ватт
ФПВН2-142	9,5-10,5	0,5	20	1,3	2
ФПЦН2–54	8,15-11	0,7	18		5
ФПЦН2–54А	8,9-12	0,7	18		5

3.4.5.2 Выбор сложнофункциональной МИС.

Анализ рынка показал, что на сегодняшний день производство данного вида продукции отечественными предприятиями освоено плохо. Однако была найдена одна сложно функциональная монолитная интегральная схема (СФ СВЧ МИС) X-диапазона частот производства АО «НИИПП». Так как core-чип содержит в себе и перестраиваемый фазовращатель, и перестраиваемый аттенюатор, и выходной переключатель параметры, предъявляемые к данному узлу, будут рассмотрены отдельно. Для управления амплитудным и фазовым распределением антенной решетки необходимо перестраивать фазу

и ослаблять сигнал в каждом канале с минимальным шагом для того, чтобы уменьшить ошибку округления значения. В современных фазовращателях используется 6 разрядов фазовращателя, что позволяет сдвигать сигнал на 5,6250. Аттенюаторы чаще всего имеют 6 разрядов с минимальным шагом 0,5 дБ или 5 разрядов с минимальным шагом 0,75 дБ. Основным параметром переключателя является развязка между переключаемыми каналами, а также прямые и обратные потери [15]. Основные параметры МИС core-чип приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Основные параметры core-чипа MSM204/205

Параметр	Значение параметра		
Диапазон рабочих частот, ГГц	8-12		
Начальные потери, дБ	7		
Обратные потери, дБ	10		
Развязка между каналами, дБ	40		
Количество разрядов аттенюатора	5		
Количество разрядов фазовращателя	6		
Младший разряд аттенюатора, дБ	0,75		
Младший разряд фазовращателя, град	5,625		
P1дБ, мВт	100		
Уровни управляющих напряжений, В	4,5	5	5,5
	-5,5	-5	-4,5
Ток потребления на разряд, мА	10		

Функциональная схема МИС представлена на рисунке (45).

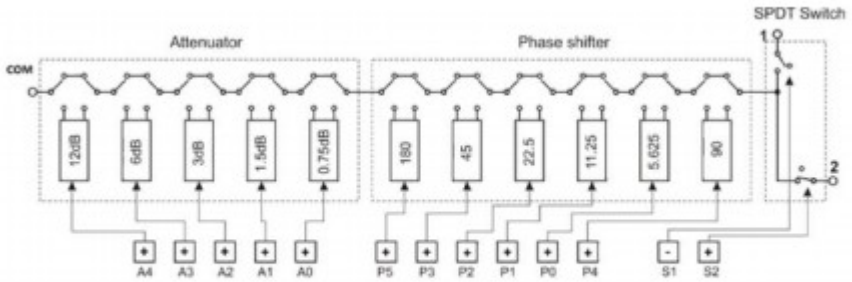

Рисунок 45 – Функциональная схема МИС

Из таблицы следует, что уровень мощности на выходе МИС не должен превышать -10 дБ (100 мВт).

3.4.5.3 Выбор предусилителей и МШУ

Основными параметрами усилителя мощности являются:
- Диапазон частот;
- Коэффициент усиления;
- Коэффициент шума;
- Максимальная мощность;
- Неравномерность коэффициента усиления.

Усилители с подходящими параметрами приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Усилители

Производитель	Модель усилителя	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент усиления, дБ	Коэффициент шума, дБ	Неравномерность коэффициента усиления, дБ	КСВн Вх/вых	Габариты	Рпотр, ВхмА	Р-1дБ, мВт
ФГУП «НПП «Исток»	АМ812	8-12	20	3,5	0,5	1,6/16	9x20	5x60	10
ФГУП «НПП «Исток»	АМ818	8-18	20	4,5	2	2/2	7x22,5	6x60	30
ФГУП «НПП «Исток»			30		2,5	2/2	7x37,5	6x80	50
ФГУП «НПП «Исток»	М421156	9,6-10,7	13	3,5	2	3/2	0,6 г	9x30	2,5
ФГУП «НПП «Исток»	АМ917-1	9-17	25	2,5	1	2/2	9x45	6x50	2,2
АО «НИИПП»	MLA110	8-12	18/21/23	1.5-2.5			2,1x1,7	3x45	5,5
ФГУП «НПП «Исток»	М421160	1-12	5	8	2	2/2	0,4 г	+9x80	3
ФГУП «НПП «Исток»	М421161	1-12	5	8	2	2/2	0,6 г	+9x100	3
		1-12	5	8	2	2/2	0,6 г	+9x100	25
ФГУП «НПП «Исток»	М421227	2-18	5,5	8	2	2/2	0,6 г	См табл. 22	10
ФГУП «НПП «Исток»		2-18	5	8	2	2/2	0,6 г		50
ФГУП «НПП «Исток»		2-18	10	8	4	2/2	0,6 г		10
ФГУП «НПП «Исток»		2-18	5,5	8	2	2/2	0,6 г		25
ФГУП «НПП «Исток»		2-18	10	8	4	2/2	0,6 г		25

Примечание: допустимая входная мощность для М421156 не более 100 мВт (-10 дБ). Продукция компании ФГУП «НПП «Исток» представлена в большем объеме, так как производство остальных участников рынка бескорпусных усилителей мощности X-диапазона частот либо освещено недостаточно, либо вообще отсутствует [16].

3.4.5.4 Выбор оконечного усилителя

Анализ рынка отечественных усилителей мощности показал, что на настоящий момент усилители выходной мощности до 5-10 Вт в интегральном исполнении отсутствуют. Следовательно, необходимо выбрать усилитель зарубежного производства. На настоящий момент пользуются популярностью усилители производства «TriQuint». У производителя широкая линейка усилителей X-диапазона частот с требуемой выходной мощностью. В таблице 15 приведены варианты выходных усилителей.

Таблица 15 – усилители мощности компании «TriQuint»

Модель усилителя	Диапазон частот, ГГц	Максимальная выходная мощность, дБм	Максимальная входная мощность, дБм	Коэффициент усиления, дБ	Коэффициент шума, дБ	Габариты, мм	P1дБвых, дБм
TGA2574	6-18	40		20	-20	5.0 x 3.0 x 0.10	
TGA2227	2-22	40		15	2		20
TGA2238-CP	8-11	47	30	24		15.2 x 15.2 x 3.5	
TGA2525	2-18	22		17	2	2.09 x 1.35 x 0.1	17
TGA2238	8-11	48		25-31		5.49 x 7.0 x 0.10	48

Помимо этого были рассмотрены усилители производства компании «Hittite» и «MicrowaveTechnologies». К сожалению данные компании не выпускают усилителей способных обеспечить на выходе более 3 Вт.

3.4.5.5 Выбор ограничителя

Основной задачей ограничителя в приемопередающем устройстве является защита малошумящего усилителя от высокого уровня входной мощности, превышающей предельно допустимое значение. Существует два способа просачивания мощности. Первый способ – прямое прохождение сигнала через циркулятор. Данная мощность можно принять равной выходной мощности передающего канала (примерно 7 дБ). Второй способ – просачивание мощности в циркуляторе (обратные потери). Это значение составляет примерно -13 дБ (17 дБм). В ходе анализа отечественного рынка ограничителей возможно обеспечить защиту МШУ только лишь от высокой мощности. Рассмотрим следующие варианты построения ограничительных устройств. Первый вариант основан на использовании отечественного ограничителя, обеспечивающего защиту от «высокой мощности» и поставленного параллельно диода Шоттки, обеспечивающего защиту от «малой мощности». Второй вариант представляет собой использование последовательно включенного pin-диодного ограничителя и также параллельно соединенного диода Шоттки. Данный вариант не располагает возможностью использования отечественной элементной базой. В таблице 16 приведены основные параметры диодов Шоттки.

Таблица 16 – параметры диодов Шоттки

Производитель	Наименование	Максимальный уровень напряжения на входе, мВ
«Avago»	HMPS-282x	340
«Skyworks»	CDF7623	250

Основными характеристиками ограничительных устройств являются:
- Полоса частот;
- Максимальная допустимая входная мощность;
- Мощность просачивания.

В таблице 17 приведены некоторые модели отечественных ограничительных устройств и их основные параметры.

Таблица 17 – Модели отечественных ограничительных устройств

Модель	Полоса частот, ГГц	Прямые потери, дБ	Входная мощность	Входная мощность (имп), Вт	Мощность просачивания, мВт
M54405-2	9,4-10,6	0,7	1,7 Вт	10	20 (-17 дБ) (13 дБм)
M54405	0,1-12,5	1,5	1,7 Вт	10	20
ML307	1-25		37 дБм		18-20 дБм

Примечание: 100% контроль на пластине при входной мощности 0-30 дБм.

При прохождении core-чипа сигнал ослабляется на величину начальных потерь (потери при прохождении core-чипа). Следовательно, в цепи на передачу перед ним целесообразно включить в схему предусилитель. Для того чтобы развязать приемную и передающую части внесем в схему два переключателя.

3.4.5.6 Выбор переключателя.

Основными параметрами переключателя являются:
- диапазон рабочих частот;
- ток управления на 1 канал;
- прямые потери;
- обратные потери;
- развязка между переключаемыми каналами [15].

Модели и параметры переключателей приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Модели и параметры переключателей

Модель переключателя	Диапазон частот, ГГц	Прямые потери, дБ	Развязка, дБ	Ток управления на 1 канал, мА	Обратные потери, дБ	Габариты, мм
MSW202-01	0.5-40	2	30	10	12	1,2x1x0,1

3.4.5.7 Выбор делителя

При выборе делителя следует руководствоваться следующими характеристиками:
- Полоса частот;
- Прямые потери;
- Обратные потери;
- Развязка между каналами.

К тому же необходимо учитывать то, что модель должна быть в бескорпусном исполнении. В таблице 19 приведены модели делителей, а также их основные характеристики.

Таблица 19 – Модели делителей

Производитель	Наименование модели	Полоса частот, ГГц	Прямые потери, дБ	Обратные потери, дБ	Развязка, дБ
АО «НИИПП»	MP504	4-14 (9 ГГц)	0,5	20	20

Стоит отметить, что отечественный рынок делителей мощности в большей степени богат на делители в корпусном варианте производства. Была проанализирована продукция следующих предприятий: ФГУП «НПП Исток», АО «НИИПП», АО «НПП «ФАЗА»», «Амитрон Электроникс». Что же касается бескорпусных, то в свободных источниках была найдена лишь одна модель , приведенная в таблице (19). Структурная схема сумматора 4:1 для ППМ представлена на рисунке 46.

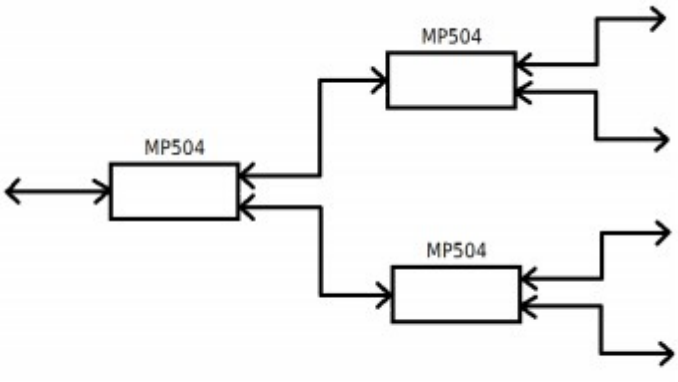

Рисунок 46 – структурная схема делителя 4:1

3.4.5.8 Определение требований к цифровой части ППМ

Цифровая часть ППМ состоит преимущественно из микросхемы управления фазовращателями и аттенюаторами. Анализ отечественного рынка микропроцессоров авиационного назначения показал, что на сегодняшний день особого успеха в данной области добилась компания «Миландр». Микросхемы данной компании позволяют обмениваться данными с помощью интерфейса SPI, что является необходимым для применения в рассматриваемой АФАР. Одним из основных условий является то, что с микросхемы должны поступать несколько сигналов управления одновременно (параллельно). Рассчитаем количество разрядов управления. Фазовращатель имеет 6 дискретов управления, аттенюатор – 5, ключи core чипа -1, входные переключатели MSW202-01 –1 (каждый). С учетом того, что в одном ППМ 4 канала получим (27):

$$N\text{р} = (6 + 5 + 1 + 1 * 2) * 4 = 56 \quad (27)$$

N**р**- количество разрядов управления.

Количество разрядов можно уменьшить (31), приняв во внимание тот факт, что все ключи каждого из каналов должны быть выставлены либо на прием, либо на передачу. Следовательно, ими можно управлять параллельно. Тогда на управление всеми ключами ППМ потребуется 1 разряд управления.

$$N\text{р} = (6 + 5) * 4 + 1 = 45 \quad (28)$$

3.4.6 Построение структурной и электрической принципиальной схем СВЧ тракта ППМ

В таблице 20 приведены основные узлы ППМ, их модели и габариты.

Таблица 20 – основные узлы ППМ

Наименование узла ППМ	Наименование модели	Габаритные размеры, ШхВхГ, мм
МИС core-чип	MSM204/205	5x2,7x0,1
Предусилитель мощности (ПУ1)	M421156	12x7,5x1,8
Предусилитель мощности (ПУ2, ПУ3)	M421227	12x7,5x2
Выходной усилитель (ВУ)	TGA2238	5,49 x 7,0 x 0,10
Циркулятор (Ц)	ФПЦН2-100-fц (101-fц)	7,5x6x5
Ограничитель (О)	M54405-2	7,5x6,1x1,4
Малошумящий усилитель (МШУ)	MLA 110	2,1x1,7
Переключатель	MSW202-01	1,2x1x0,1
Делитель	MP504	1,4x1,4x0,1

Структурная схема ППМ состоит из четырех каналов и делителя сумматора 1:4. Структурная схема одного канала ППМ изображена на рисунке (47).

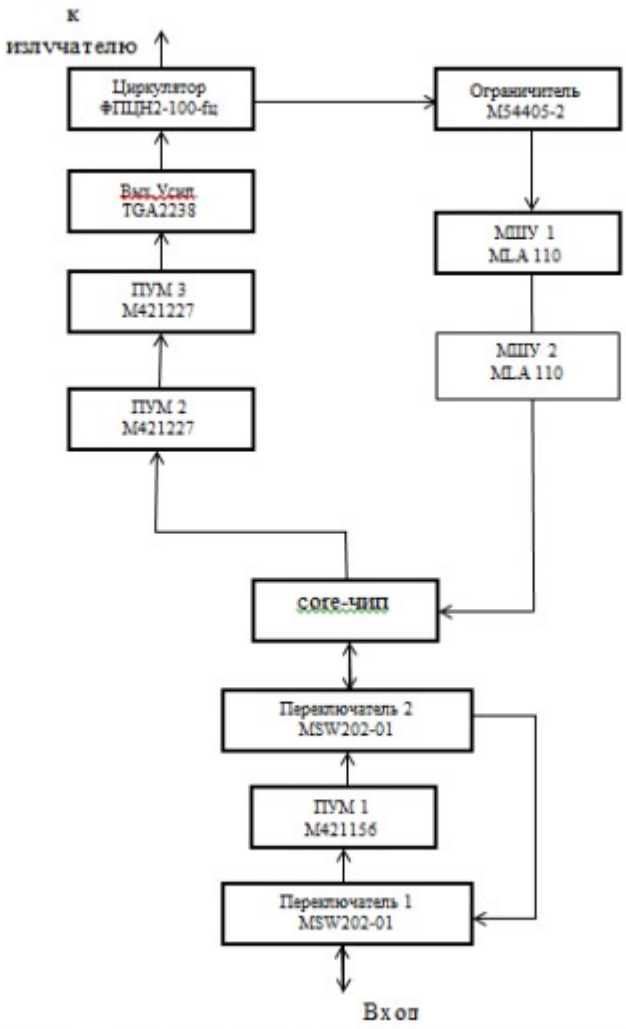

Рисунок 47 – Структура схема одного канала ППМ без сумматора делителя

Сигнал после сумматора-делителя 1:4 поступает на каждый из четырех каналов ППМ. Далее он поступает на переключатель, выставленный в положение на передачу, после чего поступает на предусилитель, назначение которого нивелировать потери при прохождении в СФМИС, далее снова переключатель, выставленный на передачу, и поступает на core-чип, где происходит изменение его фазы и амплитуды на заранее выставленную величину. Для режима на передачу положение переключателя core-чипа должно быть выставлено в положении ПРД. Далее сигнал попадает на предусилитель мощности, где он раскачивается до требуемого уровня входной мощности оконечного усилителя, к тому же он нивелирует потери при прохождении сигналом core-чипа. После этого сигнал попадает на выходной усилитель, где достигает требуемого уровня мощности с учетом прямых потерь последующего циркулятора. Далее сигнал попадает на циркулятор. Из плеча 1 циркулятора сигнал попадает в плечо 2, после чего он поступает на излучатель. Принцип работы на прием заключается в следующем: сигнал поступает с излучателя на 2 вход циркулятора. Сигнал выходит из третьего плеча циркулятора, после чего поступает на ограничитель. Назначение ограничителя в том, чтобы не пропустить просачивающийся из передающего канала мощность, способную вывести из строя МШУ. После ограничения он попадает на первый каскад

малошумящего усилителя, затем на второй. Далее сигнал попадает на вход ПРМ переключателя core-чипа, изменяется по фазе и амплитуде и после двух переключателей поступает на вход сумматора-делителя 1:4. После выбора всех узлов ППМ необходимо рассчитать мощности, которые через них проходят. Примем входную мощность приходящую на делитель минус 2 дБм. Расчет мощностей цепи на передачу в дБм

$$P_{вых} = P_{вх} - L_{п1} - L(4:1) - L_{п2} + G_{пу1} - L_{core-чип} + G_{пу2} + G_{пу3} + G_{оу} - L_{zirk}$$

$$P_{вых} = -2 - 2 + 13 - 2 - 7 + 10 + 4 + 28 - 0{,}4 - = 38{,}6 \text{ дБм} > 7 \text{ дБ}$$

Для того, чтобы обеспечить стабильность управления фазовращателем, аттенюатором и переключателями необходимо поставить в параллель конденсаторы. Чаще всего ставят конденсаторы двух или трех номиналов. В СВЧ цепи необходимо отфильтровать пульсации по питанию. Для этого ставим последовательно конденсатор. В таблице (21) представлены модели отечественных СВЧ конденсаторов.

Таблица 21 – Конденсаторы «НИИ Гириконд»

Производитель	Наименование модели	Номиналы	Предельная частота, ГГц
«НИИ Гириконд»	К10-71	0,47-3300 пФ	45

К сожалению, отечественных производителей СВЧ конденсаторов нетак много. Была выбрана линейка наиболее распространенных и ,возможно, единственных в своем роде конденсаторов К10-71. Данная модель отвечает требованиям по предельно допустимой частоте, а также по номиналам емкости. Также необходимо определить номиналы питания и управления узлов СВЧ тракта приемо-передающего модуля.

Таблица 22 – Номиналы питания

Наименование узла	U1	U2	I, mA
МИС core-чип	5	-5	10 на разряд
М421156 (ПУМ 1)	9	-	30
М421227(ПУМ 2,3)	+5	-5	120
MLA110	3	-	45
TGA2238	28	-2,8	650
MSW202-01	-	-	10 на один канал

3.4.7 Расчет коэффициента шума

После построения структурной схемы и выбора всех составных частей ППМ необходимо рассчитать коэффициент шума на выходе ППМ. Для расчета коэффициента шума необходимо воспользоваться формулой (29) [17].

$$K_{ш} = Ш1 + \frac{Ш2 - 1}{G1} + \frac{Ш3 - 1}{G1 * G2} \quad \textbf{(29)}$$

Ш1 – коэффициент шума первого каскада;
Ш2 – коэффициент шума второго каскада;
Ш3 – коэффициент шума третьего каскада;
G1 – коэффициент усиления первого каскада;
G2 – коэффициент усиления второго каскада.

Ш1 = $KMLA110 * L$**цирк** $* L$**огран(30)**

Ш2 = $KMLA110$**(31)**

Ш3 = $KMLA110 * Lcore * L$**перекл** $* L$**перекл(32)**

Примем во внимание, что $G1 = GMLA110$ и $G2 = GMLA110$. Подставив известные значения из п. 3.4.5 получим Kш = 3,6173 дБ. Полученное значение коэффициента шума удовлетворяет требованиям предъявляемым к ППМ. Электрическая схема, включающая основные СВЧ узлы, а также функционал микросхемы управления приведена на рисунке 48.

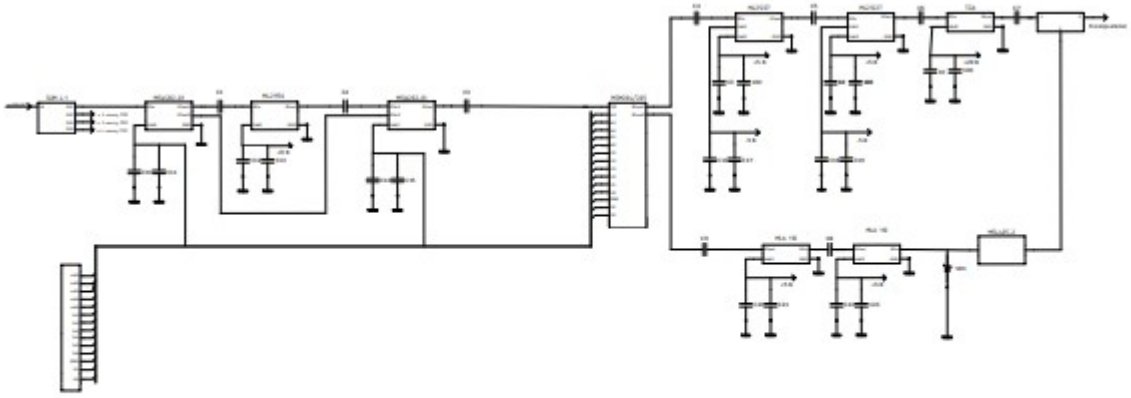

Рисунок 48 – Электрическая принципиальная схема ППМ

3.5 Разработка СВЧ распределительной системы

3.5.1 Структурная схема и основные принципы построения.

АФАР разрабатывается для авиационного применения, а измерители угловых координат таких системы строятся по принципу моноимпульсных (с целью определения угловых координат с высокой точностью для наведения управляемых ракет воздух-воздух), то решетку необходимо разделить на 4 квадранта [17]. В результате количество каналов в каждом квадранте составляет 768/4=192. Так как разрабатываемый ППМ четырехканальный, получаем 192/4= 48 ППМ, которые необходимо объединить. Число 48 невозможно представить как 2 в какой-либо степени. Следовательно, придется прибегнуть к неравномерному делению. Разобьем СВЧ распределительную систему на два каскада. Первый каскад будет представлять собой систему сумматоров – делителей малой кратности. Архитектура антенной решетки подтолкнула к выбору сумматоров-делителей с количеством входов 4 и 2. В результате было решено использовать 4 сумматора-делителя 2:1 и 10 сумматоров делителей 4:1. Итого: в результате первого каскада суммирования получаем 14 каналов, причем 4 из которых отличаются по мощности в два раза, а точнее меньше на 3 дБ. Второй каскад суммирования объединим в одно устройство, которое назовем СВЧ распределительная плата. Оно состоит из 14 входных и одного выходного канала. Упрощенная структурная схема СВЧ РС представлена на рисунке 49.

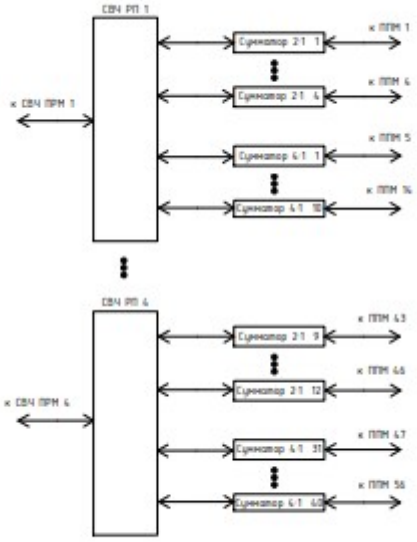

Рисунок 49 – структурная схема СВЧ РС

3.5.2 Разработка сумматора – делителя 2:1

Основные этапы разработки сумматора-делителя:

- выбор схемы построения;
- выбор материалов (диэлектрик и проводник);
- выбор толщины подложки;
- выбор элементной базы (резистор);
- построение топологии.

Выберем схему кольцевого делителя мощности. Схема представлена на рисунке 50. Основным преимуществом данной схемы является высокая развязка между каналами.

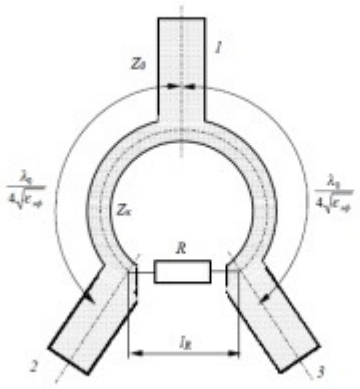

Рисунок 50 – Кольцевой делитель мощности

Выберем материал подложки. Отечественное производство располагает двумя видами диэлектриков: фольгированные и керамические. Так как первые проще в обработке, проанализируем их основные разновидности, коими являются ФЛАН, ФАФ и ФФ. В таблице приведены фольгированные диэлектрики отечественного производства и их основные параметры (таблица 23).

Таблица 23 – Основные марки фольгированных диэлектриков

Марка	Диэлектричская проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь
ФЛАН 2,8	2,8±0,1	0,0015
ФЛАН-3,8	3,8±0,1	0,0012
ФЛАН-5,0	5±0,2	0,0015
ФЛАН-7,2	7,2±0,3	0,0015
ФЛАН-10	10±0,5	0,0015
ФЛАН 16	16±0,8	0,0015
ФФ-4	2±0,1	0,0003
ФАФ-4Д	2,6±0,2	0,0010

По причине того, что размеры делителя во многом зависят от длины волны, ее необходимо уменьшить.

С целью миниатюризации выберем материал диэлектрика с достаточно большой диэлектрической проницаемостью ФЛАН-16. 69 При выборе толщины подложки руководствуются двумя факторами, а именно: размерами и тем, что устройство пассивное. Примем толщину подложки равной 1 мм. Рассчитаем основные параметры делителя. Входное сопротивление Z0=50 Ом. Номинал резистора определяется исходя из формулы (33).

$$R = 2 * Z0 \quad (33)$$

Волновое сопротивление кольца Zк рассчитывается по формуле (34).

$$Zk = Z0 * \sqrt{2} \quad (34)$$

Диаметр кольца определяется по формуле (35).

$$d_{cp} = \frac{1}{\pi}\left(\frac{\lambda_0}{2} + l_R\right) \quad (35)$$

Также необходимо выбрать тип резистора. Номинал резистора, исходя из формулы (34), должен составлять 100 Ом. Основные модели и параметры отечественных СВЧ-резисторов приведены в таблице 24.

Таблица 24 – Параметры отечественных свч-резисторов

Модель (Тип)	Мощность рассеяния, Вт	Номинальное сопротивление, Ом	Диапазон рабочих частот, ГГц	КСВн, не более
С6-9	0,125	10-1000	0,18	*
С6-3	До 1 Вт	50	До 18	1,5

При разработке топологии необходимо учесть размеры резистора. Основные технические требования приведены в таблице 25.

Таблица 25 – Основные требования к сумматору 2:1

Количество входных каналов	2
Количество выходных каналов	1
Диапазон частот, ГГц	9,7-10,3
Коэффициент передачи, не менее, дБ	3,2
Развязка между каналами, не менее, дБ	20
Габаритные размеры, не более, мм	30 x 30 x 10

При разработке сумматора необходимо учитывать не только габаритные размеры, но и расположение входных каналов ППМ. С целью унификации будем использовать диэлектрик ФЛАН-16. Толщину подложки выберем равной 1 мм. Проектирование и оптимизация параметров сумматора-делителя производилась в AWR MicrowaveOffice. [18]. После длительной оптимизации электрических и геометрических параметров была получена

топология сумматора-делителя, изображенная на рисунке (51). Ширина микрополосков с волновым сопротивлением 70 Ом составляет – 0,95 мм, а с волновым сопротивлением 50 Ом – 2 мм.

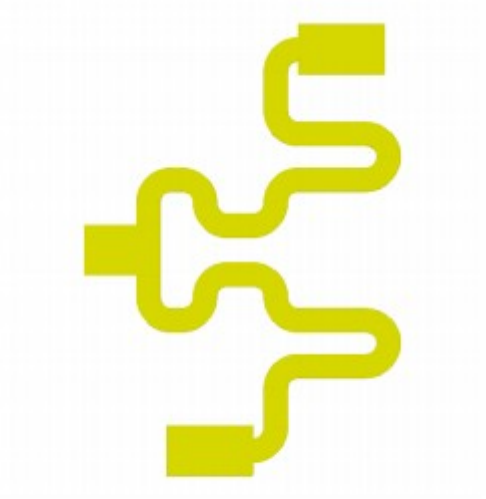

Рисунок 51 – Топология сумматора–делителя 2:1

Построим график зависимости коэффициента передачи от частоты (рисунок 52).

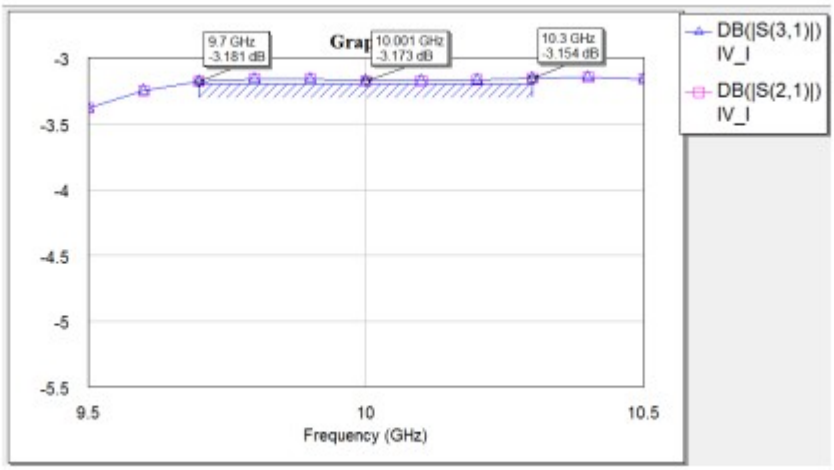

Рисунок 52 – Зависимость коэффициентов передачи S21 и S31 от частоты

На графике видно, что коэффициент передачи не превышает -3,2 дБ и составляет -3,181 дБ на частоте 9,7 ГГц, -3,173 дБ на частоте 10 ГГц и -3,154 на частоте 10,3 ГГц. Построим график зависимости развязки между каналами от частоты (рисунок 53).

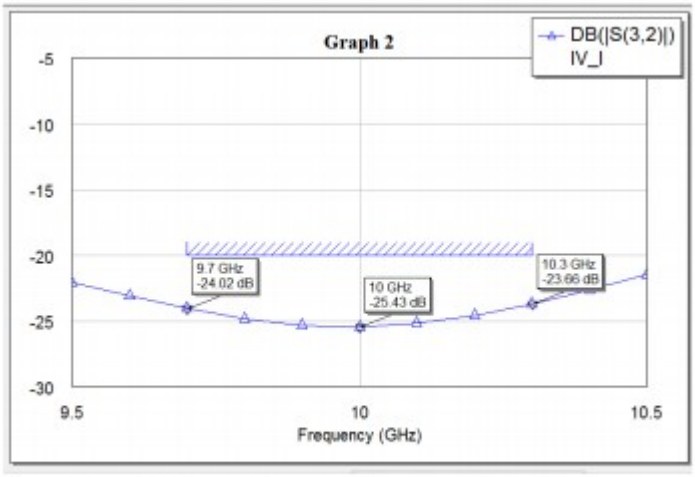

Рисунок 53 – Зависимость развязки S32 от частоты

Проанализировав зависимость S32 от частоты, можно заметить, что развязка не превышает -23 дБ, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сумматору. Далее необходимо сконструировать корпус сумматора. Недостающие размеры возьмем, исходя из размеров МАП и ППМ. На рисунке 54 представлены эскизы делителя 2:1.

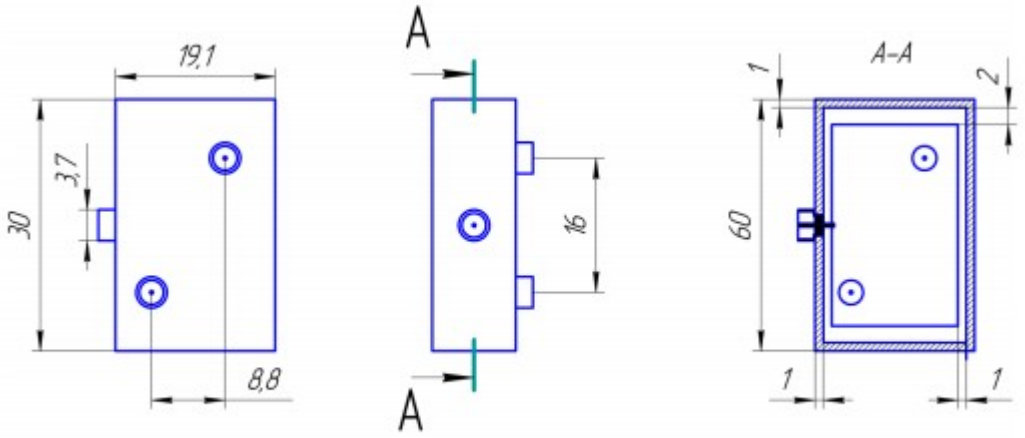

Рисунок 54 – Эскизы корпуса делителя 2:1

С целью унификации разъемы будут использоваться те же, что и для излучателей. Так как разъемы обладают диаметром примерно 4 мм,минимальная толщина сумматора должна составлять не менее 8 мм. Центральная жила разъема расположена посередине сумматора, следовательно, на таком же уровне должна быть расположена и плата. Для того чтобы не утяжелять конструкцию предусмотрим ступеньку, на которую в последствии и будет припаяна плата.

3.5.3 Разработка сумматора – делителя 4:1

Сумматор делитель 4:1 будет представлять двухкаскадный кольцевой делитель. Требования предъявляемые к сумматору представлены в таблице26.

Таблица 26 – Основные требования к сумматору 2:1

Количество входных каналов	4
Количество выходных каналов	1
Диапазон частот, ГГц	9,7-10,3
Коэффициент передачи, не менее, дБ	6,8
Развязка между каналами, не менее, дБ	20
Габаритные размеры, не более, мм	70 x 30 x 10

В результате моделирования сумматора была получена топология, изображенная на рисунке (55). Ширина микрополосков с волновым сопротивлением 70 Ом составляет – 0,56 мм, а с волновым сопротивлением 50 Ом – 1,55 мм.



Рисунок 55 – Топология сумматора 4:1

Построим график зависимости коэффициентов передачи от частоты (рисунок 56).

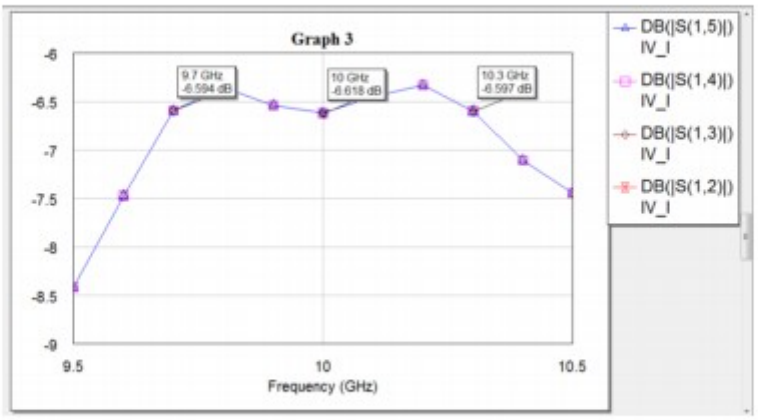

Рисунок 56 – Зависимость коэффициентов передачи S12, S13, S14, S15 от частоты

По графикам видно, что полученный коэффициент удовлетворяет требованиям таблицы (26), так как он выше требуемого значения -3,8 дБ. Построим зависимость развязки между каналами от частоты.

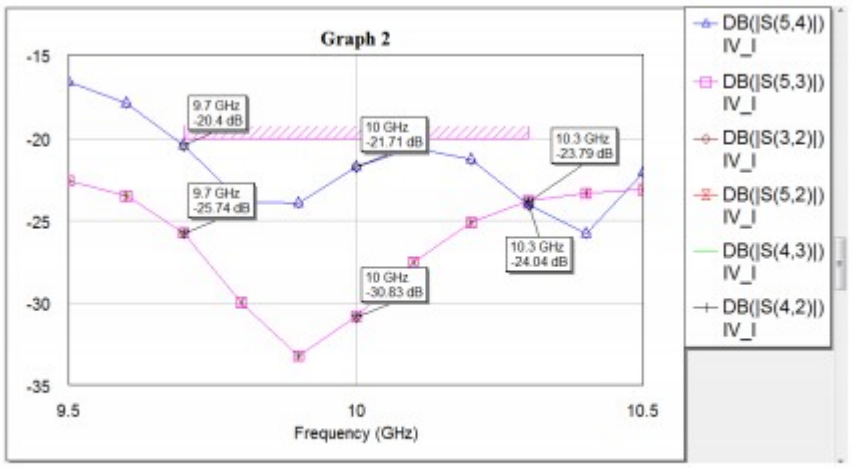

Рисунок 57 – Зависимость развязки между каналами от частоты

Требования таблицы (26) выполнены, так как развязка между каналами не превышает значения -20 дБ. На рисунке (58) продемонстрирована плата сумматора 4:1 расположенная внутри корпуса.

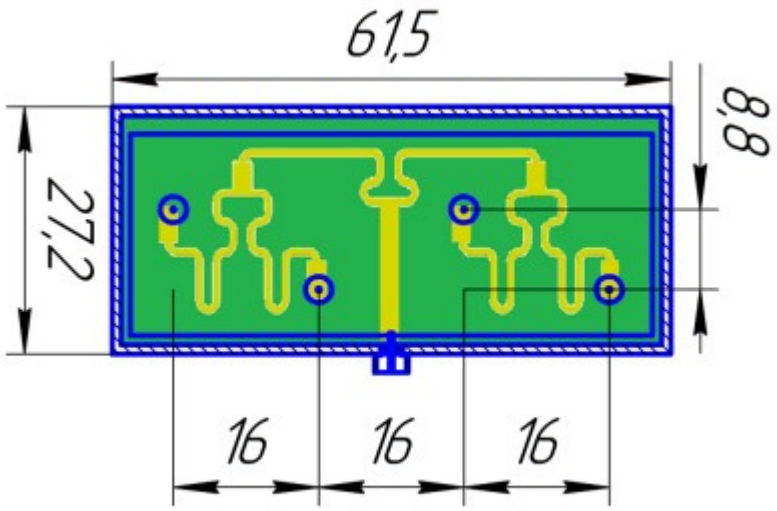

Рисунок 58 – плата сумматора 4:1 внутри корпуса

На рисунке (59) представлены эскизы корпуса сумматора 4:1 с основными размерами.

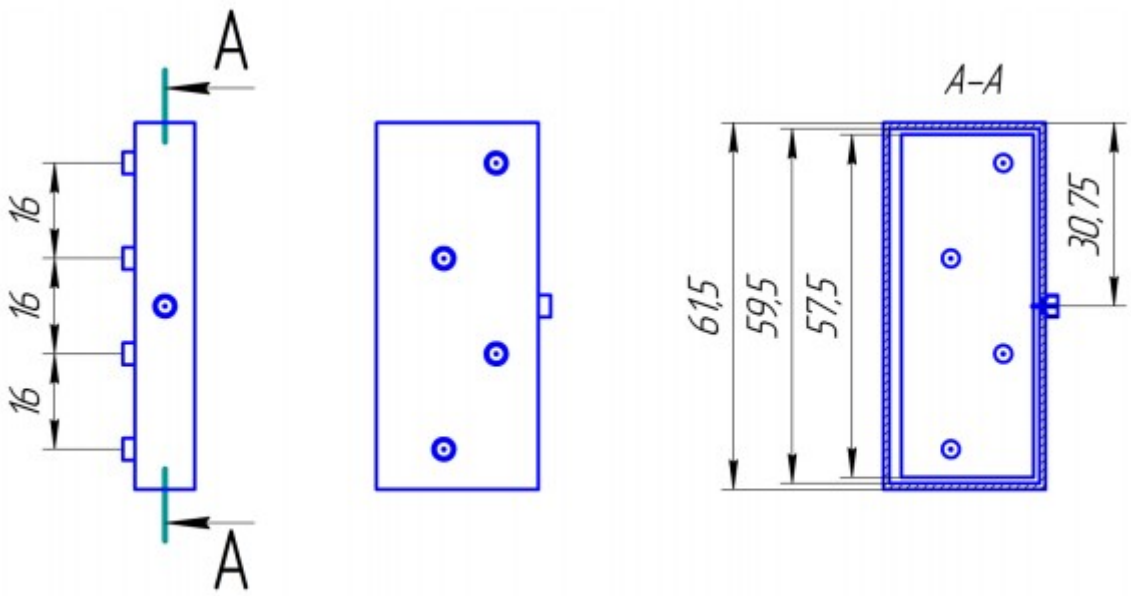

Рисунок 59 – корпус сумматора 4:1

3.5.4 Разработка СВЧ распределительной платы

При проектировании второго каскада суммирования, который состоит из платы СВЧ РС, возникает проблема неравномерного деления. К тому же большое количество выходных каналов требует для топологии значительно 76 большего места. Методом подбора было решено использовать 10 выходных каналов с одним номиналом мощности, и 4 канала с уровнем мощности меньшим на 3 дБ. Это обусловлено тем, что в каждом излучателе необходимо обеспечить одинаковый уровень мощности. Требования, предъявляемые к СВЧ РС плате приведены в таблице 27.

Таблица 27 – Основные требования к плате СВЧ РС

Количество входных каналов	14
Количество выходных каналов	1
Диапазон частот, ГГц	9,7-10,3
Коэффициент передачи в 2-5 и 10-15 каналы, дБ	От -12,5 до -13,5
Коэффициент передачи в 6-9 каналы, дБ	От 15,5 до 16,5
Развязка между каналами, не менее, дБ	18-20
Габаритные размеры, не более, мм	170 x 70 x 10

В результате была получена следующая топология платы СВЧ РС (Рисунок 60). Ширина микрополосков с волновым сопротивлением 50 Ом составила 0,6 мм, а с волновым сопротивлением 70 Ом – 0,25 мм.

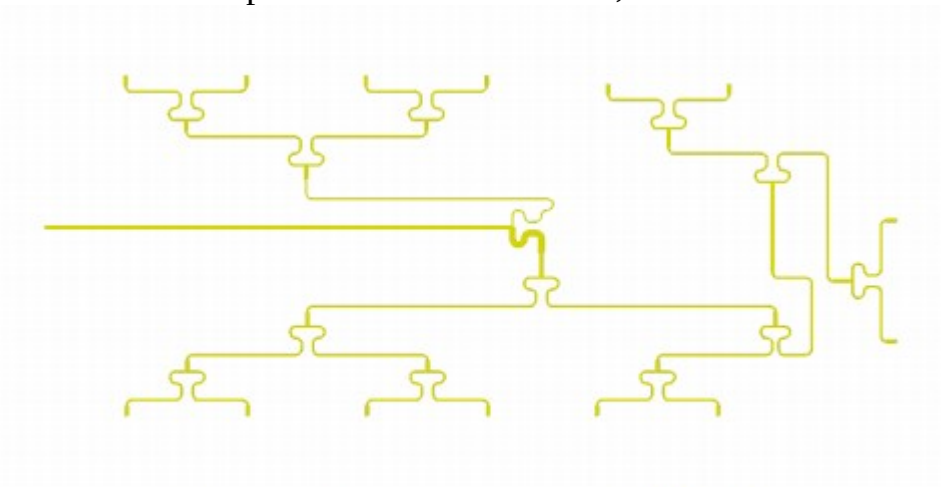

Рисунок 60 – топология платы СВЧ РС

Построим график зависимости коэффициента передачи от частоты (рисунок61).

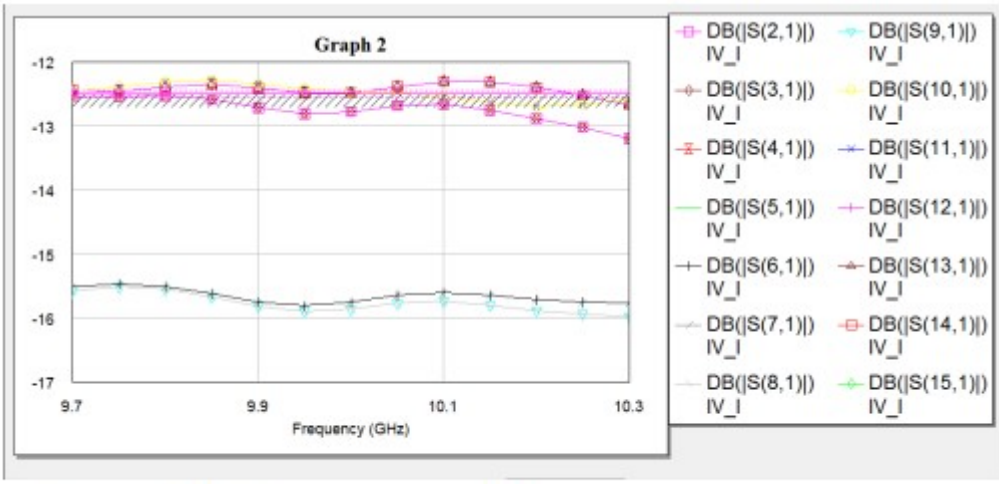

Рисунок 61 – Зависимость коэффициента передачи от частоты

Построим график зависимости развязки между каналами от частоты (61)

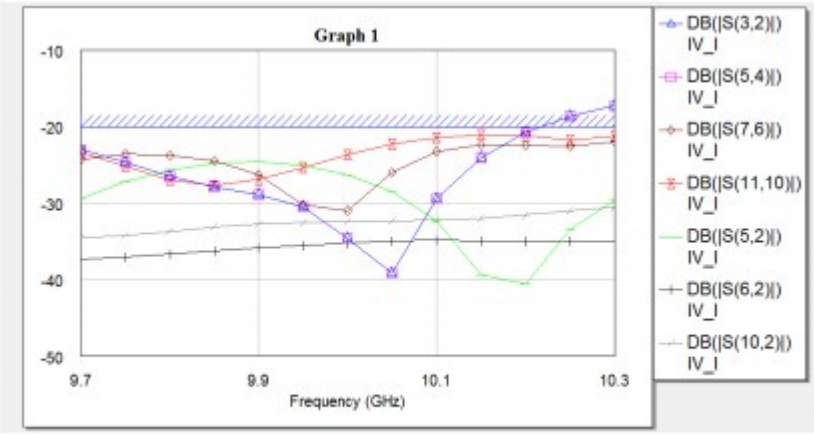

Рисунок 62 – развязка между каналами от частоты

На представленных графиках видно, что исследуемые параметры удовлетворяют требованиям таблицы (27). Также был разработан корпус платы СВЧ РС (63-64).

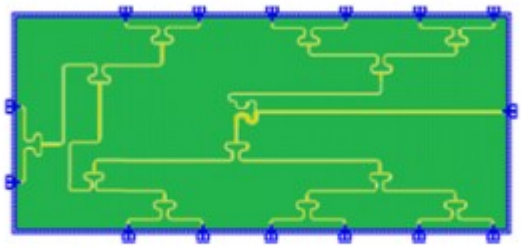

Рисунок 63 – Корпус СВЧ распределителльной платы

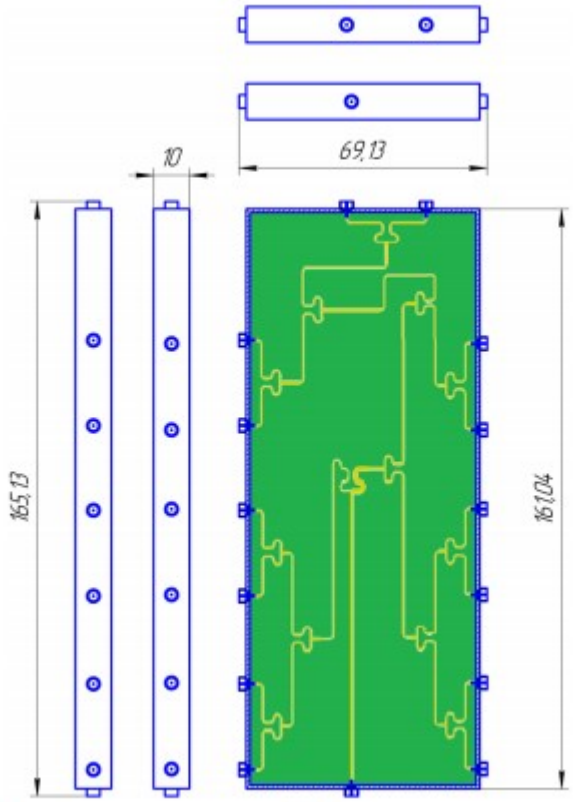

Рисунок 64 – Эскизы корпуса СВЧ распределительной платы

3.6 Разработка алгоритма расчета амплитудно-фазового распределения (АФР)

Расчет амплитудно-фазового распределения одна из важнейших задач. Оно определяет направление луча антенной решетки. Изменение амплитудного распределения определенным образом позволяет подавить боковые лепестки диаграммы направленности с небольшим снижением эффективной изотропно излучаемой мощности. Мной был написан алгоритм расчета выше перечисленных распределений модели активной фазированной антенной решетки, разработанной в данной ВКР.

К данному алгоритму был выдвинут ряд требований, а именно необходимо:

- при моделировании использовать антенную решетку, рассматриваемую в данной ВКР;
- фазовым принять геометрический центр антенной решетки;
- предусмотреть дискрет изменения фазы в ППМ;
- учесть дискрет изменения усиления ППМ;
- осуществить запись коэффициентов амплитудно-фазового распределения в файл формата «.csv».

Запись коэффициентов АФР в файл формата csv необходима для последующего их использования при отладке АФАР и записи в бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ). Ниже приведен листинг алгоритма расчета АФР.

Исходные данные:

```
c=3e+08;%скорость света в свободном пространстве
freq=10.3e+09;%максимальное значение частоты в заданном диапазоне
lambda=c/freq;%минимальная длина волны
Dmax=2e+5;%максимальная дальность
epr=3;%ЭПР
Gizl=3.4594;%коэффициент усиления одиночного излучателя
Pcmin=10^((-170)/10);%Чувствительность приемника
Pizl_1=5;%Мощность одиночного излучателя
thetta_x_max=65*pi/180;%Максимальный угол качания по азимуту
thetta_y_max=55*pi/180;%Максимальный угол качания луча по углу места
ugol_x=0*pi/180;%угол отклонения луча по азимуту
ugol_y=0*pi/180;%отклонение луча по углу места
step=4;%шаг расчета диаграммы направленности
ugol_max=60;%максимальный угол расчета
k=2*pi/lambda;
iii=sqrt(-1);%мнимая единица
discret_fasa=5.625;%дискретфазовращателя в градусах
discret_att=0.75;%дискрет аттенюатора в дБ
```

Расчет минимального количества излучателей в решетке:

```
Nizl=((Dmax^4)*((4*pi)^3)*Pcmin/(epr*(lambda^2)*0.5*Pizl_1*Gizl^2))^(1/3);
Nizl=fix(Nizl);%округление до наименьшего целого
```

Расчет максимального расстояния междуизлучателями впрямоугольной решетке:

```
dx_max_rec=lambda/(1+sin(thetta_x_max));
dy_max_rec=lambda/(1+sin(thetta_y_max));
```

Расчет максимального расстояния между излучателями вгексагональной решетке:

```
dx_max_tri=(2/sqrt(3))*lambda/(1+sin(thetta_x_max));
dy_max_tri=lambda/(1+sin(thetta_y_max));
```

Выбор количества излучателей по x и y:

Вектор количества излучателей в каждой строке:

```
newvec_podbor=[8 8 8 8 16 16 16 16 24 24 24 24 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32
32 32 24 24 24 24 16 16 16 16 8 8 8 8];
newvec=newvec_podbor;%переназначение переменных
```

Вектор количества излучателей в каждом столбце:

```
newvec_y=[12 12 12 12 20 20 20 20 28 28 28 28 36 36 36 36 36 36 36 36 28 28
28 28 20 20 20 20 12 12 12 12];
```

Перерасчет количества излучателей:

```
vectorsum=sum(newvec);%общее кол-во излучателей
Nxx=max(newvec);%кол-во излучателей по x
Nyy=length(newvec);%кол-во излучателей по y
```

Расчет матрицы расположения излучателей по x:

```
M_dx1=zeros(Nyy,Nxx);
fori=1:Nyy
```

```
for j=1:Nxx
 M_dx1(i,j)=(j-1)*dx_max_tri;
M_dx(i,j)=M_dx1(i,j);
end
end
```
Приведение матрицы по x к гексагональной форме:
```
fori=2:2:Nyy
for j=1:Nxx
M_dx(i,j)=M_dx1(i,j)+0.5*dx_max_tri;
end
end
```
Расчет матрицы расположения излучателей по y:
```
M_dy=zeros(Nyy,Nxx);
for j=1:Nxx
fori=1:Nyy
M_dy(i,j)=(i-1)*dy_max_tri;
end
end
```
Перенос центра фаз в центр решетки:
```
M_dx = M_dx-dx_max_tri*Nxx/2;
M_dy= M_dy-dy_max_tri*(Nyy-1)/2;
```
Расчет матрицы расположения излучателей в цилиндрической СК:
```
M_r=sqrt(M_dx.^2+M_dy.^2);
```
Расчет фазового распределения:
```
phi_dx=k.*M_dx.*sin(ugol_x);
phi_dy=k.*M_dy.*sin(ugol_y);
Lxx=0.5*dx_max_tri+Nxx*dx_max_tri;%Апертура антенны по x
Lyy=Nyy*dy_max_tri;%Апертура антенны по y
fasa_dx_dy=(phi_dx+phi_dy);
```
Дискретизацияфазы:
```
fasa_dx_dy_deg=rem(rem(fasa_dx_dy*180/pi,360)+360,360);
fasa_dx_dy_round=(round(fasa_dx_dy_deg/discret_fasa))*discret_fasa;
fasa_dx_dy_rem=rem(fasa_dx_dy_round,360);
fasa_dx_dy=fasa_dx_dy_rem*pi/180;
delta=2*(fasa_dx_dy_deg-fasa_dx_dy_round);
```
Расчет амплитудного распределения:
```
del_ta=0;
A_distr=abs((1-(1-del_ta).*(2.*M_r./Lyy).^2).^4);
```
ПереводвдБ
```
A_distr_dB=10.*log10(A_distr);
```
Дискретизацияаттенюации
```
A_distr_round=round(A_distr_dB./ discret_att).* discret_att;
Z_d=abs(A_distr_round./ discret_att);%Вычислениедискретоваттенюации
A_distr=10.^(0.1.*A_distr_round); %переводвразы
```
Заполнение нулями (переход к круглой решетке)

```
fori=1:Nyy
for j=1:(Nxx-newvec(i))*0.5
A_distr(i,j)=0;
end
end
fori=1:Nyy
for j=(Nxx+newvec(i))*0.5+1:Nxx
A_distr(i,j)=0;
end
end
```

Расчет снижения эффективной изотропно излучаемой мощности

```
PG=10*log10((sum(sum(A_distr)))/(vectorsum));
```

Расчетмножителяантеннойрешетки

```
thetta_x=-(ugol_max)*pi/180:step*pi/360:(ugol_max)*pi/180;
thetta_y=-ugol_max*pi/180:step*pi/360:ugol_max*pi/180;
factorxy=zeros(Nyy,Nxx);
facsum=zeros(length(thetta_x),length(thetta_y));
phi_dx_dy=((exp(-iii.*phi_dx)).*(exp(-iii.*phi_dy)));
Zxyp=A_distr;%Амплитудное распределение по мощности
Zxyu=sqrt(A_distr);%Амплитудное распределение по напряжению
phi_dx_dy=exp(-iii.*fasa_dx_dy);
AP=(phi_dx_dy.*Zxyu);
forthetta_x_i=1:length(thetta_x)
forthetta_y_j=1:length(thetta_y)
factorxy=AP.*exp(iii*(M_dx*k*sin(thetta_x(thetta_x_i)))).*exp(iii*(M_dy.*k*sin
(thetta_y(thetta_y_j))));
facsum(thetta_x_i,thetta_y_j)=abs(sum(sum(factorxy)));
end
end
```

Импорт диаграммы направленности одиночного излучателя

Выделение нужного фрагмента импортируемой ДН

```
Fx1=Fx1_1(180-ugol_max*2+1:step:length(Fx1_1)-(180-ugol_max*2));
Fx2=Fx2_1(180-ugol_max*2+1:step:length(Fx1_1)-(180-ugol_max*2));
Fx22=Fx2.';
phi_fx1=phi_fx1_1(180-ugol_max*2+1:step:length(Fx1_1)-(180-ugol_max*2));
for phi_fx1_i=1:length(phi_fx1)
for phi_fx1_j=1:length(phi_fx1)
Fxmatrix(phi_fx1_i,phi_fx1_j)=Fx1(phi_fx1_j);
end
end
for phi_fx1_i=1:length(phi_fx1)
for phi_fx1_j=1:length(phi_fx1)
DN_I_izl(phi_fx1_i,phi_fx1_j)=Fxmatrix(phi_fx1_i,phi_fx1_j)*Fx2(phi_fx1_i);
end
end
```

```
DN_AP=DN_I_izl.*(facsum).^2;
DN_AP_norm=DN_AP./(max(max(DN_AP)));
DN_AP_norm_x=max(DN_AP_norm);
DN_AP_norm_y=max(DN_AP_norm.');
```

Графическое представление результатов:

```
figure
subplot(1,2,2)
plot(thetta_x*180/pi, 10*log10(DN_AP_norm_x))
title('Нормированная ДН антенной решетки')
axis([ -ugol_maxugol_max -60 0])
xlabel('Уголместа')
ylabel('Мощность, дБ')
subplot(1,2,1)
plot(thetta_x*180/pi, 10*log10(DN_AP_norm_y))
title('Нормированная ДН антенной решетки')
axis([ -ugol_maxugol_max -60 0])
xlabel('Азимут')
ylabel('Мощность, дБ')
10*log10(max(max(DN_AP)))
Запись распределения в файл
fid=fopen('A_distr.csv' ,'w');
if fid == -1
error('File is not opened')
end
fprintf(fid,'%f,%f,%f\n', Z_d );
fclose(fid);
fid=fopen('P_distr.csv' ,'w');
if fid == -1
error('File is not opened')
end
fprintf(fid,'%f,%f,%f\n', Z_d );
fclose(fid);
```

4 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ (БЖД)

4.1 Постановка задачи

Данная выпускная квалификационная работа посвящена разработке блока бортовой радиолокационной станции, а именно активной фазированной антенной решетке. Разработка узлов АФАР велась на ЭВМ. Пользователям ЭВМ необходимо знать основные правила электробезопасности, а также пожаробезопасности, а также владеть информацией о специфике воздействия на человека вредных факторов и методах борьбы с ними. Приняв во внимание вышеперечисленное, необходимо рассмотреть возможности обеспечения безопасной для жизни человека работу.

4.2 Опасные и вредные факторы, возникающие в процессе выполнения работы

«Первопричиной всех травм и заболеваний, связанных с процессом труда, является неблагоприятное воздействие на организм занятого трудом человека тех или иных факторов производственной среды и трудового процесса. Это воздействие, приводящее в различных обстоятельствах к различным результирующим последствиям, зависит от наличия в условиях труда того или иного фактора, его потенциально неблагоприятных для организма человека свойств, возможности его прямого или опосредованного действия на организм, характера реагирования организма в зависимости от интенсивности и длительности воздействия (экспозиции) данного фактора.»[19]

«Все производственные факторы по сфере своего происхождения подразделяют на следующие две основные группы:

- факторы производственной среды:
- факторы трудового процесса.»[19]

«Опасные и вредные производственные факторы производственной среды по природе их воздействия на организм работающего человека подразделяют:

- на факторы, воздействие которых носит физическую природу;
- факторы, воздействие которых носит химическую природу;
- факторы, воздействие которых носит биологическую природу.»[19]

«Опасные и вредные производственные факторы трудового процесса по источнику своего происхождения подразделяют:

- на психофизиологические:
- организационно-управленческие;

- личностно-поведенческие (то есть связанные с самим работающим);
- социально-экономические.»[19]

Далее необходимо подробнее разобраться с факторами, имеющими непосредственное влияние на рабочий процесс при выполнении данной ВКР.

«Опасные и вредные производственные факторы, обладающие свойствами физического воздействия на организм работающего человека:
- опасные и вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде и характеризуемые, в частности, повышенным уровнем и другими неблагоприятными характеристиками шума;
- опасные и вредные производственные факторы, связанные со световой средой (некогерентными неионизирующими излучениями оптического диапазона электромагнитных полей) и характеризуемые чрезмерными (аномальными относительно природных значений и спектра) характеристиками световой среды, затрудняющими безопасное ведение трудовой и производственной деятельности, а именно:
отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения, отсутствие или недостатки необходимого искусственного освещения, повышенная яркость света, пониженная световая и цветовая контрастность, прямая и отраженная блескость, повышенная пульсация светового потока;
- опасные и вредные производственные факторы, связанные с чрезмерным загрязнением воздушной среды в зоне дыхания, то есть с аномальным физическим состоянием воздуха (в том числе пониженной или повышенной ионизацией) и (или) аэрозольным составом воздуха;
- опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего, температурой и относительной влажностью воздуха, скоростью движения (подвижностью) воздуха относительно тела работающего.а также с тепловым излучением окружающих поверхностей, зон горения, фронта пламени, солнечной инсоляции;
- опасные и вредные производственные факторы, связанные с резким изменением (повышением или понижением) барометрического давления воздуха производственной среды на рабочем месте или с его существенным отличием от нормального атмосферного давления (за пределами его естественной изменчивости).»[19]

«Опасные и вредные производственные факторы, обладающие свойствами психофизиологического воздействия на организм человека, подразделяют:
- на физические перегрузки, связанные с тяжестью трудового процесса:
- нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса.»[19]

«Нервно-психические перегрузки подразделяют на:
- умственное перенапряжение, в том числе вызванное информационной нагрузкой;
- перенапряжение анализаторов, в том числе вызванное информационной нагрузкой;

- монотонность труда, вызывающая монотонию;
- эмоциональные перегрузки.»[19]

4.2.1 Обеспечение электробезопасности

Оборудование, используемое в данной ВКР представляет собой ЭВМ. Питается ЭВМ от сети переменного тока напряжение 220 В 50 Гц с последующим преобразованием в 27 В. Данное устройство относится к классу электрооборудования до 1000 В и при его эксплуатации необходимо выполнять соответствующие требования правил устройства электроустановок. В соответствии с [20] электроустановкой считается - «совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другие виды энергии».

При эксплуатации используемого оборудования возможны повреждения изоляции токоведущих частей. В данном случае необходимо обеспечить меры защиты человека от непосредственного контакта с токоведущими частями. При возникновении неисправности рекомендуется отключение приемника электрической энергии от электрической сети. Также необходимо классифицировать помещение, в котором выполнялась работа. Согласно [20] по опасности поражения электрическим током помещения подразделяются на:

- помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия создающие повышенную опасность;
- помещения с повышенной опасностью, характеризующие наличием одного из следующих условий, создающих повышенную опасность:

а) сырость или токопроводящая пыль;

б) токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п);

в) высокая температура;

г) возможность одновременного прикосновения человека к металлоконструкциям зданий, имеющим соединение с землей, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования (открытым проводящим частям), с другой;

- особо опасные помещения, характеризующиеся наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность:

а) особая сырость;

б) химически активная или органическая среда;

в) одновременно два и более условий повышенной опасности;

г) территория открытых электроустановок в отношении опасности поражения людей электрическим током приравнивается к особо опасным помещениям. [20] Помещение используемое для выполнения ВКР соответствовала требованиям [20].

Все электроустановки заземлены в сети типа IT. На рисунке представлена (65) схема заземления IT.

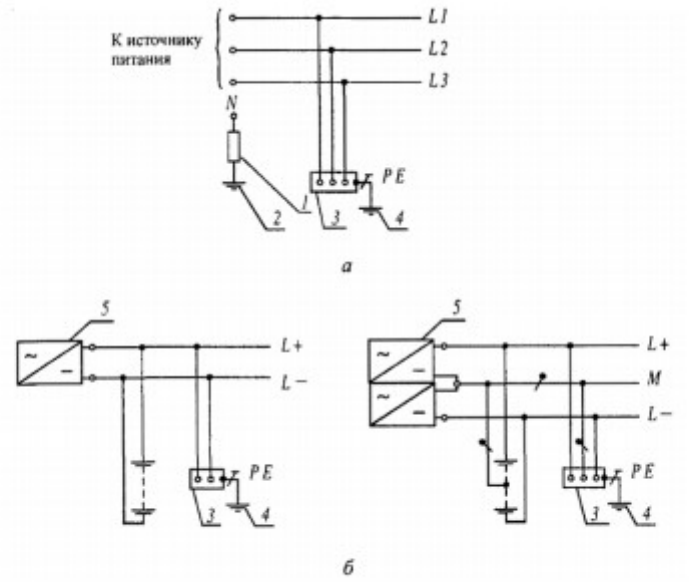

Рисунок 65 – Система IT а) переменного и б) постоянного тока

1 – сопротивление заземления нейтрали источника питания (если есть); 2- заземлитель; 3 - открытые проводящие части; 4 – заземляющее устройство электроустановки; 5 – источник питания. Согласно [БЖД 2], безопасность обслуживающего персонала и посторонних лиц должна осуществляться исполнением следующих мероприятий:

- соблюдение соответствующих расстояний до токоведущих частей или путем закрытия, ограждения токоведущих частей;
- применение блокировки аппаратов и ограждающих устройств для предотвращения ошибочных операций и доступа к токоведущим частям;
- применение предупреждающей сигнализации, надписей и плакатов; применение устройств для снижения напряженности электрических и магнитных полей до допустимых значений; использование средств защиты и приспособлений, в том числе для защиты от воздействия электрического и магнитного полей в электроустановках, в которых их напряженность превышает допустимые нормы.[20]

4.2.2 Обеспечение пожаробезопасности

В соответствии с [21] помещение, в котором проводилась разработка блока АФАР бортовой радиолокационной относится к категории Д, что означает помещение с пониженной пожароопасностью. Согласно [22] необходимо помнить, что «запрещается применять огнетушители с зарядом на водной основе для ликвидации пожаров оборудования, находящегося под электрическим напряжением, для тушения сильно нагретых или расплавленных веществ, а также веществ, вступающих с водой в химическую реакцию, которая сопровождается интенсивным выделением тепла и разбрызгиванием горючего [22]. Необходимо также помнить, что используемое электрооборудование должно быть безопасным с точки зрения

источника воспламенения пожароопасных и взрывоопасных веществ, а также защищено от их воздействия.

4.2.3 Классификация устройства по условиям эксплуатации

Также должны быть рассмотрены категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. Поскольку активная фазированная антенная решетка разрабатывалась для бортовой радиолокационной станции, а климатические условия, в которых будет использоваться БРЛС, определены как все климатические, то и активная фазированная антенная решетка тоже должна иметь все климатическое исполнение по[23].

4.2.4 Меры защиты от опасного воздействия СВЧ излучения

Так как разрабатываемое устройство это активная фазированная антенная решетка, работающая в СВЧ диапазоне, необходимо рассмотреть влияние СВЧ излучения на человека, а также рассмотреть меры защиты от его опасного воздействия. Исходя из расчетов произведенных с помощью алгоритма, написанного в среде MATLAB, известно, что максимальная излучаемая мощность составляет (56 дБ). Допустимыми уровнями плотности потока мощности являются:

- в быту: 10 мкВт/см2на расстоянии 50 см;
- на производстве: 25 мкВт/см2 на расстоянии 50 см.

Полученная мощность явно превосходит предельно допустимые значения, поэтому работа без специальной защиты рядом с работающей на передачу АФАР запрещена. Характер воздействия на человека СВЧ излучения зависит от следующих составляющих:

- удалённости от источника излучения и его интенсивности;
- продолжительности облучения;
- длины волны;
- вида излучения (непрерывное или импульсное);
- внешних условий;
- состояния организма.

Рассмотрим основные меры и средства защиты от вредоносного воздействия СВЧ излучения.

Основными мерами защиты от СВЧ излучения являются:

- уменьшение излучения в источнике;
- изменение его направленности;
- уменьшение времени воздействия;
- дистанционное управление излучающими устройствами;
- применение защитного экранирования.

Основными средствами защиты от СВЧ излучения можно считать:

- специальные костюмы;
- защитные очки, перчатки;
- защитные экраны.

При проведение отладки или при испытаниях режимов работы, при которых АФАР является передатчиком, необходимо использовать специальные помещения. Данные помещения должны быть полностью экранированы,

чтобы излучаемая СВЧ энергия не просачивалась за пределы. К тому же, так как испытания АФАР включают ряд антенных измерений, помещение должно отвечать требованиям предъявляемым к безэховости, то есть излучаемая мощность не должна отражаться от стен. Поэтому используют так называемые безэховые экранированные камеры (БЭК), сочетающие в себе выполнение обоих требований. На сегодняшний день существует множество радиопоглощающих материалов (РПМ), используемых в БЭК. Как правило, наиболее распространенное покрытие камер это решетки, составленные из определенного числа пирамид, состоящих из поглотителя. Каждая решетка может быть извлечена для удобного размещения оборудования. Обычная пирамида, как правило, состоит из резиноподобного материала, в состав которого в определенной пропорции входят графит и железо. Альтернативным вариантом РПМ являются плиты состоящие из феррита. Они плотно прилегают друг к другу по всей внутренней поверхности камеры. Из положительных сторон данной разновидности является то, что он занимает гораздо меньшую площадь, по сравнению с рупорами, а также он более долговечен. Отрицательными моментами являются его цена и меньшая эффективность на более высоких частотах. Основными параметрами БЭК являются:

- уровень безэховости;
- экранирование от внешних воздействий.

В среднем уровень безэховости составляет порядка -40 дБ, а экранирование от воздействия внешних факторов обеспечивает затухание порядка 60-120 дБ в диапазоне частот от 10 кГц и вплоть до 100 ГГц. Рассмотрим средства индивидуальной защиты. При отладке оборудования их использование считается обязательным и неукоснительным. К ним можно отнести экраны, представляющие собой металлические листы, а также, капюшоны, халаты, и комбинезоны, используемые для защиты тела. Выше перечисленная одежда изготавливается как правило из хлопчатобумажной металлосодержащей ткани. Для защиты глаз применяются радиозащитные очки, например, ОРЗ-5, стекла которых состоят из материала способного отражать электромагнитное излучение. При применении очков требуется обеспечить их плотное прилегание к коже лица. При испытании СВЧ устройств необходимо использовать по возможности дистанционное управление.

Бортовые радиолокационные станции с активными фазированными антенными решетками являются ближайшим будущим отечественных Воздушно-космических сил Российской Федерации. Их использование позволит решать спектр боевых задач за более короткое время. В данной выпускной квалификационной работе были разработаны основные узлы активной фазированной антенной решетки бортовой радиолокационной станции, а именно, антенная решетка, СВЧ тракт приемопередающего модуля, СВЧ распределительная система. Также был разработан алгоритм расчета коэффициентов амплитудно-фазового распределения необходимых для последующей записи в бортовую цифровую вычислительную машину. В результате разработки антенной решетки был получен излучатель, параметры которого позволили удовлетворить технические требования к разрабатываемому блоку, а также смоделирована антенная решетка круглой формы, благодаря чему были уменьшены габариты АФАР. Стоит отметить, что излучатель разработан полностью на отечественной элементной базе. Разработка СВЧ-тракта приемо-передающего модуля включала в себя выбор основных узлов отечественного производства таких как: циркулятор, выходной усилитель, предварительный усилитель, сложнофункциональная МИС, переключатель, малошумящий усилитель, ограничитель. К сожалению, габариты отечественных усилителей высокой мощности делают невозможным их использование в выходном каскаде усиления ППМ. Также отсутствуют и ограничители, служащие защитой для малошумящих усилителей. В итоге был разработан СВЧ тракт ППМ состоящий практически полностью из отечественных радиоэлектронных компонентов. Также была разработана СВЧ распределительная система, состоящая из делителей и СВЧ распределительной платы. При разработке использовались диэлектрики и резисторы только отечественного производства. В дополнение были разработаны корпуса для каждого из узлов СВЧ распределительной системы. Конструкторские решения, найденные в результате разработки, позволили получить выигрыш в габаритах разрабатываемого блока.

1. О.Г. Вендик, М.Д.Парнес. Антенны с электрическим сканированием. 2001. 252с.
2. Д.И. Воскресенский. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. М.: Радиотехника, 2012. 744с.
3. В.Л. Гостюхин, В.Н. Трусов, А.В. Гостюхин. Активные фазированные антенные решетки. М. :Радиотехника, 2011. 303с.
4. Конюшенко В.В. MATLAB Язык технических вычислений. Вычисление. Визуализация. Программирование. [Электронный ресурс]. Системные требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://old.exponenta.ru/educat/free/matlab/gs.pdf (дата обращения: 01.10.2016).
5. Б.А. Панченко, Е.И.Нефёдов. Микрополосковые антенны. М.: Радио и связь, 1986. 144с.
6. Р.С. Хансен. Фазированные антенные решетки, 2-е издание. М.: Техносфера, 2012. 560с.
7. Zhi Ning Chen, Michael Y.W. Chia. Broadband planar antennas. Wiley, 2006.260p.
8. Debatosh Guha, Yahia M.M. Antar. Microstrip and printed antennas. Wiley, 2011.- 506p.
9. Kin-Lu Wong. Compact and broadband microstrip antennas. Wiley, 2002.- 301p.
10. И.Н. Ростокин. Теория физических волн. Муром.: «ВлГУ», 2014. 119с.
11. Влияние поляризации зондирующего радиосигнала на эффективность выделения отклика надводной цели // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015,вып.(№)3. С. 140–152. 12. Проектирование полосковых устройств СВЧ. Ульяновск.: «УлГТУ», 2001. 123с.
13. Ю.Е. Мительман. Проектирование антенных систем в ANSOFT HFSS. Екатеринбург.: «УрФУ», 2012. 49с.
14. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск / В.Н. Тяпкин, А.Н. Фомин, Е.Н. Гарин, Ю.Л. Фатеев, В.П. Бердышев, А.А. Наговицын, А.В. Темеров, В.Г. Сомов, И.В. Лютиков. Красноярск.: «СФУ», 2011. 536с.
15. А.В. Вайсблат. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. М.: Радио и связь, 1987. 120с.
16. Карпов Ю. Отечественные транзисторные усилители СВЧ // Компоненты и технологии. 2007, вып.(№)1. С. 1-7.
17. Активные фазированные антенные решетки / В.Л. Гостюхин, В.Н. Трусов, К.Т. Климов, Ю.С. Данич. М.: Радио и связь, 1993. – 270 с.
18. Е.Е. Дмитриев. Основы моделирования в Microwave Office 2009.–2011. 175с.

19. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Стандартинформ, 2016.
20. Правила устройства электроустановок. 7 издание. 2009 - 220с.
21. Свод правил 12.13130.2009.Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: 2009.
22. ФЗ - 123 Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон [принят Гос. Думой 04.07.2008] 23. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М.: Стандартинформ, 2006.