

«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ:

Факультет	<u>И</u>	Заведующий кафедрой	<u>И1</u>
Выпускающая кафедра	<u>И 1</u>	<u>Борейшо А.С.</u>	<u>И1</u>
Группа	<u>И163</u>	Фамилия И.О.	подпись
		« 16 »	<u>июня</u> 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Ибрагимовой Яны Григорьевны

Фамилия, имя, отчество обучающегося

На тему Фотоприемный блок для высокочастотного оптоэлектронного
преобразования

Направление подготовки 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика
индекс направления полное наименование направления

Руководитель: _____
подпись

к.т.н., ст. преп. Ким А.А.
ученая степень, ученое звание Фамилия ИО
« 19 » июня 2020г.

Обучающийся: _____
подпись Ибрагимова Я.Г.
Фамилия ИО
« 19 » июня 2020 г.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Заведующий кафедрой И1

Борейшо А.С.

Фамилия ИО

подпись

« 27 » февраля

2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра

Обучающемуся
группы

И163

группа

Ибрагимовой Яне Григорьевне

Фамилия Имя Отчество

Направление
подготовки

12.03.03

индекс направления

Фотоника и оптоинформатика

наименование направления

Тема:

Фотоприемный блок для высокочастотного оптоэлектронного
преобразования

Исходная информация (общая постановка задачи):

Предложить реализацию фотоприемного блока для стенда верификации
радиолокаторов и конструкцию передающей антенны. Исполнение блока в
стандартном корпусе 19". Ширина полосы пропускания до 20ГГц. Длина волны
оптического излучения DWDM диапазона. Выходная мощность СВЧ-излучения до
10 мВт. Входящая пиковая мощность -30...-60 дБм.

Содержание выпускной квалификационной работы бакалавра:

Описание физических принципов работы РЛС и ФП. Классификация методов поверки
радиолокаторов. Расчет параметров и подбор элементной базы фотоприемного блока,
оценка надежности блока. Предложение конструкции фотоприемного блока.

Разработка модели передающей антенны. Выпуск конструкторской документации.

Иллюстративные материалы: изображения конструкции и ее элементов;

конструкторская документация, презентация.

Срок представления работы: «19» июня 2020 г.

Руководитель: _____

подпись

«27» февраля 2020 г.

Обучающийся: _____

подпись

«27» февраля 2020 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 81 страница, 37 рисунков, 8 таблиц, 48 формул и 41 использованный источник.

**ФОТОПРИЕМНИК, ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
ВЕРИФИКАЦИЯ, РАДИОЛОКАТОР, РАДИОФОТОНИКА**

Объектом исследования является фотоприемный блок для высокоточного оптоэлектронного преобразования.

Цель работы - предложение технической реализации фотоприемного блока для высокочастотного оптоэлектронного преобразования, входящего в стенд верификации эксплуатационных параметров радиолокаторов с применением элементов радиофотоники и оптоволоконной линий задержки.

В обзорно-теоретическом разделе приведены физические основы работы радиолокационных систем, классификация и основные параметры антенн; рассмотрена классификация и параметры фотоприемных устройств; приведены примеры реализации фотоприемных модулей в лидарном устройстве и в радиолокационном комплексе.

Аналитический раздел содержит формулировку цели выпускной квалификационной работы, постановку задач для ее достижения, анализ исходных данных.

В расчетном разделе приведены расчеты, формирующие требования к элементной базе проектируемого блока, а также оценку показателей надежности.

Конструкторский раздел содержит разработку модели платы управления и питания, расчет параметров и разработку модели передающей антенны, оценку потерь в коаксиальном кабеле; предложение реализации внутреннего устройства фотоприемного блока высокочастотного преобразования; выпуск сопровождающей конструкторской документации.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1 Аналитический раздел	10
1.1 Исходные данные	10
1.2 Формулирование цели и задач	10
2 Обзорно-теоретический раздел	10
2.1 Физические основы РЛС	12
2.1.1 Классификация приемо-передающих антенн	14
2.1.2 Эксплуатационные характеристики антенн	17
2.2 Методы верификации эксплуатационных параметров РЛС	19
2.2.1 Методы с применением имитаторов целей	20
2.2.2 Методы с использованием эталонных устройств	21
2.2.3 Трассовые методы	23
2.2.4 Концепция стенда для верификации радиолокаторов с применением оптического волокна и элементов радиофоники	23
2.3 Физические основы приемников оптического излучения	25
2.3.1 Классификация фотоприемников	26
2.3.1.1 PIN-фотодиод	29
2.3.1.2 Фотодиода с барьером Шоттки	30
2.3.1.3 Фотодиод с гетероструктурой	32
2.3.1.4 Лавинный фотодиод	33
2.3.2 Характеристики и параметры фотодиодов	34
2.4 Примеры использования фотоприемных модулей	40
2.4.1 Фотоприемный модуль лидара	40
2.4.2 Фотоприемник для радиолокационного комплекса	40
2.5 Выводы по обзорно-теоретическому разделу	41
3 Расчетный раздел	42
3.1 Разработка функциональной схемы фотоприемного блока	42

3.2	Формирование требований и подбор элементной базы.....	43
3.2.1	Фотоприемник.....	43
3.2.2	Маломощный усилитель.....	50
3.2.3	Блок питания.....	52
3.3	Расчет надежности модуля оптоэлектрического преобразования.....	53
3.4	Выводы по расчетному разделу.....	59
4	Конструкторско-технологический раздел.....	60
4.1	Модель платы управления и питания.....	60
4.2	Проектирование передающей антенны.....	61
4.3	Разработка и описание конструкции фотоприемного блока.....	68
4.4	Выводы по конструкторскому разделу.....	73
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	74
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	76
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	81

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

ДН – диаграмма направленности

МШУ – малозумящее устройство

п/п – полупроводник

ПОИ – приемник оптического излучения

РЛС – радиолокационная станция

СВЧ – сверхвысокая частота

ФД – фотодиод

ФП – фотоприемник

ЭМВ – электромагнитная волна

ВВЕДЕНИЕ

Долгое время единственным приемником оптического излучения являлся глаз человека. Однако с развитием науки и техники в 1800 году Уильямом Гершелем было открыто существование излучения на пределах видимого спектра, вследствие чего возникла необходимость регистрации данного излучения. В 1830 году появились первые приёмники для инфракрасного (ИК) излучения, основанные на принципе работы термопары, в 1880 году появились первые болометры. В начале XX века прогресс в науке позволил создать первые фотонные приемники, основанные на внутреннем фотоэффекте, что положило начало таким ПОИ (приемникам оптического излучения) как фотодиоды и фоторезисторы, которые в настоящее время используются во множестве технических устройств и приборов, предназначенных для применения в различных сферах.

Во второй половине XX века в результате слияние фотоники и электроники возникло новое направление техники – оптоэлектроника. В процессе развития и актуализации из этой отрасли выделились отдельные направления, одним из которых является радиофотоника [1]. Радиофотоника (в иностранной литературе radio over fiber (ROF)/ radio over glass (ROG)) – современное научное направление, изучающее взаимодействие излучения высокочастотного и оптического диапазонов, используя фотонику, полупроводниковую и радиоэлектронную технику. Преимуществами этой сферы являются высокая скорость передачи информации, малые потери, низкий уровень шума и помех, возможность расширить диапазон используемых частот.

Радиофотоника, как современное и активно развивающееся направление науки, может предложить новые пути решения актуальных технических проблем. Например, проблему отсутствия универсального метода верификации радиолокаторов.

За счет возможности удаленного контроля различных параметров исследуемого объекта метеорологические радиолокационные устройства широко применяются для решения многих задач: дистанционное зондирование атмосферы, измерение скорости и профиля ветра, фиксация опасных для полетов авиационных средств метеоявлений: микропорывов ветра или турбулентных вихрей. Однако, на сегодняшний день существует проблема поверки и верификации их технических и эксплуатационных параметров. Средой распространения излучения радиолокаторов является атмосфера, но создать эталонную трассу не представляется возможным, поскольку нельзя точно воссоздать необходимые параметры, точность которых в 3 и более раз превысила бы точность измеряемой величины. Использование сходных по принципу работы устройств и различных имитаторов целей также обладает рядом недостатков, таких как сложность метрологического обеспечения используемых технических средств, погрешности, вносимые отличиями в работе и оценка каких-либо конкретных параметров, в то время как при работе с атмосферными радарами требуется комплексное рассмотрение нескольких характеристик.

Используя средства радиофотоники, можно создать имитационную оптическую трассу, которая позволит многократно задавать параметры атмосферы и необходимой точностью. Одним из компонентов такой системы является фотоприемное устройство, осуществляющее оптоэлектронное преобразование получаемого с оптической несущей сигнала и передающее на выход устройства СВЧ-сигнал. Принцип работы данной системы будет рассмотрен в пункте 1.2.4.

Цель работы является предложения варианта технической реализации фотоприемного блока для высокочастотного оптоэлектронного преобразования, входящего в стенд верификации эксплуатационных параметров радиолокаторов с применением элементов радиофотоники и оптоволоконной линий задержки.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи, как:

- изучение принципов работы РЛС;
- классификация методов верификации РЛС;
- изучение принципов работы фотоприемников;
- подобрать элементную базу на основе проведенных расчетов;

1 Аналитический раздел

Постановка цели ВКР и формулирование задач для ее достижения выполняется согласно исходным данным, приведенным в тексте технического задания (ТЗ) на дипломный проект.

1.1 Исходные данные

Согласно ТЗ, исходными данными для разработки блока являются следующие параметры:

- рабочая частота 20 ГГц;
- длина волны оптического излучения DWDM диапазона (1535 нм);
- выходная мощность СВЧ-излучения до 10 мВт;
- входящая пиковая оптическая мощность -30..-60 дБм;
- оптический вход: одномодовое волокно SMF G-652;
- исполнение в 19” стандартном корпусе.

1.2 Формулирование цели и задач

Целью ВКР является предложение технической реализации фотоприемного блока для высокочастотного оптоэлектронного преобразования, входящего в стенд верификации эксплуатационных параметров радиолокаторов с применением элементов радиофотоники и оптоволоконной линий задержки.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- сформировать представление о типах фотоприемников на основе анализа их параметров и выбрать необходимый для применения в указанном спектре;
- сформировать требования к элементной базе блока на основании проведенного расчета параметров компонентов;
- разработать конструкцию передающей антенны;

- проанализировать коммерческий рынок и подобрать компоненты, удовлетворяющиеся требованиям, полученным в результате расчета;
- провести расчет надежности блока оптоэлектрического преобразования;
- предложить конструкцию модуля и выпустить конструкторскую документацию.

2 Обзорно-теоретический раздел

2.1 Физические основы РЛС

В современном мире обладание информацией является важным, а порой и решающим фактором во всех отраслях деятельности человека, и сейчас, в XXI веке важной стезей развития технологий является глобальный мониторинг – сбор информации в непрерывном режиме, вне зависимости от времени суток или внешних факторов. Наиболее распространенными средствами сбора информации являются радиолокационные станции (РЛС), базирующиеся на земле, в воздухе и в космосе, позволяющие получать визуальную и численную информацию о различных наблюдаемых объектах. В отличие от оптических систем (лидаров, профилометров ветра, облакомеров) радиолокаторы не привязаны к условиям видимости.

Принцип работы радиолокатора построен на рассеянии электромагнитных волн (ЭМВ) объектами с отличными от окружающей среды электрическими характеристиками. Вторичное поле, генерируемое в результате воздействия волны на объект, состоит из поля отражения, которое распространяется в сторону первичного поля, а также в «теневую» зону объекта [2]. Схематичная структура радиолокационного канала приведена на рисунке 1. Помимо объекта в состав канала входят фон, объекты-ориентиры с известными координатами (при необходимости) и источники помех, т.е. излучающие и переизлучающие объекты, вносящие избыточную информацию при регистрации сигнала от цели.

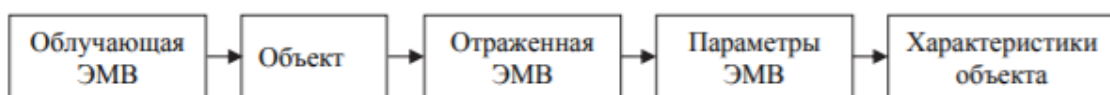


Рисунок 1 – Схема РЛС наблюдения [2]

РЛС характеризуется следующими параметрами:

- напряженность поля ЭМВ [В/м];

- вектор Пойнтинга $|\overline{E^2}|$ [Вт/м²];
- скорость света [м/с];
- несущая частота [Гц];
- начальная фаза колебаний φ_0 ;
- длина волны λ [м];
- поляризация;
- параметры модуляции напряженности и фазы волны.

Распространяющуюся по прямой ЭМВ можно направить в необходимом направлении при помощи радиолокационной антенны, таким образом можно измерим необходимые параметры отражающего объекта (дальность, высоту, угол, азимут). Однако, стоит учитывать коэффициент преломления среды, вносящий погрешности в результаты измерений.

Зачастую мощность приходящего сигнала мала, что объясняется большой дальностью до объекта, кроме того, сигнал является случайным из-за возникающих при отражении флуктуаций. Энергия излучаемого сигнала E_c определяется по формуле (1), энергия помехи E_n , спектральная плотность мощности которой определяют полосу частот ее воздействия – по формуле (2) [3].

$$E_c = P_c T_c, \tag{1}$$

$$E_n = P_n \Delta f, \tag{2}$$

где P_c – мощность сигнала, Вт;

T_c – время наблюдения, с;

P_n – мощность помехи, Вт;

Δf – полоса частот, Гц.

К достоинствам применения радаров относятся [4]:

- независимость работы от времени суток и погодных условий;

- широкая область видимости;
- возможно регистрации движущихся объектов;
- определение типа наблюдаемого объекта.

Простейшая РЛС состоит из приема-передающего узла и устройства преобразующего и усиливающего принимаемые сигналы, т.е. из источника, приемной антенны, радиоприемника-усилителя и выходного устройства.

2.1.1 Классификация приема-передающих антенн

В 1885 г. советским радиофизиком Александром Поповым была предложена концепция антенны как независимого элемента приемного/передающего устройства. Первой антенной являлся провод с заземлением, к которому при помощи зажимов присоединялся приемник и передатчик. Прогресс в изучении диапазона ЭВМ дал толчок для развития радиоволновой техники и, в частности, антенн.

Антенны, использующиеся в длинно-, средне- и коротковолновом диапазоне являются системами тонких проводов, линейный размер которых определяется относительно длины волны используемого диапазона.

Антеннам СВЧ-диапазона присущи следующие особенности:

- высокий уровень направленности излучения обеспечивается благодаря существенному преобладанию размера антенны над длиной волны;
- использование поверхностных токов;
- зачастую за преобразование тока в электромагнитную волну и формирование характеристики отвечают отдельные компоненты антенны [5].

Антенны ультракороткого диапазона волн подразделяются на проволочные, акустические, оптические, целевые, а также антенны поверхностных волн. Данные типы в свою очередь, имеют еще один уровень деления [5]. Структура такой классификации приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Классификация антенн ультракоротких волн [5]

Базовый элемент вибраторных антенны – симметричный $\lambda/2$ вибратор (рисунок 3).

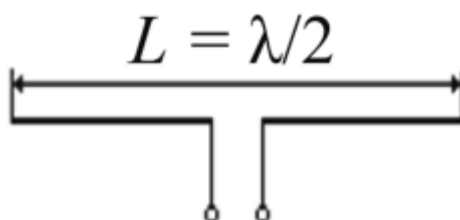


Рисунок 3 – Симметричный полуволновой вибратор [6]

В антенных решетках поперечного излучения максимум диаграммы направленности (ДН) либо составляет нормаль к плоскости решетки, либо отклонен от нормали на небольшой угол. При осевом излучении максимум ДН направлен вдоль линии, по которой расположены вибраторы.

Спиральные антенны могут быть цилиндрическими (рисунок 4), коническими, плоскими и с переменным углом намотки. Такие антенны имеют максимум излучения/приема, которые ориентирован вдоль оси спирали. Спиральные антенны обладают круговой поляризацией и имеют широкий диапазон излучения.

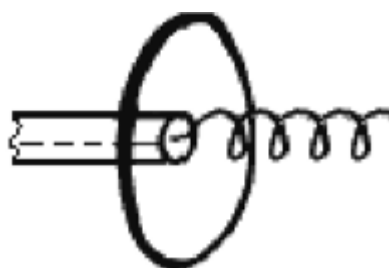


Рисунок 4 – Цилиндрическая спиральная антенна [6]

Проволочные антенны – антенны, состоящие из прямоугольных или изогнутых лент из металла или проводок малой толщины.

Волноводные излучатели представляют собой волновод с открытым окончанием круглой или прямоугольной формы. Волноводы обладают низким уровнем направленности, чтобы улучшить этот параметр, к концу волновода обычно прикрепляется рупор, тем самым, образуя рупорную антенну – наиболее простую с точки зрения конструкции, но в то же время характеризующуюся широкодиапазонностью.

Линзовые и зеркальные антенны образуют класс оптических антенн (рисунок 5), принцип действия которых основан на формировании линзой или зеркалом необходимой направленности посредством преобразования высокочастотного тока в электромагнитную волну. Благодаря возможности формирования характеристики направленности и механической прочности, зеркальные антенны получили широкое распространение в радиоастрономии и средствах космической связи.

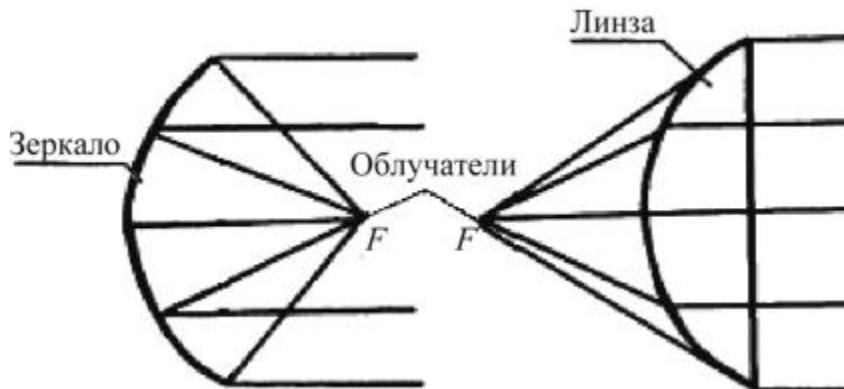


Рисунок 5 – Оптические антенны (слева – рефлекторная(зеркальная), справа – рефракционная(линзовая)) [6]

Щелевые антенны представляют собой волновод или коаксиальный кабель, в стенках которого расположена система $\lambda/2$ щелей, такие антенны также называются «дифракционными» и часто используются в составе бортовых радиоэлектронных средств.

Ключевым элементом антенн поверхностной волны является замедляющая система, за счет которой генерируется поверхностная волна и требуемая направленность.

Антенные решетки и антенны с обработкой сигнала являются сложными радиоэлектронными системами, использующими различные типы антенн.

Также классификация антенн может производиться относительно их рабочего диапазона, в таком случае выделяют следующие типы [6]:

- узкополосные антенны – антенны, работающие без перестройки в узкой полосе частот, т.к. их эксплуатационные параметры имеют сильную зависимость от частоты;
- широкодиапазонные антенны – антенны, работающие без перестройки в широком диапазоне частот, т.к. их зависимость от частоты ниже;
- частотонезависимые антенны.

2.1.2 Эксплуатационные характеристики антенн

Электромагнитная волна обеспечивает связи между передатчиком и приемником – промодулированный высокочастотный ток, проходящий на антенну, претерпевает преобразование в ЭМВ, а затем сфокусировано излучается в необходимом направлении посредством передающей антенны. Антенна приемника выполняет аналогичные обратные преобразования.

Зачастую требования к одним параметрам антенны являются противоречивыми по отношению к другим – например, уменьшение массогабаритных параметров сужает диапазон или коэффициент усиления, поэтому проектирование антенн строится на компромиссном подходе.

Относительно фидера приемная антенна представляет собой генератор колебаний высокой частоты, при этом его входное сопротивление равно входному сопротивлению антенны, если она будет работать в роли передающей. Передающая антенна в свою очередь является нагрузкой,

потребляющей мощность, относительно фидера. Стоит отметить, что часть мощности при этом рассеивается в виде тепла [7].

Первой задачей антенны является преобразование тока в свободную ЭМВ, из чего следует, что основными характеристиками передающей антенны является коэффициент полезного действия (КПД) η , активное сопротивление R_a и реактивное сопротивление X_a .

Вторая задача – распределение энергии излучаемых волн в пространстве. Для описания эффективности и свойств данного процесса использую диаграмму направленности (ДН) антенны, эффективную площадь излучения, а также коэффициенты усиления (КУ) и направленности действия (КНД).

Диаграмма направленности – визуальное отображение распределения уровней мощности излучения антенны на равном расстоянии от нее. Строиться ДН может в полярных, декартовых координатах или в обобщенном виде (рисунок 6).

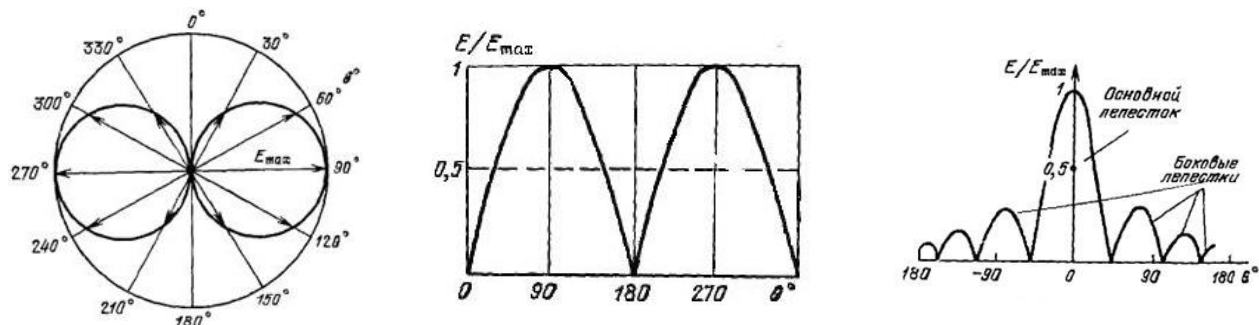


Рисунок 6 – ДН в различных координатных системах (полярные координаты; декартовы координаты; нормированная диаграмма) [7]

ДН делится на основной лепесток, которым является максимум, обладающий наибольшей высотой, и боковые лепестки, представляющие собой соседние максимумы. При формировании характеристики направленности антенны важно направить излучение в одну точку, тем самым увеличивая дальность работы и уменьшая рассеиваемую энергию.

ДН характеризуется углом раствора – углом главного лепестка, который находится между направлениями, в которых напряжение сигнала составляет 0,707 от максимального значения энергии сигнала E_{\max} .

В зависимости от базирования и задач РЛС, для достижения наилучшего результата могут быть использованы различные типы ДН, которые делятся согласно внешнему виду их лепестков. Выделяют игольчатую, веерную, косекансную и секторную ДН.

Коэффициент усиления G определяется как произведение КПД на КНД антенны, также он зависит от размеров излучающего отверстия и определяется по формуле (3) [3].

$$G=4\pi\frac{S_{\text{эфф}}}{\lambda^2}, \quad (3)$$

где $S_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь раскрытия, м²;

λ – длина волны, м.

КНД D в свою очередь определяется соотношением (4) [3]:

$$D=\frac{P_{\Sigma 0}}{P_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где $P_{\Sigma 0}$ – мощность, излучаемая антенной во всех направления, Вт;

P_{Σ} – мощность направленного излучения, Вт.

2.2 Методы верификации эксплуатационных параметров РЛС

Оценка эксплуатационных характеристик на предмет соответствия заявленным параметрам производится с учетом особенностей функционирования конкретной РЛС. В зависимости от типа радара, он может являться измерителем дальности до одного или нескольких удаленных объектов, по интенсивности отраженного сигнала от которых можно судить о размерах и свойствах объектов. О скорости приближения некоторого объекта

можно судить на основании данных радаров, использующих принцип измерения доплеровского смещения частоты. Более сложные в устройстве РЛС способны проводить классификацию типов цели в зависимости от ее вторичных параметров. Метеорологические радары являются профилометрами обратного атмосферного рассеяния в радиодиапазоне, они нацелены на обнаружение малых распределенных в атмосфере объектов, а также оценку их параметров [8].

На сегодняшний день существуют несколько методов верификации первичных, т.е. пространственно-временных параметров радиолокационных станций: трассовые методы, методы с использованием имитаторов целей, методы с применением эталонных устройств, а также методы, являющиеся комбинацией перечисленных ранее.

2.2.1 Методы с применением имитаторов целей

Базой данного метода, широко применяемого для поверки радаров, является особое устройство – имитатор цели. Оно осуществляет воздействие на зондирующий сигнал, согласно определенному закону, а затем переизлучает его в сторону поверяемого радиолокатора. Имитатором создаются необходимые программируемые параметры сигнала: временные задержки, временное уширение, амплитудное профилирование зондирующего импульса, его частотное смещение и т.д.

В работе [9] предлагается метод верификации метеорологического доплеровского радиолокатора профилей ветра (ДРПВ), заключающийся в следующем: ДРПВ и устройства переизлучения сигнала (УПС) стационарно устанавливаются на некотором расстоянии L друг от друга. Радиолокатор излучает зондирующий СВЧ-сигнал, направленный параллельно земле, с частотой f_0 на устройство переизлучения. УПС производит смещение частоты исходного сигнала на величину доплеровского сдвига, который соответствует сигналу, отраженному от движущихся с некоторой скоростью метеообразований, после чего смещенный сигнал переизлучается на ДРПВ

(рисунок 7). Радиолокатор регистрирует этот сигнал и определяет скорость ветра V_B , соответствующую данной величине сдвига (5) [9]:

$$V_B = \frac{F_{дN} \lambda}{2 \cos \alpha_N \cos \beta} \quad (5)$$

где $F_{дN}$ – доплеровская частота отраженного СВЧ сигнала;

λ – длина волны зондирующего СВЧ сигнала;

α_N – угол направления скорости ветра относительно направления на север;

β – угол места, под которым производится зондирование атмосферы.

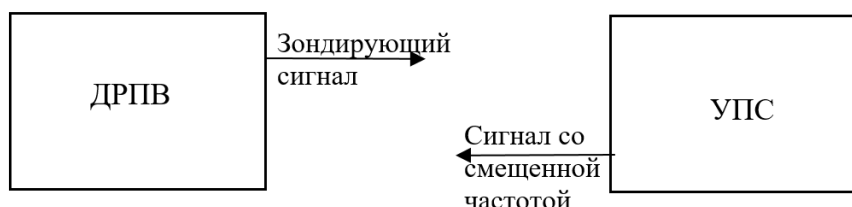


Рисунок 7 – Принцип верификации параметров ДРПВ с помощью УПС

Изменяя $F_{дN}$ на переизлучателе и останавливая локатор на определенных углах α_N , определяется точность измерения V_B , изменяя дистанцию между метеолокатором и УПС, проверяется точность измерения высоты, на которой измерялась V_B .

Использование имитаторов является сложным в реализации, а также обладает низким уровнем достоверности, хоть и позволяет имитировать различные параметры и не требует использования специализированной трассы.

2.2.2 Методы с использованием эталонных устройств

Методы верификации первичных эксплуатационных характеристик РЛС путем сравнения с эталонными измерителями можно считать самыми

простыми с точки зрения реализации, однако, согласно метрологическим правилам, эталонный измеритель должен обладать как минимум в 3 раза (чаще – в 10 раз) более высокой точностью по сравнению с поверяемым устройством. Способ оценки точности метеорологического ДРПВ, основывающийся на измерении скорости и направления ветра, который производится с помощью испытываемого ДРПВ и эталонного метеосредства (ЭМ), состоящего из пары аналогичных радиозондовых радиолокационных метеокомплексов (РРМК) с радиозондами (РЗ) описан в работе [10]. Полученная информация для каждой исследуемой высоты поступает на вычислитель, в котором оценивается насколько точными являются измерения ДРПВ. Использование в составе ЭМ двух РРМК обусловлено стремлением повысить точность метода (рисунок 8).

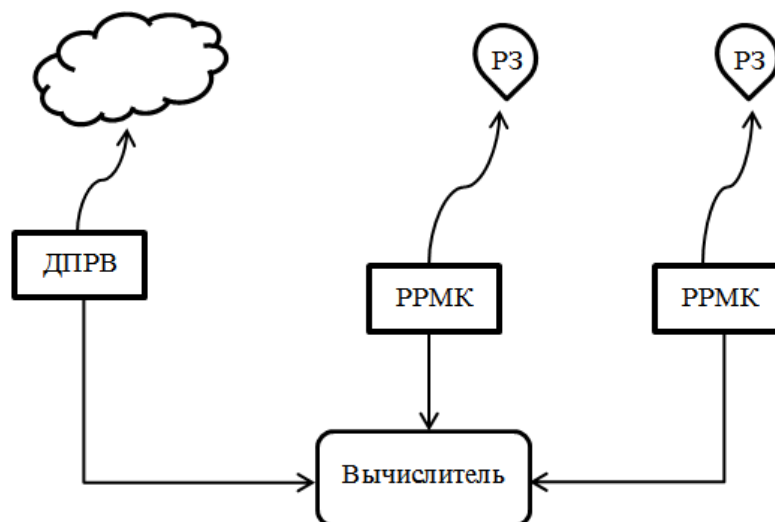


Рисунок 8 – Схема реализации метода оценки точности ДРПВ [10]

Использование радиозондового метеокомплекса ограничивается метеоусловиями, что затрудняет проведение испытаний. Кроме того, ДРПВ и РРМК не являются аналогичными по принципу работы устройствами, что не позволяет говорить о полной достоверности метода. Также не исключен и геометрический фактор, поскольку фактические замеры скорости ветра ДРПВ и РРМК происходят в разных точках пространства.

2.2.3 Трассовые методы

Для верификации характеристик РЛС, работающих в режиме измерения расстояний до объектов, обычно используются трассовые методы. К ним можно отнести те, в основе которых лежит использование реальной атмосферной трассы большой протяженности, содержащей один или несколько отражающих объектов, расположенных на известных расстояниях. Обычно для этих целей используются геодезические полигоны, содержащие эталонные базисы. Геодезический полигон – геодезическое построение, содержащее в себе систему геодезических пунктов, используемое для проведения испытаний и контрольно-поверочных мероприятий средств измерений. Полигон обладает определённой длиной и имеет несколько базисов, равноудалённых друг от друга. Верификация заключается в сравнении результатов измерений, полученных радаром, с соответствующими эталонными базисами, которые содержит полигон. Для контроля слепой зоны и пространственного разрешения могут использоваться мишени в ближней зоне, устанавливаемые на заданные расстояния.

2.2.4 Концепция стенда для верификации радиолокаторов с применением оптического волокна и элементов радиофотоники

Перспективным подходом для решения проблемы верификации радиолокаторов может стать применение элементов радиофотоники и оптоволоконных линий задержки. Основой метода является создание в оптоволоконной линии задержки временных интервалов, пропорциональных дальности до удалённых имитируемых объектов.

Суть метода заключается в следующем: излученный РЛС импульс переносится на оптическую несущую, после чего он поступает в имитационную оптоволоконную линию, по выходу из которой происходит обратное оптоэлектронное преобразование с последующим переизлучением

сигнала в апертуру РЛС [11]. Схема метода с выделенным разрабатываемым в данной работе фотоприемным модулем представлена на рисунке 9.

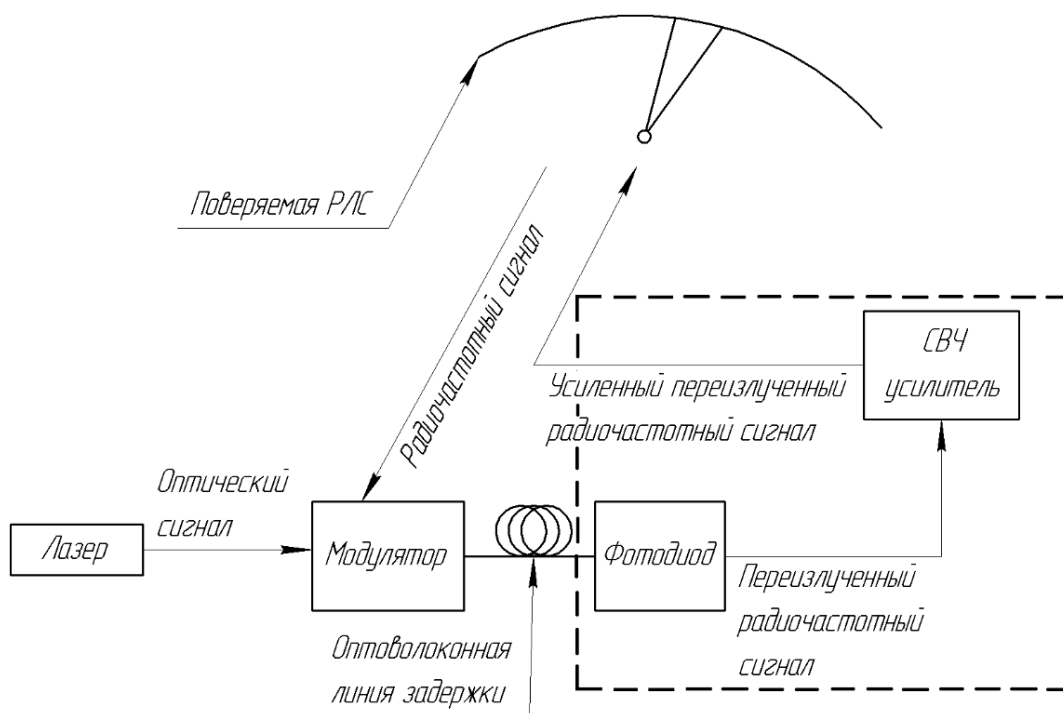


Рисунок 9 – Концепция метода верификации РЛС с использованием оптоволоконна и элементов радиофотоники

Для осуществления переноса радиосигнала на оптическую несущую необходимо принять и отвести часть излучения РЛС рупорной или иной антенной, установленной в непосредственной близости от РЛС. Полученный с приемной антенны электрический сигнал будет модулировать оптическую несущую, в качестве которой целесообразно использовать излучение лазера с длиной волны 1550 нм, поскольку в кварцевых оптических волокнах для такой длины волны излучения наблюдаются наименьшие затухания. Амплитудная модуляция излучения лазера производится посредством электрооптического модулятора (ЭОМ) на основе интерферометра Маха-Цендера, выполненного на кристалле LiNbO_3 или InP .

Промодулированное СВЧ-сигналом оптическое излучение подается в оптоволоконную линию задержки, содержащую линейные и ответвляющие элементы. Для имитации атмосферной трассы, содержащей множество

отражающих объектов, может быть использована последовательная, циклическая или зеркальная схема организации имитационной линии. Изменяя длины оптических волокон в составе имитационной линии и используя различные структуры, можно реализовать требуемые пространственно-временные характеристики имитируемой трассы.

Для обратного оптоэлектронного преобразования требуется фотоприемный модуль. Выход имитационной оптоволоконной линии подключается к высокочастотному фотоприемнику, в котором происходит оптоэлектронное преобразование, и выделенный СВЧ-сигнал после усиления направляется на контролируемый радар методом антенного переизлучения или подключения непосредственно к приемному СВЧ тракту.

2.3 Физические основы приемников оптического излучения

Фотоприемник (ФП) – это оптоэлектронный прибор, предназначенный для приема и преобразования энергии оптического излучения в какие-либо другие виды энергии или в оптическое излучение другого диапазона. Фотоприемник является одним из ключевых компонентов системы демодуляции и обработки сигнала оптического диапазона [12].

Общий вид фотоприемного устройства приведен на рисунке 10.

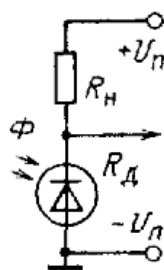


Рисунок 10 – Общий вид ФП (R_n – сопротивление нагрузки, R_d – сопротивление диода, U – напряжение источника питания) [12]

2.3.1 Классификация фотоприемников

По механизму преобразования энергии фотоприемники делятся на 3 типа:

- фотоэлектрические;
- фотохимические;
- тепловые.

Тепловые фотоприемники преобразуют оптическую энергию сначала в тепловую, затем в электрическую, фотохимические – в энергию химических реакций, но для радиофотоники наибольший интерес представляют фотоэлектрические приемники, работа которых основана на внутреннем и внешнем фотоэффекте. Внешний фотоэффект или фотоэлектрическая эмиссия – «выбивание» электронов с поверхности фоточувствительного слоя под действием падающего потока излучения, внутренний фотоэффект – перераспределения электронов по энергетическим состояниям в полупроводниках (п/п) и диэлектриках, также обусловленное воздействием падающего потока излучения. В процессе фотоэффекта изменяется концентрация носителей зарядов в среде, что приводит к появлению фотопроводимости и фотогальванического эффекта.

- Фотопроводимость – увеличение или уменьшение электропроводимости проводимости вещества за счет образования дополнительных носителей под действием излучения оптического диапазона (на этом эффекте основана работа фоторезисторов);

- Фотогальванический эффект – возникновение при воздействии света на структуре с встроенным потенциальным барьером фото-ЭДС.

В ВОЛС задачей фотодетектора является преобразование оптического излучения на входе в электрический ток на выходе, впоследствии полученный сигнал усиливается и обрабатывается микросхемами ФП. Для корректной работы в устройства необходимо, чтобы фотоприемный модуль достоверно воспроизводил форму приходящего сигнала, при этом не создавая

дополнительные шумы. Таким образом, фотодетектор должен соответствовать следующим требованиям:

- высокая чувствительность на рабочей длины волны;
- широкополосность;
- большой динамический диапазон;
- малый уровень шума;
- устойчивость к изменениям параметров окружающей среды;
- высокая надежность;
- малые габариты;
- долговечность.

Наиболее отвечающим данным требованиям являются полупроводниковые фотодиоды (ФД). Оптоэлектрическое преобразование обеспечивает возможность проводить последующую обработку информации при помощи электронных схем, возможности которых определяются соотношением сигнал/шуму на входе электрического тракта, расположенного за фотоприемником. Полупроводниковые фотоприемники работают на двух видах фотоэффекта, как было сказано выше.

На эффекте фотопроводимости работают фоторезисторы, на фотогальваническом эффекте – фотодиоды. Кроме того, на внешнем фотоэффекте основана работа вакуумных фотоэлементов – фотоэлементов, в которых падающий на катод свет вызывает эмиссию электронов.

Фотодиоды, в свою очередь, разделяются на следующие:

- PIN-фотодиоды;
- фотодиоды с барьером Шоттки;
- гетерофотодиоды;
- лавинные фотодиоды.

Работа фотодиодов основана на эффекте генерации электронно-дырочных пар (ЭДП) при попадании кванта света $h\nu$ (h – постоянная Планка, ν – частота излучения) на фоточувствительную область. Это обусловлено

процессами, происходящими в р-п переходе, а именно дрейфом основных и неосновных носителей.

В состоянии равновесия по обе стороны от р-п-перехода существует обедненный слой – слой, в котором недостает свободных носителей заряда. Для обеих областей уровень Ферми находится на одной высоте. Область «дырок» содержит в себе акцепторные примеси, на которые под действием температуры перемещаются электроны из валентной зоны, в то время как зона электронной проводимости содержит донорные уровни, которые отдают свои электроны. В связи с наличием в полупроводнике внутреннего электрического поля, в переходе поддерживается состояние равновесия, это поле образует потенциальный барьер, препятствующий диффузии основных носителей в обедненный слой, также оно определяет ток, идущий через диод. Ток основных носителей, обладающих достаточной для преодоления потенциального барьера тепловой энергией, компенсируется током неосновных носителей, которые, в свою очередь, движутся через обедненный слой под воздействием электрического поля. Процесс р-п перехода изображен на рисунке 11.

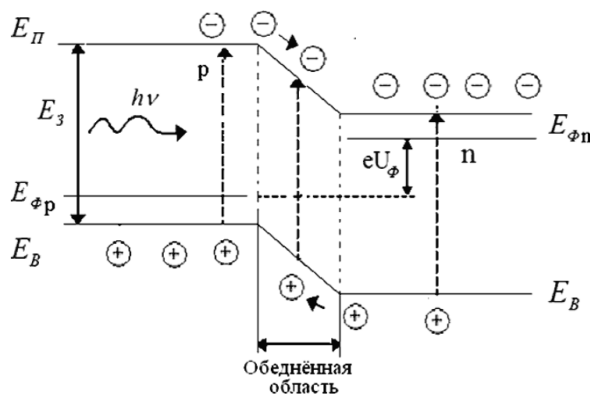


Рисунок 11 – Переход электронов из валентной зоны в зону проводимости

[13]

При воздействии потока излучения в полупроводнике генерируются пары носителей электрон-дырка. При этом в р- и п- областях возникающие носители рекомбинируют между собой, сохраняя равновесие, а в обедненном слое носители разделяются: основные носители не могут пересечь

потенциальный барьер, таким образом, электроны остаются в n-области, дырки – в p-области, неосновные же пересекают p-n переход, их концентрация возрастает, что нарушает состояние равновесия, уровни Ферми сдвигается, потенциальный барьер уменьшается.

В настоящее время основными материалами для изготовления фотодиодов служат Ge, Si, InSb, GaAs, GaP, а также тройные соединения, например GaAsP, GaAlAs, GaInP, HgCdTe.

2.3.1.1 PIN-фотодиод

Pin-фотодиод представляет собой трехслойную структуру, в которой между p- и n- слоем располагается слаболегированный слой небольшой толщины с собственной проводимостью. Благодаря подобному строению на поверхности i-слоя формируется тонкий высоколегированный p-слой, практически полностью пропускающий воздействующее излучение. Т.к. распространение обедненного слоя пропорционально его удельному сопротивлению, этот слой расширяется на границах p- и i-, n- и i- слоев. Обедненная область распространяется на весь i-слой, поэтому его величина выбирается таким образом, чтобы обеспечить практически полное поглощение падающего излучение. На рисунке 12 изображен типичный pin-фотодиод.

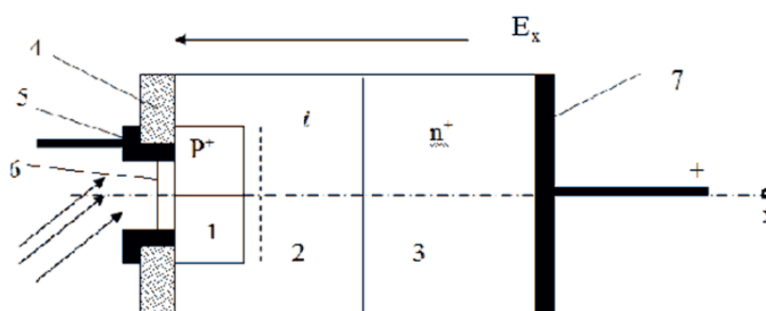


Рисунок 12 – Строение pin-фотодиода (1 – p-полупроводник, 2 – i-полупроводник, 3 – n-полупроводник, 4 – изолятор SiO₂, 5 – отрицательный контакт, 6 – просветляющее покрытие, 7 – положительный контакт) [13]

За счет своей структура PIN-фотодиода обладает следующими достоинствами:

- значение чувствительности близко к теоретическому пределу;
- высокое быстродействие;
- малая барьерная емкость.

В то же время их недостатками являются:

- невысокая чувствительность в диапазоне коротких волн, обусловленная сильным поглощением в приповерхностном слое;
- нулевая чувствительность к излучению, длина волны которого превышает значение, определяемое шириной запрещенной зоны.

Как правило, для применения в СВЧ-технике используются именно PIN-фотодиоды, поскольку на высоких частотах данный тип диодов обладает линейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) даже при больших значениях напряжения.

2.3.1.2 Фотодиода с барьером Шоттки

В отличие от PIN-фотодиодов, в поверхностно-барьерных фотодиодах (ПБФД) – фотодиодах Шоттки потенциальный барьер создается на поверхности проводника при контакте с определенными металлами. Контакт уровня Ферми возможен с полупроводниками p- и n- типов, в зависимости от его расположения в металле.

Если осуществляется контакт с полупроводником p-типа (рисунок 13), то часть электронов перемещается из металла в дырочную область полупроводника. Таким образом происходит дополнительная рекомбинация на границе металла и полупроводника, приводящая к созданию электрического поля, которое мешает последующему переходу электронов, и установление равновесия в области перехода.

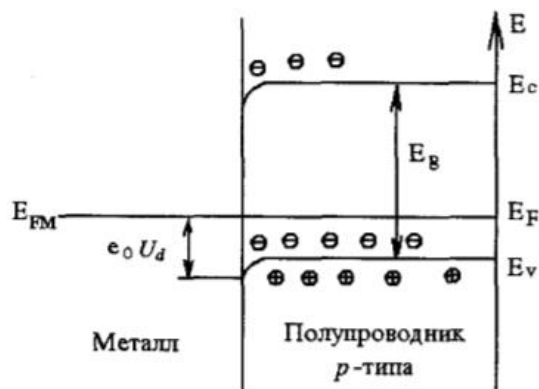


Рисунок 13 – Полупроводник p-типа [13]

Металл при контакте с полупроводниками n-типа (рисунок 14) получает из него часть электронов, а около границы металл-полупроводник создается объемный заряд положительных ионов-доноров, мешающий переносу электронов и создающий равновесный потенциал.

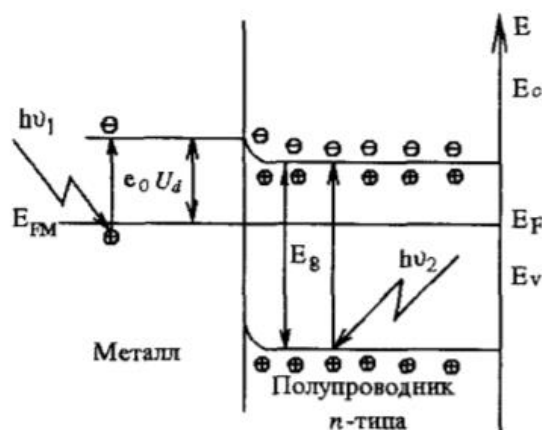


Рисунок 14 – Полупроводник n-типа [13]

Потенциальный барьер в приповерхностном слое, представляющий собой аналог p-n переходного барьера – барьер Шоттки $e_0 U_d$. В фотодиодах Шоттки фототок образуется из-за межзонных переходов в п/п и за счет фотоэмиссии электронов через потенциальный барьер.

К достоинствам ПБФД можно отнести следующие свойства:

- широкая спектральная характеристика, которая обеспечивается смещением коротковолновой и длинноволновой границ фотоэффекта;

- малая постоянная времени;
- быстродействие ФД зависит только от времени пролета носителей заряда сквозь область объемного заряда, которое составляет порядка 10^{-10} с;
- высокая чувствительность, большая квантовая эффективность, низкий темновой ток.

2.3.1.3 Фотодиод с гетероструктурой

Гетерофотодиоды отличаются тем, что в них используются два типа п/п с различной шириной запрещенной зоны (рисунок 15). В балансном состоянии энергии уровней Ферми одинаковы для всех областей, по обеим сторонам от границ N-p и p-P создается объемный заряд, изгибающий энергетические зоны. Разница работ выхода на границах раздела вызывает разрывы зоны проводимости и валентной зоны.

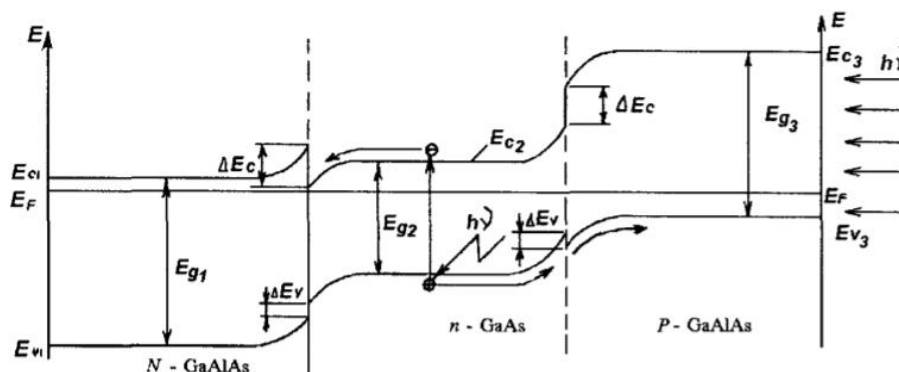


Рисунок 15 – Полупроводник с гетероструктурой [13]

Сложная структура таких фотодиодов обладает двумя особенностями:

- односторонняя инжекция – скачок потенциала на границе n-P перехода, представляющий собой барьер для дырок в n-области. Другой барьер создается на границе N-p и блокирует выход электронов из этой области, локализуя их и увеличивая быстродействие ФД;
- наличие широкозонного «окна пропускания», через которое излучение проходит почти не поглощаясь. Это свойство обусловлено тем, что

длина волны поглощаемого излучения в n-области находится правее красной границы поглощения в Р-области.

Главным достоинством фотодиодов с гетероструктурой является возможность выбора полупроводниковых материалов активной области, что позволяет добиться высокого быстродействия, практически полной квантовой эффективности, повышенного значения ЭДС, уменьшения темных токов и расширения термического диапазона.

2.3.1.4 Лавинный фотодиод

Структурное строение лавинного фотодиода представлено на рисунке 16.

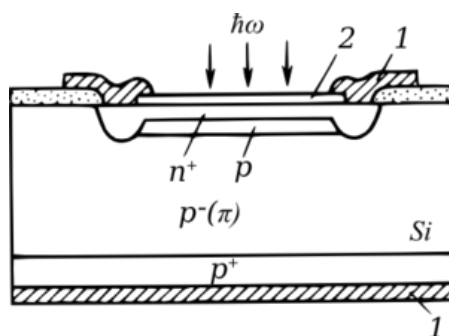


Рисунок 16 – Сечение лавинного фотодиода [13]

Принцип действия лавинных фотодиодов (ЛФД) построен на эффекте лавинного умножения носителей в сильной электрическом поле.

Лавинное умножение происходит следующим образом: свободные носители заряда в п/п в результате воздействия на них электрического поля получают ускорение и достигают величины энергии, которая является достаточной для перехода электрона в зону проводимости. Величина поля при этом связана с шириной запрещенной зоны.

Пороговая энергия, требуемая для ионизации $E_{пор}$ зависит от температуры, вида зонной структуры и энергии запрещенной зоны E_g . Лавинное умножение носителей определяется коэффициентами ионизации α_n и α_p для электронов и дырок соответственно (они зависят от материала, напряженности и направления поля). Эти коэффициенты являются

величинами, обратными расстояниям, которые носители заряда должны преодолеть в электрическом поле до следующего ионизационного столкновения. Образующаяся в результате столкновения новая пара носителей зарядов также участвует в процессе ионизации, создавая лавинное умножение.

Структурно ЛФД значительно сложнее, нежели PIN-фотодиоды. Для обеспечения условий лавинного умножения носителей заряда необходимо увеличение ширины обеднённой зоны. Высокое прикладываемое напряжение и сильные токи ведут к нагреву полупроводника, что вызывает увеличение темнового тока и уменьшение фототока (электрический пробой переходит в тепловой). Кроме того, процесс лавинного умножения является случайным процессом, что вносит дополнительные шумы. Коэффициент лавинного умножения зависит от напряжения, поэтому при использовании ЛФД необходимо использовать высокостабильное напряжение. Однако, лавинные фотодиоды превосходят pin-фотодиоды по параметру чувствительности.

2.3.2 Характеристики и параметры фотодиодов

Чтобы получить полное представление о компоненте необходимо учитывать его характеристики и параметры в широком рабочем диапазоне частот.

Спектральная характеристика ФД вычисляется по формуле (6) [13]:

$$S(\lambda) = \frac{\Delta I_{\Phi}(\lambda)}{\Delta \Phi_{\lambda}} = \frac{e_0 \eta_{\Phi} (1 - R_{\text{отр}}) \lambda}{hc} \exp\left(-\frac{x}{\chi_0}\right), \quad (6)$$

где I_{Φ} – фототок, А;

Φ_{λ} – чувствительность, Вт;

e_0 – заряд электрона, Кл;

$R_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения.

h – постоянная Планка, м²кг/с

c – скорость света, м/с;

λ – длина волны, нм;

x – координата;

χ – глубина поглощения, м.

Спектральная чувствительность характеризуется двумя величинами:

- Характеристикой относительной спектральной чувствительности (7) [13]:

$$S_{\text{отн}}(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{S_{\lambda_{\text{max}}}} \quad (7)$$

- Абсолютной величиной спектральной чувствительности при длине волны, соответствующей ее максимуму (8) [13]:

$$S_{\lambda_{\text{max}}} = S(\lambda = \lambda_{\text{max}}) \quad (8)$$

При увеличении температуры происходит сдвиг характеристик спектральной чувствительности в диапазон более длинных волн, поэтому вводится температурный коэффициент фототока k_{ϕ} вычисляемый по формуле (9) [13]:

$$k_{\phi} = \frac{1}{I_{\phi}} \quad (9)$$

Квантовая эффективность (выход) η – отношение числа рождающихся в секунду электронов $N_{\text{э}}$ к числу фотонов N_{ϕ} , падающих на фотодиод (10) [13]:

$$\eta_{\text{out}} = \frac{N_{\text{э}}}{N_{\phi}} = \frac{I_{\phi}/e}{P/h\nu} = \frac{I_{\phi}h\nu}{eP}, \quad (10)$$

где P – мощность оптического излучения, Вт.

Быстродействие цепей с фотодиодом зависит от собственной емкости фотодиода, паразитной емкости и сопротивление внешней цепи, при этом емкость ФД зависит от приложенного к нему напряжения.

Граничная частота передачи $f_{гр}$ определяется по формуле (11) [13]:

$$f_{гр} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi(C_{ФД} + C_{ВХ})R_{ВХ}} \quad (11)$$

где τ – постоянная времени;

$C_{ФД}$ – емкость ФД;

$C_{ВХ}$ – паразитная емкость;

$R_{ВХ}$ – активная составляющая сопротивления входной цепи.

Амплитудно-частотная характеристика определяется из выражения (12) [13]:

$$U(f) = S_{\lambda} \Phi_{\lambda} R_{ВХ} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{гр}}\right)^2}} \quad (12)$$

где f – частота модуляции потока излучения Φ_{λ} .

Шумовые параметры:

Шум – электрическое или оптическое возмущение, отличное от полезного сигнала. Шум – эффект, от которого невозможно полностью избавиться, при этом он значительно ограничивает чувствительность детектора. Работа ФП основана на генерации электрического тока, вызываемой воздействующими фотонами. Для корректной работы приемник должен регистрировать очень слабый по величине оптический сигнал и генерировать электрический ток значительной величины. Сигнал является полезной информацией, а шум же вносит дополнительную бесполезную составляющую. Несмотря шум присутствует во всех частях коммуникационной системы, особенно важен его уровень на входе в приёмное устройство. Причина в том, что детектор работает со слабым сигналом,

потерявшим свою первоначальную мощность при передаче. Поэтому шум становится заметным на фоне слабого сигнала. Шум, имеющий такой же уровень, в передающем устройстве не столь заметен, поскольку здесь уровень сигнала намного выше. Шум оказывает существенное влияние на порог чувствительности детекторов. Слишком слабый оптический сигнал невозможно различить на фоне шума, для этого необходимо либо уменьшить уровень шума, либо усилить сигнал. В процессе усиления в приёмном устройстве усиливается не только сигнал, но и шум. Некоторые виды шума можно отфильтровать с помощью электронных фильтров.

Различают следующие виды шумов:

- Напряжение/ ток шума $U_{ш}/I_{ш}$ – среднеквадратичное значение флуктуации напряжения/тока в цепи ФП в указанной полосе частот;

- Дробовой шум – шум, вызванный тем, что электрический ток является потоком частиц, флуктуирующих во времени. Спектральная плотность дробового шума определяется из уравнения (13) [14]:

–

$$(I_{шт}^*)^2 = 2e_0(I_{ф}+I_0)\Delta f \quad (13)$$

где Δf – полоса частот.

- Радиационный (фотонный) шум – шум, вызванный флуктуациями потока квантов, падающих на фотоприемную площадку, и флуктуациями потока квантов, излучаемых в пространство самим фотоприемником;

- Тепловой шум (шум Джонсона) – шум, вызванный флуктуациями электронов под действием теплового возбуждения, его спектральная плотность определяется из (14) [14]:

–

$$(I_{шт}^*)^2 = 4kT\Delta f/R_{ФД}, \quad (14)$$

где k – постоянная Больцмана, Дж/К;

T – температура, К;

$R_{\text{ФД}}$ – сопротивление нагрузки ФД, Ом.

– Токовый шум – несколько видов шума, зависящих от состояния поверхности и технологии изготовления фоточувствительного слоя, а также от контактов и токов утечки;

– Генерационно-рекомбинационные шумы $I_{\text{шгр}}^*$ – шумы, проявляющиеся только на низких частотах.

Шумы отдельных источников, как правило, независимы, тогда общий шумовой ток, являющийся определяющим обнаружительную способность D^* , определяется по формуле (15) [14]:

$$(I_{\text{ш}}^*)^2 = (I_{\text{шд}}^*)^2 + (I_{\text{шт}}^*)^2 + (I_{\text{шгр}}^*)^2 \quad (15)$$

Главным источником шума является дробовой шум, который определяется темновым током I_0 , тогда формулу для обнаружительной способности можно записать так (16) [14]:

$$D^* = \sqrt{AS} \sqrt{\Delta f} / \sqrt{2e_0 I_0 \Delta f}, \quad (16)$$

где A – площадь чувствительного элемента.

Тип фотодиода, длина волны и температура определяет его обнаружительную способность, которая находится в диапазоне от 10^{10} до 10^{13} см $\sqrt{\text{Гц/Вт}}$. Максимум D^* соответствует длине волны, на которой наблюдается максимум спектральной характеристики. Как правило, фотодиоды работают на нагрузку r_v , вносящую дополнительный шум, так как сопротивление нагрузки $R_{\text{вх}}$ включено последовательно, то спектральная плотность шума равна (17) [14]:

$$(I_{шR}^*)^2 = 4kT\Delta f/(R_{\Phi Д} + r_v) \quad (17)$$

Сопротивление нагрузки дает меньше шума при условии (18) [14]:

$$R_{вх} > \frac{4kT}{A} \left(\frac{D^*}{S} \right)^2 \quad (18)$$

Чтобы увеличить обнаружительную способность фотоприемника, нужно увеличить сопротивление нагрузки, но в то же время это может повлечь за собой спад частотных характеристик из-за возрастания постоянной времени, поэтому выбор значения $R_{вх}$ должен быть найден компромисс между высокой частотой и малым шумом.

Одной из важнейших характеристик фотоприемника является величина отношения сигнала к шуму на выходе (SNR), которая оценивается по следующей формуле (19) [14]:

$$SNR = \frac{\langle I_{\phi}^2 \rangle M^2}{2e(I_p + I_D)M^2 F(M)B + 2eI_L B + 4kTB/R} \quad (19)$$

Для вычисления SNR берется среднестатистическое среднее по времени регистрации сигнала значение I_{ϕ} .

M – коэффициент лавинного умножения (для pin-фотодиодов он равен 1), I_p – постоянная составляющая первичного фототока, I_D – первичный темновой ток, $F(M) = M^x$ – функция, описывающая свойства материала ЛФД ($|x| \leq 1$), B – ширина полосы регистрируемых частот.

Знаменатель формулы содержит среднеквадратическое значение квантового шума (шум Шоттки, дробовой и генерационно-рекомбинационный шум), шумы объемного тока, среднеквадратичное значение поверхностного шума утечки и среднеквадратичное значение теплового шума (шум Джонсона или Найквиста) [14].

2.4 Примеры использования фотоприемных модулей

2.4.1 Фотоприемный модуль лидара

В лидарных комплексах в качестве фотоприемника может быть использован фотоэлектронный умножитель, как в работе [15].

Лидарный комплекс, предназначенный для зондирования атмосферы, посылает импульсное излучение. Рассеянное от мелких частиц атмосферы излучение попадает на приемные телескопы, затем регистрируется фотоприемниками, проходит оцифровку и дальнейшую обработку сигнала с целью получения информации. В описываемом устройстве были предусмотрены два режима работы ФП – аналоговый и счетно-фотонный.

Фотоприемный модуль, регистрирующий подаваемые на него импульсы 532 нм, выполнен на основе фотоэлектронного умножителя ФЭУ-84 и рассчитан на работу в условиях сильной засветки. Для питания модуля используется источник питания на 24 В, преобразователь через трансформатор подает напряжение на многокаскадный умножитель напряжения, что формирует постоянное напряжение на динодах. При помощи подачи запирающего напряжения на модулятор обеспечивается стабильная работа ФП. Поскольку в данной работе используется лазер, излучающий на двух длинах волн (532 нм и 1064 нм), то предусмотрена еще одна часть фотоприемного модуля, регистрирующая излучение 1064 нм. В его состав входит лавинный фотодиод, микрохолодильник и усилитель.

2.4.2 Фотоприемник для радиолокационного комплекса

В работе [16] рассматривается радиофотонная компонентная база для построения активных фазированных антенных решеток (АФАР) для радиолокационного комплекса. Элементы крупноапертурных АФАР радиолокаторов должны удовлетворять высоким требованиям к своим параметрам, обеспечивая необходимый уровень точности и разрешающей способности. Приемный узел должен обладать высокой чувствительностью,

данное требование влечет за собой высокие требования к динамическому диапазону, точности управления значениями амплитуды и фазы, частотную и термическую стабильность. Обеспечивая вышеперечисленные условия с помощью элементов радиофотоники, необходимо использовать элементную базу с определенным набором параметров. Так, в данной работе выставлялись следующие требования к фотоприемному устройству: рабочая полоса частот до 20 ГГц, чувствительностью не менее 0.8 А/Вт, выходная мощность малошумящего усилителя до 10 мВт.

В качестве подходящих фотодетекторов использовались ИК фотодиодный модуль ИФПМ 1-10, работающий на 1200-1620 нм. Данный модуль обладает низким значением шумов, низким темновым током и широкой рабочей полосой частот. Вторым фотоприемником выступал широкополосный микроволновый InGaAs PIN-фотоприёмник ДФДМШ40-16. Данный ФП имеет низкое обратное отражение, а особая конструкция позволяет вводить излучение через подложку. Оба фотоприемных модуля используют одномодовое волокно.

2.5 Выводы по обзорно-теоретическому разделу

В разделе 1 были рассмотрены физические принципы радиолокационных станций, в частности, классификация и характеристики антенн, как одного из основных компонентов РЛС. Были рассмотрены и проанализированы методы поверки первичных параметров радаров, применяемые сегодня, а также предложена концепция нового метода. Был проведен анализ различных видов фотоприемников, выделены преимущества и недостатки каждого из них, и сделан вывод о том, что в аспекте методологии верификации радиолокаторов оптимальным решением для базового элемента фотоприемного устройства будет PIN-фотодиод.

3 Расчетный раздел

В настоящем разделе приведены расчет основных параметров фотоприемного блока высокочастотного оптоэлектрического преобразования, подбор компонентой базы на основе полученных результатов, а также оценка параметров надежности блока.

3.1 Разработка функциональной схемы фотоприемного блока

Основой блока высокочастотно оптоэлектрического преобразования является фотоприемное устройство, построенное на базе PIN-фотодиода. Через FC/APC разъем ФП подключается к оптоволоконной линии задержки, из которой поступает сигнал, через разъем SMA к фотодетектору подключается малошумящий усилитель с переменным коэффициентом усиления выходного электрического сигнала. Усилитель, в свою очередь, при помощи SMA разъема соединяется с внешней антенной.

Плата управления и питания управляется с внешнего контроллера через разъем RS232, задавая значение коэффициента усиления МШУ. Питание всех элементов модуля осуществляется при помощи блока питания, питающегося от внешнего напряжения в 220 В.

Главной задачей проектирования модуля ОЭП является подбор фотоприемника, удовлетворяющего высоким требованиям к его шумовым характеристикам, подходящего для работы с импульсными сигналами.

Функциональная схема оптоэлектрического модуля приведена на рисунке 17.

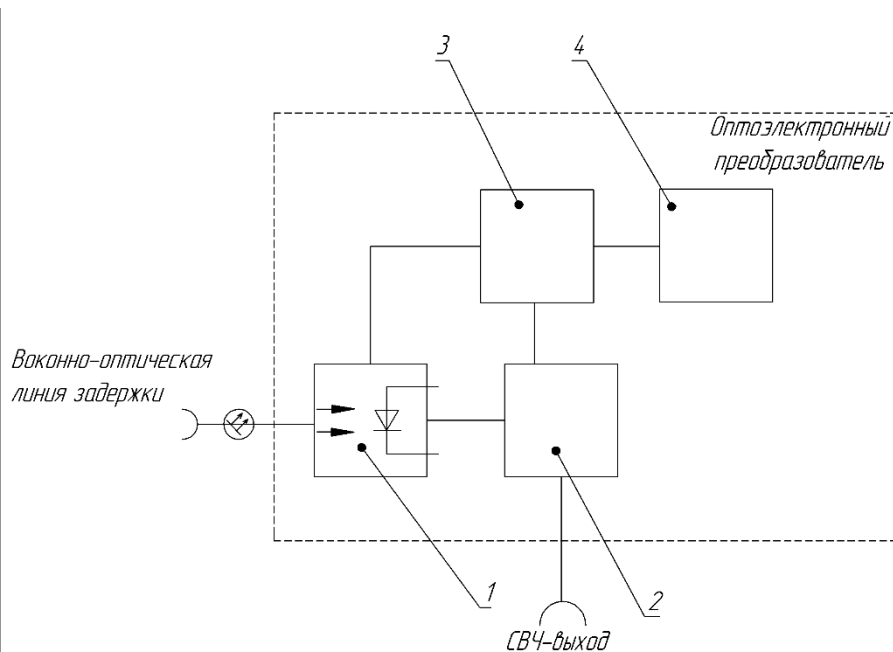


Таблица 1

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
1	Фотодетектор Alphas UPD-15-IR2-FC	1	
2	Усилитель малозумящий PIM PEC-50-500M40G-20-12-292FF-BG	1	
3	Плата управления и питания	1	
4	Блок питания Mean Well RS-50-24	1	

Рисунок 17 – Функциональная схема фотоприемного блока

3.2 Формирование требований и подбор элементной базы

Приведенные в текущем разделе формулы и выражения являются основными для оценки параметров базовых элементов устройства, а именно фотоприемного устройства и малошумящего усилителя.

3.2.1 Фотоприемник

На основе исходных данных необходимо выбрать фотоприемник, минимальная регистрируемая мощность которого находится в диапазоне - 30...-60дБм.

Пороговая мощность определяется по (20) [14]:

$$\Phi_0 = SNR \cdot NEP \cdot \sqrt{\Delta f}, \quad (20)$$

где SNR (signal-to-noise-ratio) – соотношение сигнал/шум;
NEP (noise equivalent power) – мощность, эквивалентная шуму;
 Δf – рабочая полоса частот.

При этом NEP является величиной, обратной к обнаружительной способности D^* .

Минимальный уровень шумов определяется по формуле (21) [14]:

$$\Phi_N = \text{NEP} \cdot \sqrt{\Delta f}, \quad (21)$$

Реально обеспечиваемый SNR зависит от коэффициента деления на разветвителях оптоволоконной линии задержки и вычисляется по (22) [14]:

$$\text{SNR} = 10 \lg(P_{\text{вх}} / \Phi_N) \quad (22)$$

Для обеспечения оптимальной работы разрабатываемого устройства, поставим следующие критерии для фотоприемника: минимально возможная пороговая мощность должна находиться на уровне нескольких нВт, чтобы ФП регистрировал даже слабый сигнал, при этом уровень SNR возьмем равным 15.

Современные технологии позволяют создавать фотоприемные модули, полоса частот которых достигает 100-160 ГГц. Однако, большая часть ФП, работающих в гигагерцовом диапазоне предназначены для наиболее эффективного преобразования одного вида энергии в другой, они обеспечивают максимальное значение тока на выходе, но не обеспечивают высокое значение NEP. Устройства, предназначенные для измерений, на современном рынке встречаются значительно реже, поскольку используются, как правило, в только развивающемся направлении радиофотоники. Тем не

менее, проанализировав предложения отечественных и зарубежных компаний-производителей можно примерно оценить средние значения параметров фотоприемников [17–25].

В таблице 1 приведены параметры фотоприемных модулей, работающий в диапазоне 15–30 ГГц.

Таблица 1 – Сравнение шумовых характеристик ФП для 15-30 ГГц

Фотоприемник	Полоса частот, ГГц	NEP, Вт/$\sqrt{\text{Гц}}$	Темновой ток, А
Gooch&HouseGo EM169	20	–	$1 \cdot 10^{-7}$
Optilab PD-20	20	–	$1 \cdot 10^{-8}$
Apic ARX20	20	–	$5 \cdot 10^{-9}$
Keyang photonics APD photoreceiver	25	–	$5 \cdot 10^{-8}$
Emcore 2522	22	–	$5 \cdot 10^{-9}$
ДилазДФДМШ40-16	16	–	$10 \cdot 10^{-9}$
Thorlabs DX25CF	25	$3 \cdot 10^{-11}$	–
EOT-36000F	22	$2.6 \cdot 10^{-11}$	–
Alphalas UPD-15-IR2-FC	25	$1 \cdot 10^{-15}$	–

Как видно из таблицы, не всеми производителями указывается параметр NEP, что затрудняет оценку шумовых параметров фотоприемника. Чтобы примерно оценить минимально регистрируемую мощность оптического сигнала, можно воспользоваться формулами (13) – (15), приведенными в пункте 1.3.2, вычислив дробовой шум и шум Джонсона. Полученные значения мощности представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение пороговой мощности фотоприемников

Применение	Фотоприемник	Минимальная регистрируемая мощность, Вт	Минимальная регистрируемая мощность, дБм
Преобразование энергии	Gooch&HouseGo EM169	$1,9 \cdot 10^{-5}$	-17
	Optilab PD-20	$2,13 \cdot 10^{-5}$	-16,7
	Apic ARX20	$2,26 \cdot 10^{-5}$	-16,4
	Keyang photonics APD photoreceiver 25Gbps	$2,4 \cdot 10^{-5}$	-16,1
	Emcore 2522	$3,02 \cdot 10^{-5}$	-15,2
	ДиладДФДМШ40-16	$2,34 \cdot 10^{-5}$	-16
	Thorlabs DX25CF	$8,7 \cdot 10^{-5}$	-10,6
	EOT-36000F	$2,85 \cdot 10^{-5}$	-14
Измерения	Alphalas UPD-15-IR2-FC	$2,37 \cdot 10^{-9}$	-56

Проанализировав приблизительные оценки пороговой мощности, можно заметить, что для почти всех приведенных фотодетекторов полученная величина находится в диапазоне -10...-17 дБм, что является средним значением, однако недостаточным для удовлетворения заданным требованиям. Также в таблице представлено деление ФП по оптимальным сферам применения, основанное на полученных результатах.

Базируясь на приведенных выше данных сравнительных таблиц, было решено использовать приемник UPD-15-IR2-FC (рисунок 18), как единственный подходящий для реализации задач верификационной установки.

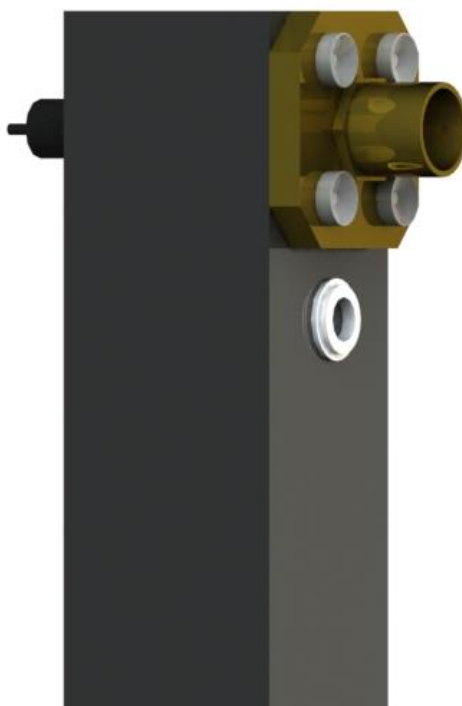


Рисунок 18 – Фотоприемник UPD-15-IR2-FC [25]

Ключевым элементом высокоскоростного фотоприемника является фотодиод, изготовленный из InGaAs. Данный материал широко применяется для построения на его базе приемников оптического излучения, поскольку позволяет получить высокие значения чувствительности и скорости считывания, в то же время обеспечивая низкий уровень темного шума. График зависимости чувствительности фотоприемников на базе кремния и арсенида галлий-индия приведен на рисунке 19, на рисунке 20 представлен график квантовой эффективности нескольких видов фотодиодов.

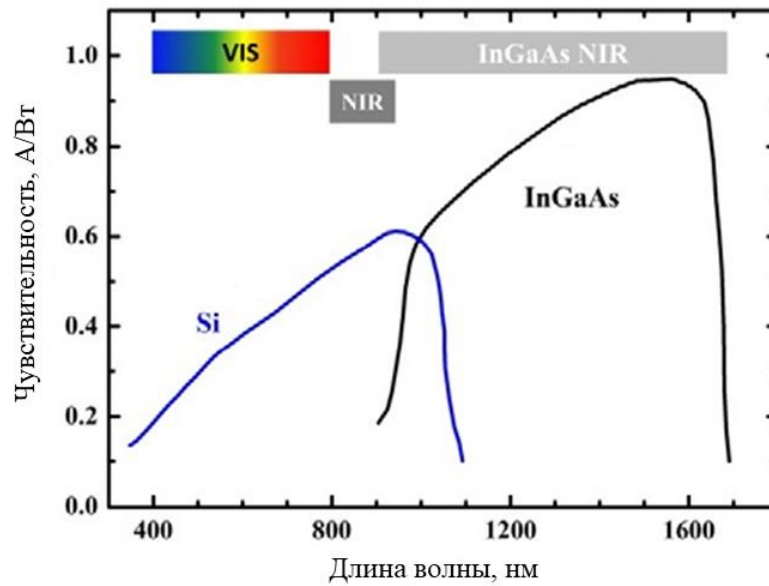


Рисунок 19 – Фоточувствительность фотодиодов из Si и InGaAs (VIS – видимый диапазон, NIR – ближний инфракрасный диапазон) [26]

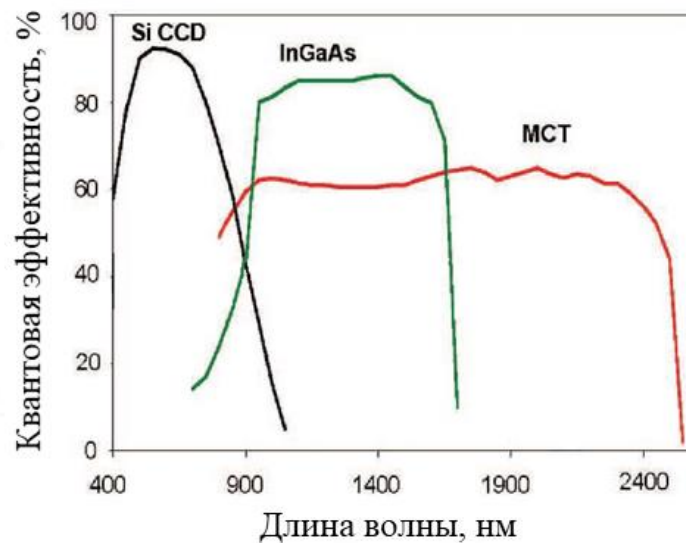


Рисунок 20 – Кривые квантовой эффективности для различных видов фотодиодов [27]

По формуле (21) вычисляется пороговая мощность при SNR=15 (что соответствует 11.8 дБ):

$$\Phi_0 = -56 \text{ дБм} = 2.7 \cdot 10^{-6} \text{ мВт.}$$

Поскольку полученная величина попадает в заданный диапазон, можно сделать вывод, что выбранный приемник отвечает поставленным требованиям.

Минимальная мощность, поступающая по фотоприемник после ВОЛС при коэффициенте деления на разветвителях 90 на 10 составляет:

$$P_{\text{вх}} = -43 \text{ дБм} = 4.8 \cdot 10^{-5} \text{ мВт.}$$

Тогда реально обеспечиваемый уровень соотношения сигнал/шум:

$$\text{SNR} = 48 \text{ (16.8 дБ).}$$

Изменяя коэффициент деления ВОЛС можно варьировать величину SNR, что представлено на графике (рисунок 21).

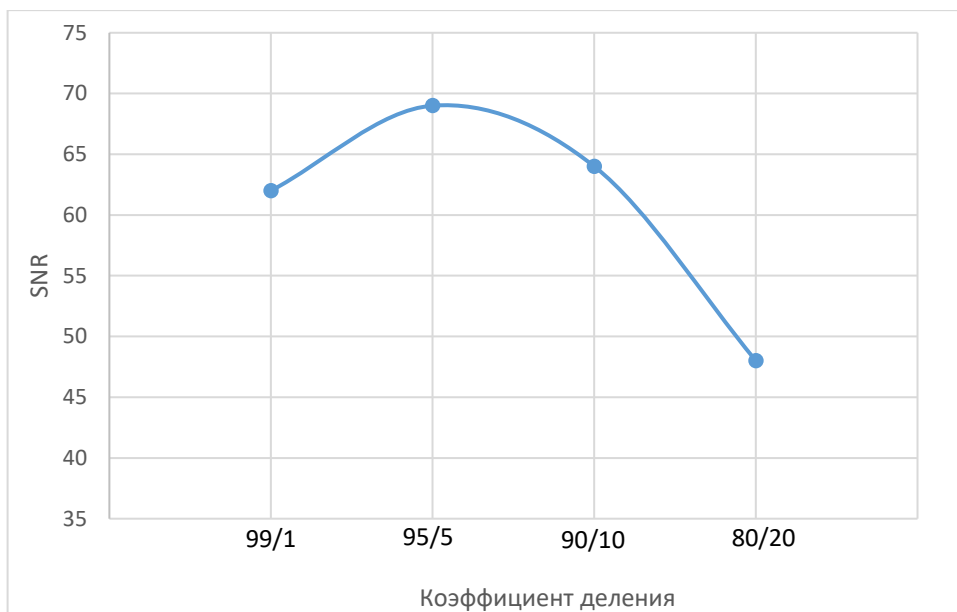


Рисунок 21 - Зависимость величины SNR от коэффициента деления на разветвителе ВОЛС

3.2.2 Малошумящий усилитель

Выходящий после фотоприемника сигнал необходимо усилить, при этом не внося большого вклада в общую величину шума – для этой цели используется малошумящий усилитель (драйвер), работающий с заданной полосой частот 20 ГГц.

Главным параметром усилителя является коэффициент усиления G (23) [28]:

$$G = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}, \quad (23)$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ – мощность на выходе усилителя;

$P_{\text{ВХ}}$ – мощность, поглощаемая во входной цепи.

Шумовые характеристики определяются коэффициентом шума $K_{\text{ш}}$ – параметром, показывающим во сколько раз уменьшается отношение сигнал/шум на выходе по отношению ко входу. Коэффициент шума может быть выражен в децибелах (24) или в Кельвинах, во втором случае он называется шумовой температурой $T_{\text{ш}}$ (25) [28].

$$K_{\text{ш}} = (P_c/P_{\text{ш}})_{\text{ВХ}} / (P_c/P_{\text{ш}})_{\text{ВЫХ}} \quad (24)$$

$$T_{\text{ш}} = (K_{\text{ш}} - 1) / 290 \quad (25)$$

Среди представленных на рынке МШУ был выбран усилитель PEC-50-500M40G-20-12-292FF-BG (рисунок 22), произведенный компанией Planar Monolithics Industries [29], поскольку он имеет наилучший коэффициент усиления в заданной полосе частот. Технические параметры данного МШУ приведены в таблице 3.

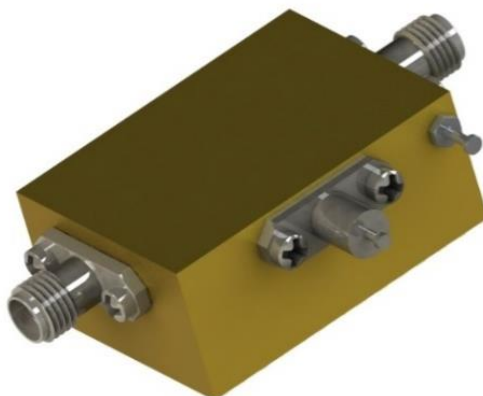


Рисунок 22 – Модель МШУ PEC-50-500M40G-20-12-292FF-BG

Таблица 3 – ТТХ усилителя

Параметр	Значение
Частотный диапазон	0.5 – 40 ГГц
Коэффициент усиления	50 дБ
Тепловой шума усилителя	5.5 дБм
Максимальная выходная мощность	17 дБм
Необходимое напряжение	12 – 50 В на 450 мА

Исходя из выражения (23) можно найти итоговую выходную мощность электрического сигнала, однако, поскольку коэффициент усиления выражен в децибелах, то необходимо использовать логарифм. Таким образом формула принимает вид (28):

$$G=10\lg(P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}) \quad (26)$$

$$P_{\text{ВЫХ}}=4.8 \text{ мВт (6,8 дБм)}.$$

3.2.3 Блок питания

Важной характеристикой любого электронного устройства является потребляемая им мощность, получаемая из суммирования мощностей всех элементов – на основании этого значения подбирается блок питания.

На основе экспертных оценок и сравнительного анализа для фотодетектора было принято, что необходимое значение мощности $P_{\text{фп}}$ находится в диапазоне 5–10 В. Исходя из параметров напряжения усилитель, необходимая мощность $P_{\text{у}}$ составляет 8 Вт. Также в модуле предусмотрена плата управления и питания, которой требует $P_{\text{упл}} = 3$ Вт. Таким образом минимальная необходимая мощность блока питания:

$$P = 21 \text{ Вт.}$$

Необходимо обеспечить некоторый запас по мощности, поэтому целесообразно выбирать блок питания на 50 Вт. Среднее напряжение на каждом из элементов составляет 12–15 В, но поскольку на плате управления и питания предусмотрены понижающие преобразователи, то оптимальный выбор – блок питания с большим значением напряжения.

Исходя из вышесказанного, был подобран блок питания на 50 Вт и 24 В RS-50-24, произведенный компанией Mean Well (рисунок 23).



Рисунок 23 – Блок питания RS-50-24 [30]

3.3 Расчет надежности модуля оптоэлектрического преобразования

В настоящем разделе приводится расчет параметров надежности разрабатываемого устройства на основании экспертных и статистических данных о его компонентах. Метод расчет: вычисление вероятности безотказной работы (ВБР) за временную наработку.

Для оценки основных показателей надежности и построение закона распределения наработки до отказа будет положено, что система является невосстанавливаемой, отказ любого элемента влечет за собой отказ всей системы.

Из [31] найдем интенсивности отказов основных компонентов системы, в частности, элементов микросхемы платы управления и питания. Все данные приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Интенсивность отказов компонентов фотоприемного блока

Компонент	Количество n, шт	Интенсивность отказов $\lambda_i \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Фотоприемник	1	0,185
Малошумящий усилитель	1	14
Блок питания	1	0,6
Плата управления и питания:		
Транзистор	3	0,0017
Конденсатор	2	0,36
Резистор переменный	12	0,028
Резонатор кварцевый	4	0,045
DC/DC преобразователи	1	0,9
Микропроцессор	1	0,076
Контакты разъемов	6	0,055

Интенсивность отказов ПУП $\lambda_{\text{ПУП}}$ является суммарной интенсивностью отказа элементов (27) [32]:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^i \lambda_i n_i \quad (27)$$

$$\lambda_{\text{ПУП}} = 0,000017382 \text{ 1/ч.}$$

Интенсивность разрабатываемого устройства в соответствии с формулой (27):

$$\Lambda = 0,000032167 \text{ 1/ч.}$$

Среднее значение наработки на отказ для всей системы $T_{\text{ср}}$, а также максимальное время ВБР T_{max} определяется по формулам (28,29) [32]:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\Lambda} \quad (28)$$

$$T_{\text{max}} = T_{\text{ср}} + 4t_i \quad (29)$$

$$T_{\text{ср}} = 31 \text{ 087 ч;}$$

$$T_{\text{max}} = 62 \text{ 087 ч.}$$

Пусть рассматривается закон нормального распределения, тогда по формуле (30) рассчитывается величина среднеквадратического отклонения (СКО) σ , а затем с помощью выражения (31) вычисляется плотность распределения наработок до отказа $f(t)$ и строится ее график (рисунок 24).

$$\sigma = \frac{T_{max} - T_1}{6} \quad (30)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(t_{тек}-T_{ср.общ})^2}{2\sigma^2}} \quad (31)$$

$$\sigma = 5016.$$

Величина плотности вероятности представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Плотность вероятности

$t_{тек}, ч$	$f(t)$
6287	3,91309E-10
12487	8,21925E-08
18687	3,74651E-06
24887	3,70599E-05
31087	7,95541E-05
37287	3,70599E-05
43487	3,74651E-06
49687	8,21925E-08
55887	3,91309E-10
62087	4,04286E-13

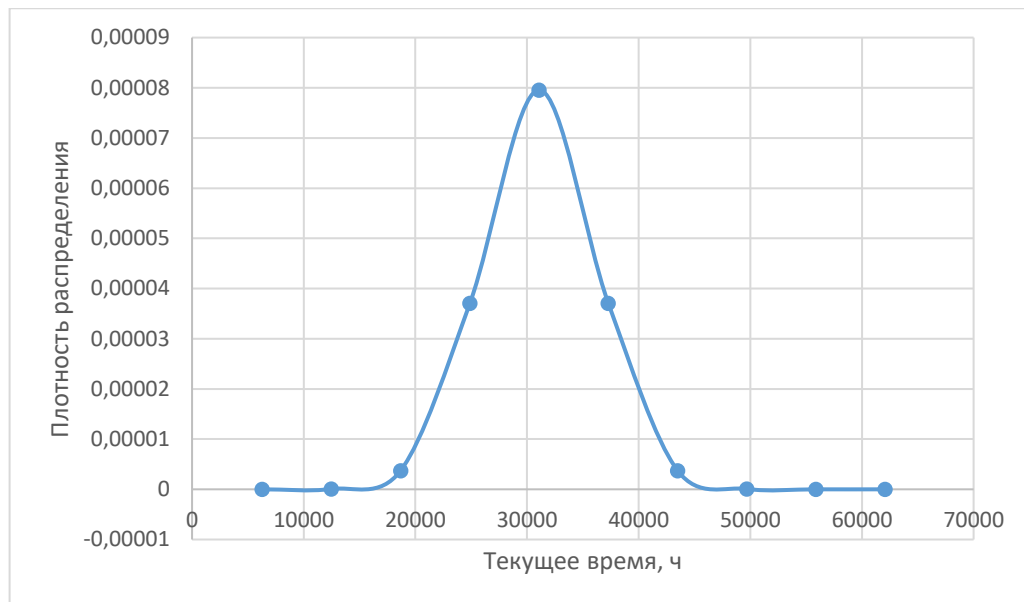


Рисунок 24 – Плотность распределения наработок до отказа

Следующим пунктом является рассмотрение экспоненциального закона, по которому значение ВБР $P(t)$ вычисляется согласно формуле (32). Вычисленные значения представлены в таблице 6, построенная зависимость – на рисунке 25.

$$P(t) = e^{-\lambda t} \tag{32}$$

Вероятность отказа $Q(t)$ определяется выражением (33).

$$Q(t) = 1 - P(t) \tag{33}$$

Таблица 6 – Вероятность безотказной работы

$t_{\text{тек}}, \text{ч}$	$P(t)$	$Q(t)$
6287	0,9469685	0,053031
12487	0,8974258	0,102574
18687	0,850475	0,149525
24887	0,8059806	0,194019
31087	0,763814	0,236186

Продолжение таблицы 6

37287	0,7238534	0,276147
43487	0,6859834	0,314017
49687	0,6500947	0,349905
55887	0,6160836	0,383916
62087	0,5838518	0,416148

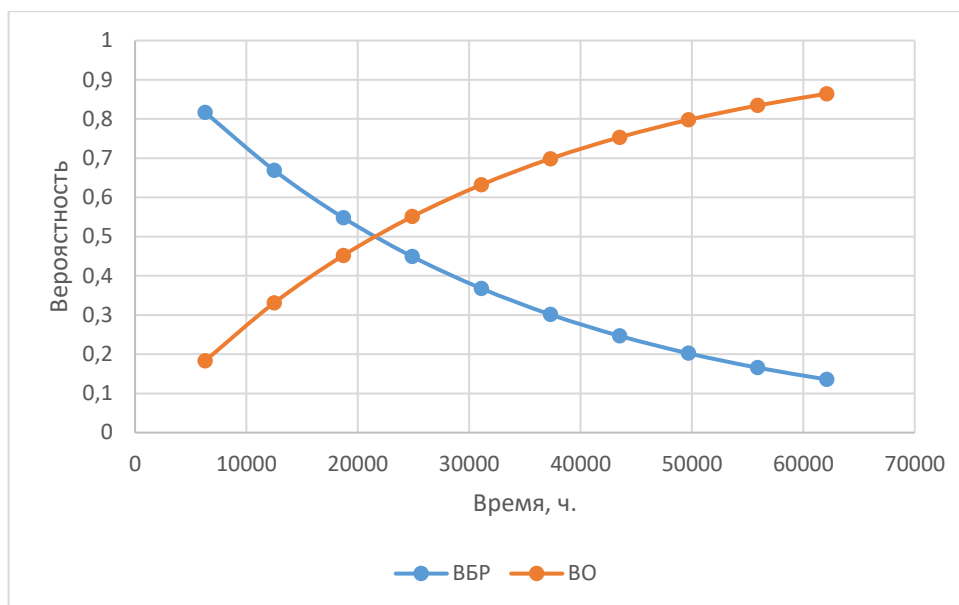


Рисунок 25 – Вероятности безотказной работы и отказа

Для определения ВБР через табулированную функцию Лапласа, используется формула (34) [32]:

$$P(t) = 0,5 + \Phi_n \left(\frac{T_{\text{ср.общ}} - t_{\text{тек}}}{\sigma} \right) \quad (34)$$

Полученные значения представлены в таблице 7, построенный график – на рисунке 26.

Таблица 7 – Вероятность безотказной работы (таб. функция Лапласа)

$t_{\text{тек}}, \text{ч}$	x	$\Phi(x)$	$P(t)$	$Q(t)$
6287	4,9	0,5	1	0
12487	3,7	0,49989	0,99989	0,00011
18687	2,48	0,49305	0,99305	0,00695

24887	1,23	0,39617	0,89617	0,10383
31087	0	0	0,5	0,5
37287	-1,23	0,39617	0,10383	0,89617
43487	-2,47209	0,49305	0,00695	0,99305
49687	-3,7	0,49989	0,00011	0,99989
55887	-4,9	0,5	0	1
62087	-6	0,5	0	1

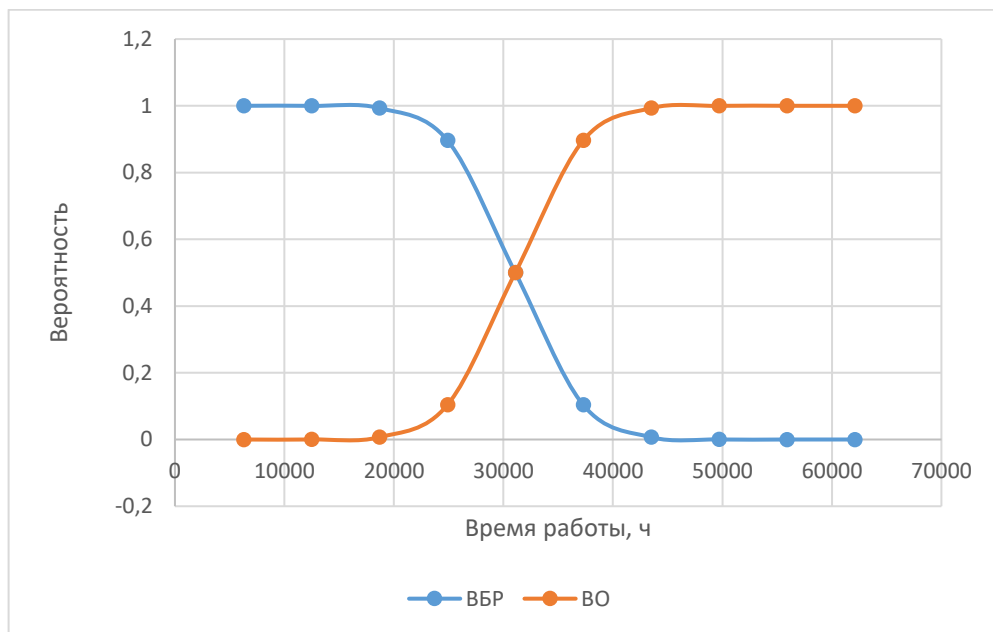


Рисунок 26 – Интегральный закон надежности

Исходя из полученных графиков, можно сделать вывод, что графики ВБР и ВО пересекаются в точке 31000 часов, что соответствует вычисленной средней наработке на отказ. Также по полученным данным можно судить о том, что разрабатываемый фотоприемный блок оптоэлектрического преобразования не обладает высокими показателями надежности, в большей степени это вызвано большой интенсивностью отказов драйвера, как наиболее уязвимого элемента системы.

3.4 Выводы по расчетному разделу

В настоящем разделе был произведен выбор компонентной базы, основывавшийся на анализе параметров предлагаемых на рынке оптоэлектронных и радиоэлектронных устройств. Оценены шумовые параметры фотоприемника и параметры усиления МШУ, которые были признаны удовлетворяющими заданным условиям. Также была произведена оценка надежности разрабатываемого фотоприемного блока и сделан вывод о невысоких показателях. Повысить надежность устройства можно при помощи резервирования, в частности, внесении дополнительного драйвера, как наиболее слабого элемента.

4 Конструкторско-технологический раздел

В текущем разделе приводится проектирование платы управления и питания и передающей антенны, устанавливаемой рядом со стендом для верификации радиолокаторов для переизлучения выходного сигнала непосредственно на поверяемую РЛС. Также в разделе описана внутренняя компоновка разрабатываемого устройства и разработка сопутствующей конструкторской документации.

4.1 Модель платы управления и питания

Фотоприемный блок содержит малошумящий усилитель с переменным коэффициентом усиления, который регулируется с внешнего контроллера. Для осуществления управления усилением, а также распределения между функциональными элементами поступающей от сети мощности предусмотрена плата управления и питания. Она представлена на рисунке 27.

Конденсаторы 1 необходимы для передачи сигнала между усилительными каскадами и выравнивания напряжения. Кварцевые резонаторы 5 необходимы для перемещения энергии в равные доли времени, тем самым они задают частоту работы всей электронной схемы. Транзисторы 7 необходимы для генерации и преобразования электрического сигнала. Активные элементы микросхемы – диоды 8 необходимы для ограничения и модуляции проходящего через них тока. Логический элемент 2 представляет собой микросхему. На плате также предусмотрен DC/DC преобразователь 3, осуществляющий понижение напряжения. Через разъемы 4 осуществляется подключение всех потребляющих мощность элементов блока.

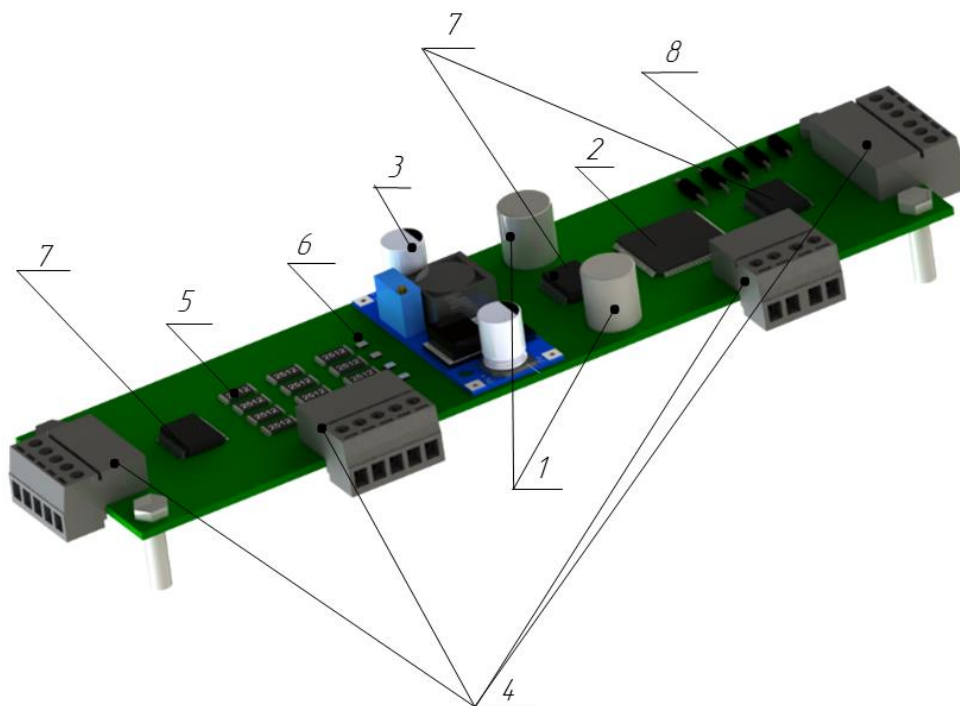


Рисунок 27 – Плата управления и питания

4.2 Проектирование передающей антенны

Антенна предназначена для излучения или приема радиоволнового сигнала, и в зависимости от назначения выделяют соответственно передающие и приемные антенны, кроме того существуют приемопередающие антенны, способные работать в обоих режимах.

В диапазоне длин волн от мм до дм предпочтение отдается рупорным и линзовым антеннам, поскольку они просты с конструкторской точки зрения, но в то же время обладают высоким КПД и являются широкополосными.

В данном разделе приводится расчет габаритов, разработка конструкции, а также диаграмма направленности рупорной передающей антенны, подключаемой к фотоприемному блоку и переизлучающей промодулированный выделенный СВЧ-сигнал обратно на поверяемую РЛС.

Для проектирования была выбрана пирамидальный оптимальный рупор (фазовая ошибка не более допустимого значения, фронт волны плоский) т.к. для работы в сантиметровом диапазоне такая антенна не требует специализированного устройства для коррекции фазовых ошибок и не

обладает большими габаритами. Проектирование антенны начинается с выбора одного из ключевых компонентов – волновода. В соответствии с данными ТЗ был выбран стандартный волновод МЭК-180 [33], подходящий по рабочему диапазону волн. Кроме того, необходим хотя бы один ограничивающий параметр для расчета – это может быть ширина диаграммы направленности по половинному уровню мощности $2\varphi_{0.5}^0$ или коэффициент направленного действия D. В настоящей работе в качестве такого параметра была выбрана $2\varphi_{0.5}^0 = 10^\circ$ [34]. Параметры волновода, а также другие исходные данные представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Исходные данные для расчета параметров антенны

Параметр	Значение
Диапазон волн волновода, $\lambda_{\text{волн}}$	1,36...2,07 см
Внутренние размеры волновода, $a_w \times b_w$	12,954x6,477 мм
Толщина стенок волновода, h_w	1,02 мм
Волновое сопротивление фидера, $R_{\text{ф}}$	50 Ом
Рабочая частота, f	20 ГГц
КИП для пирамидального рупора, u	0,5
Ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности в плоскости H, $2\varphi_{0.5H}^0$	10°
Ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности в плоскости E, $2\varphi_{0.5E}^0$	10°

Из формулы (35) находится максимальная длина волны излучения, распространяемая в свободном пространстве λ [35].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (35)$$

$$\lambda = 0.015 \text{ м} = 1.5 \text{ см}$$

Длины волны, распространяющейся в волноводе λ_w рассчитывается согласно формуле (36) [35].

$$\lambda_w = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_w}\right)^2}} \quad (36)$$

$$\lambda_w = 0.018 \text{ м}$$

Волновое сопротивление волновода W_w соответствует (37) [35]:

$$W_w = \frac{2b_w 120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_w}\right)^2}} \quad (37)$$

$$W_w = 481,674 \text{ Ом}$$

Далее необходимо выбрать тип возбуждающего устройства, это может быть волноводная линия передачи сигнала или коаксиальный кабель. В первом случае необходимо обеспечить согласование между коаксиальным и волноводным кабелем, во втором же случае не требуется дополнительное оборудование. В настоящей работе в качестве возбудителя был выбран возбуждающий штырь. Действующей h (38), геометрической длиной l (39) и расстоянием до плоскости стенки волновода обеспечивается режим бегущей волны. Предполагается, что возбуждающий штырь расположен в середине

широкой стороны волновода, т.е. на расстоянии $x=a_w/2$ и на расстоянии $L=\lambda_w/4$ от закорачивающего поршня [35].

$$h = \sqrt{\frac{a_w b_w R_\phi}{2W_w \sin\left(\frac{\pi x}{a_w}\right)^2 \sin\left(\frac{2\pi L}{\lambda_w}\right)}} \quad (38)$$

$$l = \frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (39)$$

$$h=2,133 \cdot 10^{-3} \text{ м}, l=3,475 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Затем необходимо рассчитать непосредственно размеры рупора – длины сторон раскрыва a_p и b_p (40, 41), а также оптимальные длины антенны в плоскостях Н и Е – R_H , R_E (42, 43) [36].

$$a_p = 67^\circ \frac{\lambda}{2\varphi_{0.5H}^0} \quad (40)$$

$$b_p = 53^\circ \frac{\lambda}{2\varphi_{0.5E}^0} \quad (41)$$

$$R_H = \frac{a_p^2}{3\lambda} \quad (42)$$

$$R_E = \frac{b_p^2}{2\lambda} \quad (43)$$

$$a_p=0.1 \text{ м}, b_p=0.079 \text{ м}, R_H=0.223 \text{ м}, R_E=0.209 \text{ м}.$$

Зная все необходимые длины, по формулам (44) и (45) вычисляются углы раскрыва α_H и α_E в плоскостях Н и Е соответственно [35].

$$2\alpha_H = 2\arctg\left(\frac{a_p}{2R_H}\right) \quad (44)$$

$$2\alpha_E = 2\arctg\left(\frac{b_p}{2R_E}\right) \quad (45)$$

$$\alpha_H = 0.44 \text{ рад}, \alpha_E = 0.373 \text{ рад}.$$

Для обеспечения согласования непосредственно рупора и волновода, должно удовлетворяться следующее равенство (46) [35]:

$$\frac{R_H}{R_E} = \frac{a_p(b_p - b_w)}{b_p(a_p - a_w)} \quad (46)$$

Подставив значения, можно убедиться, что равенство выполняется с отличием в сотом порядке: $1.065 \cong 1.051$.

Величина коэффициента направленного действия D определяется согласно формуле (47) [36]:

$$D = \frac{4\pi a_p b_p u}{\lambda^2} \quad (47)$$

$D=223$ раз мощности, что соответствует 23,5 дБ.

По полученным в ходе расчета параметрам была построена модель передающего оптимального рупора, внешний вид которого представлен на рисунке 28. Чертеж рупорной антенны приведен в приложении А.

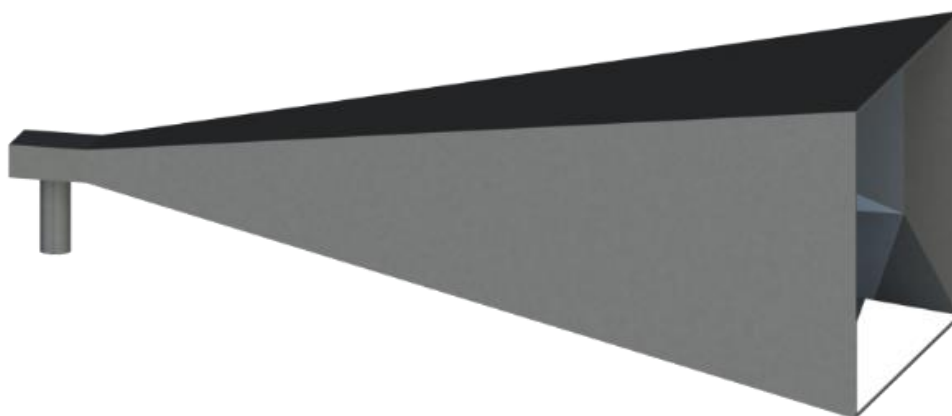


Рисунок 28 – Передающая рупорная антенна

Антенна размещается на телескопической стойке и крепится опорно-поворотного механизма (рисунок 29).



Рисунок 29 – Передающая антенна, установленная на стойке

При проектировании антенны необходимо также учитывать длину коаксиальной линии (КЛ), соединяющей антенну с фотоприемным блоком. Основываясь на экстраполяции данных, для рабочей частоты 20 ГГц, длина

кабеля соответствует 1,5-2 м. За счет наличия внутреннего проводника, волноводно-коаксиальный переход и непосредственно КЛ обладают достаточно большими затуханиями.

Рассматривая стандартный коаксиальный медный кабель, рассчитанный на 50 Ом РК 50-4-21 [37] и используя формулу (48) [38] вычисляется величина затуханий α :

$$\alpha = \frac{2,6 \cdot 10^{-9} \sqrt{\varepsilon f}}{\lg\left(\frac{D}{d}\right)} \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d}\right) + 9,08 \cdot 10^{-11} f \sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg}\left(\frac{62}{\sqrt{f}}\right) \quad (48)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость внутреннего диэлектрического заполнения (2,2 для фторопласта);

d – внутренний диаметр, мм;

D – внешний диаметр, мм.

$$\alpha = 0,51 \text{ дБ/м.}$$

Таким образом, при длине коаксиального кабеля 2 м, сигнал будет иметь потери около 1 дБ.

Также на основании расчетов была построена диаграмма направленности сконструированной антенны (рисунок 30), из которой видно, что максимальный КНД для основного лепестка составляет 24 дБ, что соответствует расчетному значению.

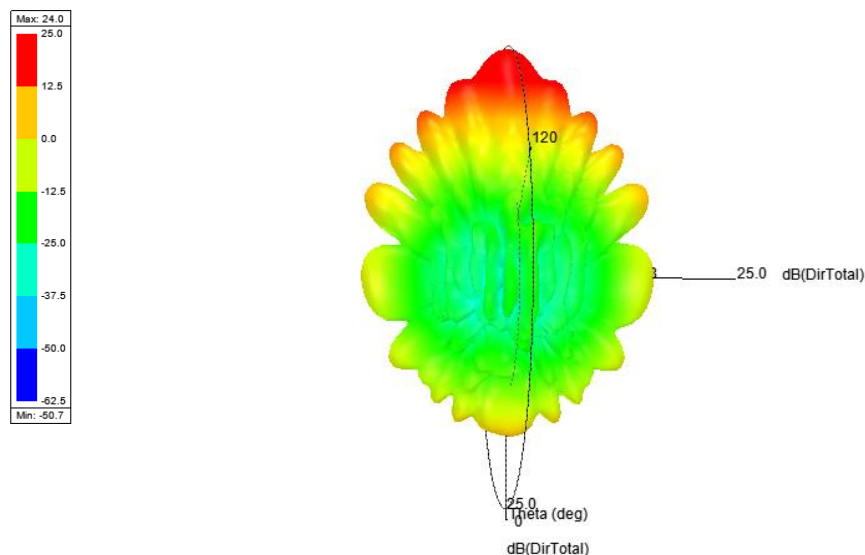


Рисунок 30 – Диаграмма направленности передающей рупорной антенны

4.3 Разработка и описание конструкции фотоприемного блока

Излучаемый радиолокатором 1 сигнал попадает на приемную антенну 2, с которой излучение проходит обработку в стенде верификации 4 и переизлучается на РЛС через передающую антенну 3, такая конструкция представлена на рисунке 31. Однако две антенны противоположного действия могут быть заменены на приемо-передающую антенну 5 и антенный переключатель 6, как это изображено на рисунке 32.

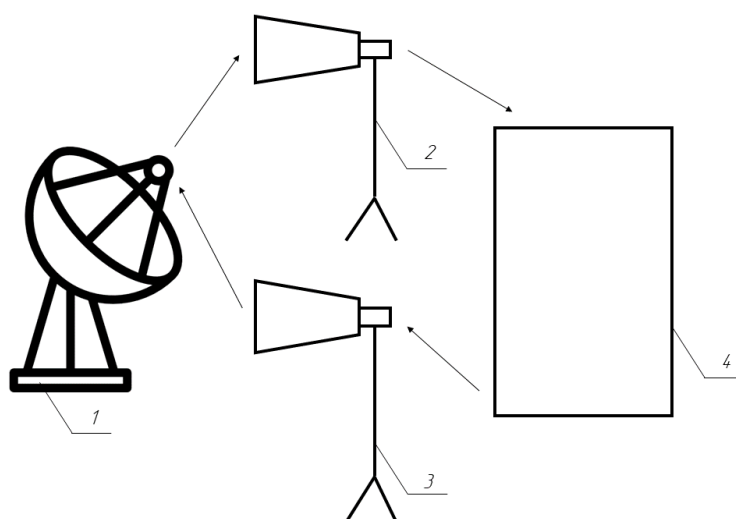


Рисунок 31 – Вариант реализации с использованием двух антенны

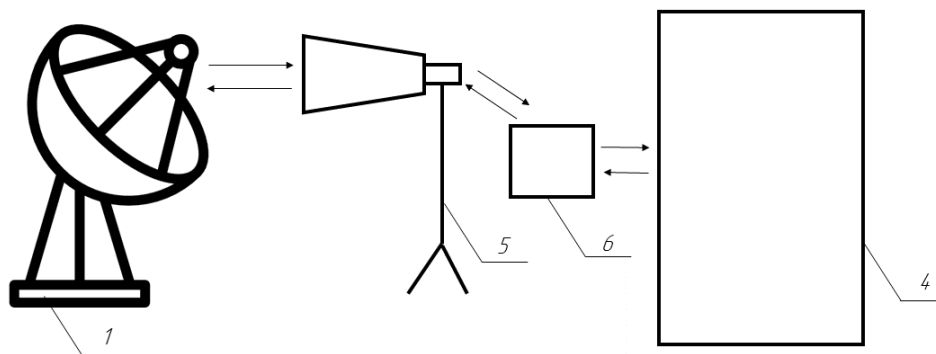


Рисунок 32 – Вариант реализации с использованием антенного переключателя

Фотоприемный блок высокочастотного оптоэлектрического преобразования является одним из функциональных модулей стенда верификации радиолокатора с использованием оптоволоконной линии задержки и элементов радиофотоники. При разработке стенда предполагалось выдерживание единообразия модулей, т.к. вместе они представляют единую систему. Исходя из этого, было решено использовать стандартный РЭК-корпус 19” 1 юнит, устанавливающиеся в стойку, т.к. функциональные элементы разрабатываемого блока являются малогабаритными, то глубина выбранного корпуса составляет 180 мм (рисунок 33). Рядом со стендом устанавливается передающая антенна, подключенная к блоку (рисунок 34).



Рисунок 33 – Фотоприемный блок высокочастотного оптоэлектронного преобразования



Рисунок 34 – Стенд для верификации параметров радиолокатора с применением двух антенн

Фотоприемное устройство 1, соединяется с оптоволоконной линией задержки при помощи оптического патч-корда, зафиксированного сплайс-кассетой 2. ФП соединяется с малошумящим усилителем 3 при помощи коаксиального кабеля. МШУ и фотоприемник располагаются на радиаторах 4 для отведения выделяемого тепла. Плата управления и питания 5 подключается к фотоприемнику и усилителю, распределяя напряжение, поступающее от блока питания 6, подключенного к внешнему источнику напряжения в 220 В 7. Для устранения влияния сторонних шумов, чувствительные устройства, такие как фотоприемник и драйвер, отделены от прочих электронных составляющих блока экранирующей перегородкой 8. Расположение элементов приведено на рисунке 35.

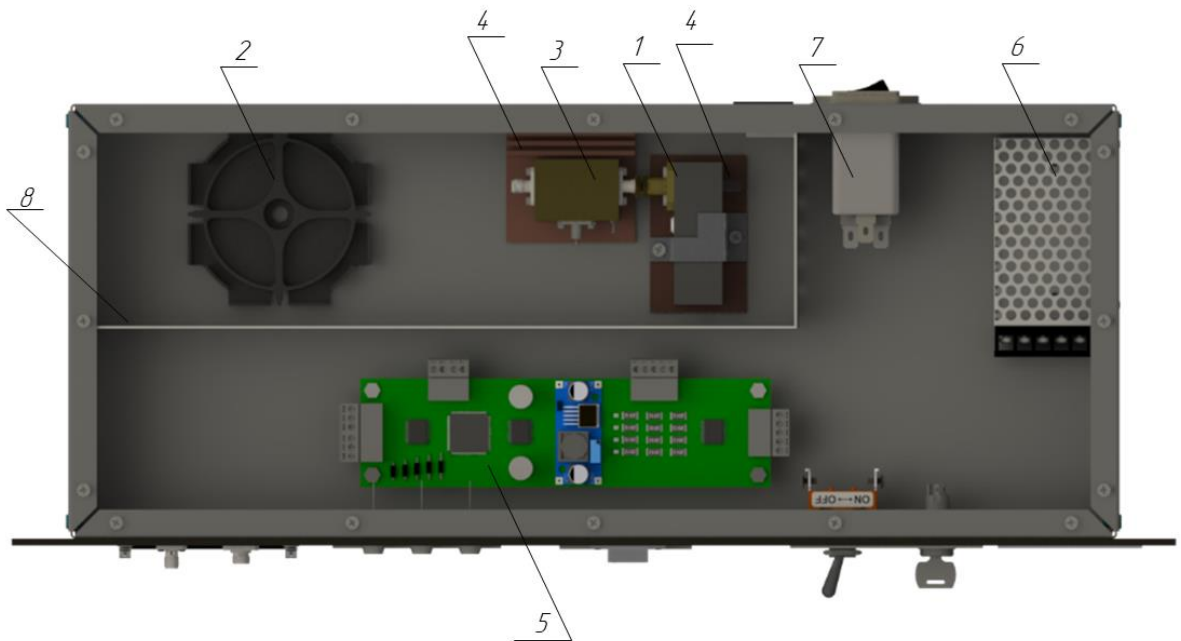


Рисунок 35 – Фотоприемный блок (вид сверху)

На лицевой стороне корпуса расположен интерфейс пользователя (рисунок 36). Для СВЧ-разъема SMA и оптического порта типа FC/APC предусмотрены защитные колпачки, предназначенные для минимизации загрязнений разъемов в отсутствие подключения. Разъем RS232 предназначен для внешнего контроля и управления коэффициента усилителя МШУ при помощи платы управления и питания. Светодиодная индикация призвана визуально отражать наличие питания на устройстве и включенный фотоприемник (зеленый цвет первых двух светодиодов), а также возникновение ошибки (красный цвет третьего светодиода). Запуск работы фотоприемного модуля производится поворотом ключа, подача и прекращение подачи питания на электронные элементы устройства осуществляется переключением тумблера.

Все разъемы, управляющие и визуализирующие компоненты имеют информационные таблички, на которых отражено название компонентов и рабочие положения переключателей.



Рисунок 36 – Фотоприемный блок (вид спереди)

Для обеспечения циркуляции воздуха внутри корпуса на задней стороне предусмотрены перфорационные отверстия (рисунок 37). Также сзади расположен разъем блока питания и переключатель.



Рисунок 37 – Фотоприемный блок (вид сзади)

Конструкторская документация, разработанная для фотоприемного блока высокочастотного оптоэлектрического преобразования включает в себя:

- Схему структурную комбинированную;
- Чертеж общего вида фотоприемного блока;
- Чертеж сборочный фотоприёмного блока, установленного в стойку;
- Чертеж передающей антенны.

Конструкторская документация оформлена согласно ГОСТ 2.102-2013 [39] и приведена в приложении А.

4.4 Выводы по конструкторскому разделу

В результате работы над конструкторским разделом ВКР была разработана плата управления и питания, осуществляющая распределение мощности между всеми электронными компонентами блока и позволяющая регулировать коэффициент усиления МШУ с какого-либо подключаемого внешнего контроллера. Был произведен габаритный расчет передающей антенны, произведена оценка ее коэффициента направленного действия и также предложена модель ее конструкции.

Также раздел содержит описание и визуальное отображение внутренней компоновки блока оптоэлектронного преобразования, вариант реализации полноценного стенда верификации радиолокатора.

На основании всех приведенных данных, была выпущена конструкторская документация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей выпускной квалификационной работе «Фотоприемный блок для высокочастотного оптоэлектронного преобразования» были описаны физические основы работы радиолокаторов, а также приведена классификация антенн, также были рассмотрены физические принципы работы приемников оптического излучения, работающих на внешнем фотоэффекте, описана классификация фотодиодов и проведен анализ из достоинств и недостатков.

Поскольку работа заключается в разработке одного из функциональных модулей стенда верификации радиолокаторов, были описаны наиболее часто применяемые методы поверки РЛС, проведен их анализ, и описан предлагаемый метод поверки с использованием ВОЛС и радиофотоники.

В ходе разработки фотоприемного блока был проведен анализ шумовых параметров фотоприемников, представленных на отечественном и зарубежном рынке, рассчитаны требуемые параметры, на основе чего был осуществлен выбор элементной базы. Полученная мощность сигнала, выходящего из фотоприемного блока, составляет 6,8 дБм.

Рассматривая непосредственно прикладной аспект использования оптоэлектронный преобразователь, входящего в стенд верификации, была учтена перспектива подключения передающей антенны, исходя из чего был произведен ее габаритный расчет и предложена конструкция, сопровождаемая КД. Коэффициент направленного действия предлагаемой антенны составляет 23,5 дБ.

Результатом всего вышеперечисленного является предложенная вариация конструкции фотоприемного блока высокочастотного преобразования, базирующаяся на произведенных теоретических расчётах, и выпущенная сопутствующая конструкторская документация.

Материалы исследований, проведенных и проанализированных в рамках настоящей ВКР опубликованы в сборнике трудов XII научно-практической

конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» [40], входящем в систему научного цитирования РИЦН, а также в научном журнале «Радиопромышленность», рекомендованном ВАК [41].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белкин, М.Е. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника / М.Е. Белкин, А.С. Сигов // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, №8, – С. 901-914.
2. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учебник для вузов / П.А. Бакулев – Москва: Радиотехника, 2004. – 320 с.
3. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга: учебник / А. Н. Фомин, В.Н. Тряпкин, Д.Д. Дмитриев [и др]; под общ. ред. И.Н. Ищука. – Красноярск: Сиб. фед. ун-т, – 2016. – 292 с.
4. Шиман А. Radartutorial / А. Шиман, изд. Вольф К. – Текст: электронный // Интернет-ресурс. URL: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb04.ru.html> (дата обращения: 14.04.2020).
5. Устройства СВЧ и антенны: учебник / А.В. Филонов, А.Н. Фомин, Д. Дмитриев, В.Н.Тяпкин – Красноярск: Сиб. фед. ун-т, – 2014. – 492 с.
6. Кубанов В.П. Антенны и фидеры – назначение и параметры: учебное пособие / В.П. Кубанов – Самара: ПГУТИ, – 2012. – 60 с.
7. Особенности распространения радиоволн // CyberPedia: информационный ресурс. – URL: <https://cyberpedia.su/5x8152.html> (дата обращения: 14.04.2020)
8. Далбаева Н.И., Ибрагимова Я.Г., Терешенкова О.А., Ким А.А. Метод верификации параметров радиолокаторов с применением элементов радиофотоники и оптоволоконной линии задержки // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: труды двенадцатой общероссийской научно-практической конференции – СПб: Балт. гос. техн. ун-т. 2020 – Т.1 – С. 53-59.
9. Пат. 2502083 Российская Федерация, МПК G01S 7/40. Способ калибровки и поверки доплеровского радиолокатора профилей ветра /

Хомяков А.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО ЦКБА – N 2012117950/07; заявл. 28.04.11; публ. 20.12.13, Бюл. N 35 – 11 с.: 2 ил.

10. Пат. 2460091 Российская Федерация, МПК G01S 13/95. Способ оценки точности доплеровского радиолокатора профилей ветра / Сагитов В.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель РФ, от имени которой выступает Минобороны России, АО ЦКБА – N 2011108202/07; заявл. 02.03.11; опубл. 27.08.12, Бюл. N 24 – 11 с.: 1ил.

11. Ильин М.Ю., Клочков Д.В., Ким А.А. Имитация атмосферной трассы для контроля эксплуатационных характеристик метеорологических зондирующих систем // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: материалы V Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 23 – 25 мая 2018 г. / под общ. ред. Ю.В. Кулешова; редкол.: Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин и др.; отв. за вып.: А.С. Тимошук. СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018.

12. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника / А.Н. Пихтин. – М.: Высш. шк., 2001. – 533 с.

13. Нойкин, Ю.М. Физические основы оптической связи: Электронное учебное пособие / Ю.М. Нойкин, П.В. Махно. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2011. – URL: <http://foos.sfedu.ru/ogl.html> (дата обращения: 16.10.2019). – Текст: электронный.

14. Дмитриев, А.Л. Оптические системы передачи информации / А.Л. Дмитриев – Санкт-Петербург: ИТМО, 2007. – 96 с.

15. Балин, Ю.С. Аэрозольный рамановский лидар «ЛОЗА-М2» / Ю.С. Балин, Г.С. Байрашин, и др. // Приборы квантовой электроник. – 2011. – №10, – С.945-949.

16. Митяшев, М.Б. К реализации технологий радиофотоники в АФАР радиолокационных комплексов / М.Б. Митяшев // Вестник СибГУТИ. – 2015. – №2, – С.178-190.

17. G&H [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: <https://gandh.com/product-categories/high-speed-detectors/> (дата обращения: 25.12.2019)
18. Optilab [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: <https://oequest.com/getDatasheet/id/10174-10174.pdf/> (дата обращения: 25.12.2019)
19. Apic Corporation [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: <https://www.apichip.com/buy-our-high-linearity-photodiodes-today/> (дата обращения: 25.12.2019)
20. KeyPhotonics [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: <http://en.kyphotonics.com/> (дата обращения: 25.12.2019)
21. Emcore [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: <https://emcore.com/wp-content/uploads/2016/02/2522.pdf> (дата обращения: 25.12.2019)
22. НПФ «Дилаз» [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: <http://www.dilas.ru/prom/dfdms40-16.php> (дата обращения: 25.12.2019)
23. Thorlabs [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=11975#ad-image-0 (дата обращения: 25.12.2019)
24. EOT [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: <https://www.eotech.com/130/data-sheets/photodetectors/22-ghz-ingaas-photodetectors> (дата обращения: 25.12.2019)
25. Alphas [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: https://www.alphas.com/images/stories/products/laser_diagnostic_tools/Ultarafast_Photodetectors_UPD_ALPHALAS.pdf (дата обращения: 25.12.2019)
26. Joseph A. Shaw The optics and physics of near infrared / M. Vollmer, K.-P. Mollmann, J.A. Shaw // Proc. of SPIE, 2015. – 8 p.

27. Ulrike Kindereit Near-Infrared Photon Emission Spectroscopy of a 45 nm SOI Ring Oscillator / U. Kindereit, A.J. Weger, F. Stellari // IBM T.J. Watson Research Center Yorktown Heights, NY, USA, 2012. – 7 p.
28. Бова, Н.Т. Микроэлектронные устройства СВЧ / Н.Т. Бова, Ю.Г. Ефремов, В.В. Конин – Киев: Техника, 1984. – 177 с.
29. Planar Monolithics Industries [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: <https://www.pmi-rf.com/product-details/pec-50-500m40g-20-12-292ff-bg> (дата обращения: 25.12.2019)
30. Mean Well [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: <http://www.mean-well.ru/> (дата обращения: 25.12.2019)
31. Справочник «Надежность ЭРИ». – М:МО, 2006.
32. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учеб.-метод. пособие / С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян; под ред. С.М. Боровикова. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
33. Судовая радиолокация. Судовые радиолокационные системы и САРП: учебник для ВУЗов/ А.А. Дуров, В.С. Кан, Н.Т. Ничипоренко, Ю.М. Устинов – П.-Камчатский: КамчатГТУ, – 2005. – 280 с.
34. Антенны. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие / А. В. Кухарев, И.Н. Кижлай, В.Б. Кирильчук [и др]. – Минск: БГУИР, – 2013. – 109 с.
35. Проектирование антенных устройств систем связи: учеб. пособие / И.П. Заикин, А.В. Тоцкий, С.К. Абрамов. – Харьков: Нац. аэро-косм. Ун-т, 2007. – 78 с.
36. Клоков В.В., Павликов С.Н. Рупорные антенны: метод. указ. / В.В. Клоков, С.Н. Павликов. – Владивосток.: Морск. гос. ун-т., 2008. – 16 с.
37. Особое конструкторское бюро кабельной промышленности [Электронный ресурс]: официальный сайт компании URL: <http://www.okbkr.ru/production/cabels/radiofrequency/223/1524/> (дата обращения: 05.05.2020)

38. Панасюк Ю.Н., Пудовкин А.П. Микроволновая техника: метод. указ. для пров. занятий / Ю.Н. Панасюк, А.П. Пудовкин. – 2014. – 32 с.

39. ГОСТ 2.102-2013. Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов. Введ. 01.06.2014 – 17 с.

40. Далбаева Н.И., Ибрагимова Я.Г., Терешенкова О.А., Ким А.А. Метод верификации параметров радиолокаторов с применением элементов радиофотоники и оптоволоконной линии задержки // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: труды двенадцатой общероссийской научно-практической конференции – СПб: Балт. гос. техн. ун-т. 2020 – Т.1 – С. 53-59.

41. Методы и средства верификации параметров радиочастотных локаторов / Я.Г. Ибрагимова, О.А. Терешенкова, А.А. Ким, В.С. Лугиня // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 2. С. 8–17.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Документация на разработанное устройство:

1. Чертеж общего вида БГТУ.421427.000ВО;
2. Схема функциональная комбинированная БГТУ.432231.000С2;
3. Схема деления структурная БГТУ.421427.000.03Е1;
4. Чертеж общего вида БГТУ.421427.000.03ВО;
5. Чертеж общего вида БГТУ.432231.000ВО;
6. Спецификация БГТУ.464653.002;
7. Чертеж сборочный БГТУ.464653.002СБ.