

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ИСТОК» ИМЕНИ А.И. ШОКИНА»**

На правах рукописи



**КАРАСЕВ
МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ**

УДК 623.482

**МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ
МОДУЛЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ
X-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ**

**Специальность 2.2.2 - «Электронная компонентная база микро- и
нанoeлектроники, квантовых устройств»**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Пашковский Андрей Борисович

г. Фрязино 2021 г.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1.....	15
1.1. Активные фазированные антенные решетки для РЛС.....	15
1.2. Приемно-передающий модуль активной фазированной антенной решетки.....	16
1.2.1. Принцип работы ППМ в составе АФАР при передаче сигнала.....	17
1.2.2. Принцип работы ППМ в составе АФАР при приеме сигнала.....	19
1.2.3. Цель работы.....	19
1.3. Современные методы контроля электрических параметров в составе АФАР.....	20
1.4. Требуемые электрические характеристики для проверки работоспособности и выполнения калибровки ППМ.....	21
1.4.1. Коэффициент усиления приемного канала ППМ.....	21
1.4.2. Коэффициент шума приемного канала ППМ.....	23
1.4.3. Выходная мощность передающего канала ППМ.....	23
1.4.4. Постановка задачи.....	24
1.5. Современные методы детектирования сигналов.....	25
1.6. Современные аналоги ППМ с узлами контроля электрических параметров.....	28
ГЛАВА 2.....	31
2.1. Этапы разработки приемно-передающего модуля.....	31
2.2. Модернизируемый приемно-передающий модуль.....	33
2.3. Система контроля мощности ППМ.....	35
2.3.1. Принцип работы системы контроля мощности.....	36
2.3.2. Настройка основных элементов СКМ.....	37
2.3.3. АЧХ СКМ.....	39
2.4. Экспериментальная проверка работы системы контроля мощности в составе ППМ.....	40
2.4.1. Приемно-передающий модуль с системой контроля мощности.....	40
2.4.2. Конструкция СКМ.....	41

2.5. Применение межплатных прижимных СВЧ-соединителей в составе приемо-передающего модуля АФАР	43
2.5.1. Поверхностное контактное соединение модулей и коаксиально-волновой переход	43
2.5.2. СВЧ- и НЧ-соединители для ППМ	45
2.5.3. Контактно-измерительное устройство.....	46
2.5.4. Экспериментальная проверка электрических параметров СВЧ-соединителя	47
2.5.5. Воздействие высокого уровня мощности на прижимные СВЧ-соединители.....	51
2.5.6. Экспериментальная проверка работы СКМ в составе ППМ.....	53
2.5.7. Анализ полученных экспериментальных данных о работе СКМ в составе ППМ АФАР.....	60
2.6. Применение системы контроля мощности ППМ в составе АФАР	60
ГЛАВА 3.....	64
3.1. Методика контроля коэффициента усиления положительной обратной связью	64
3.1.1. Положительная обратная связь СВЧ-тракта	65
3.1.2. Структурная схема ППМ с узлами контроля коэффициента усиления положительной обратной связью	66
3.1.3. Методика контроля коэффициента усиления положительной обратной связью в составе ППМ.....	67
3.2. Экспериментальная проверка методики контроля коэффициента усиления ПРМ и ПРД с помощью ПОС	70
3.2.1. Структурная схема экспериментального стенда	70
3.2.2. Анализ экспериментальных данных	74
3.3. Проверка коэффициента усиления каналов в составе АФАР	75
ГЛАВА 4.....	79
4.1. Методика проверки коэффициента усиления приемного канала ППМ основанная на ответвлении части мощности передатчика в приемник	79
4.1.1. Структурная схема ППМ с узлами контроля коэффициента усиления с помощь внешнего сигнала, подаваемого на вход передающего канала .	79

4.1.2. Методика контроля коэффициента усиления приемного канала ППМ	81
4.2. Экспериментальная проверка коэффициента усиления приемного канала в составе ППМ по разработанной методике	82
4.2.1. Реализация контроля коэффициента усиления приемного канала в составе приемо-передающего модуля.....	82
4.2.2. Экспериментальная проверка методики контроля коэффициента усиления ППМ.....	83
4.2.3. Анализ полученных результатов эксперимента	86
4.3. Калибровка коэффициентов усиления приемных каналов в составе подрешетки антенной	88
ГЛАВА 5.....	89
5.1. Схема работы АФАР в режиме приема	89
5.1.1. Принцип работы подрешетки антенной в режиме приема сигнала.....	89
5.1.2. Помеховый сигнал высокого уровня мощности на входе приемного канала.....	90
5.2. Используемый метод ограничения мощности входящих сигналов.....	91
5.3. Методика защиты приемника обработки сигналов АФАР от высокого уровня входной мощности	92
5.3.1. Структурная схема защиты приемника обработки сигналов	92
5.3.2. Методика защиты приемника обработки сигналов.....	93
5.3.3. Рассеивание отраженного сигнала от защитного устройства в составе ППМ.....	94
5.3.4. Задержки реагирования защиты приемника обработки сигналов АФАР	96
5.4. Экспериментальная проверка методики защиты приемника обработки сигналов АФАР	96
5.4.1. Структурная схема экспериментального стенда	97
5.4.2. Методика проверки защиты приемника обработки сигналов.....	98
5.4.2. Анализ полученных данных экспериментальной проверки.....	98
5.5. Методика определения помехового сигнала в режиме реального времени	99

5.6. Методика проверки времени восстановления коэффициента передачи ПРМ при подаче высокого уровня мощности на приемный тракт.....	100
5.6.1. Методика проверки времени восстановления коэффициента передачи с использованием одного генератора сигналов	102
5.6.2. Методика проверки времени восстановления коэффициента передачи с использованием двух генераторов сигнала	105
5.6.3. Сравнение результатов эксперимента	108
ГЛАВА 6.....	110
6.1. Структурная схема приемо-передающего модуля АФАР с узлами оперативного контроля электрических параметров	110
6.2. Оценка времени проверки передающего канала	111
6.2.1. Контроль электрических параметров передающего канала с помощью системы контроля мощности в составе приемо-передающего модуля.	111
6.2.2. Контроль электрических параметров передающего канала с помощью узла проверки коэффициента усиления положительной обратной связью в составе приемо-передающего модуля.....	115
6.3. Оценка времени проверки приемного канала	118
6.3.1. Контроль электрических параметров приемного канала с помощью узла проверки коэффициента усиления положительной обратной связью в составе приемо-передающего модуля	119
6.3.2. Контроль электрических параметров приемного канала с помощью узла проверки коэффициента усиления используя собственный входной сигнал передатчика	120
6.4. Оценка работы защиты приемника	121
6.4.1. Методика измерения основных характеристик узла защиты приемника обработки сигналов АФАР в составе измерительного стенда	122
6.4.2. Применение электрических параметров, полученных с помощью узла защиты приемника обработки сигналов в составе АФАР	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128
ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Активные фазированные антенные решетки (АФАР), являются основой построения бортовых радиолокационных комплексов в настоящее время. АФАР позволяют решать широкий спектр задач сканирования пространства в реальном масштабе времени, что связано с высокой скоростью перемещения луча и возможностью изменения формы диаграммы направленности (ДН). АФАР включают в свой состав приемо-передающие модули (ППМ), обеспечивающие необходимые параметры излучения, приема отраженного сигнала и требуемые режимы работы АФАР под конкретные задачи радиолокационной станции (РЛС).

Разработки в области конструирования и проектирования ППМ, ведутся во многих российских и зарубежных компаниях: «API Technologies», «Cobham Sensor Systems», «Seekon», «Cassidian», ОАО «НПП «Пульсар», АО «НПФ «Микран», АО «Микроволновые системы», в том числе и на АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина».

В составе ППМ используется множество элементов, которые могут выйти из строя вследствие влияния внешних помех или различных воздействующих факторов в процессе эксплуатации. Отказавшие или неисправные ППМ оказывают влияние на точность определения дальности и угловых координат цели при штатной работе РЛС.

Для исключения влияния отказавших или неисправных каналов на форму ДН АФАР, необходима реализация контроля электрических параметров (ЭП) СВЧ-трактов ППМ. Для этого были разработаны схемотехнические решения минимально усложняющие общую схему, позволяющие отключать неисправные каналы до формирования ДН и производить калибровку (выравнивание) коэффициентов усиления каналов на основе результатов проверки ЭП.

Цель работы: разработка технических решений, позволяющих определять в режиме реального времени (в боевом режиме) с высокой точностью основные электрические параметры приемного и передающего тракта, для выполнения калибровки и оценки работоспособности приемо-передающих модулей в составе АФАР.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализируются существующие методы контроля электрических параметров ППМ;
- разрабатывается общая концепция оперативного контроля электрических параметров в составе ППМ;
- разрабатываются схемотехнические решения для реализации оперативного контроля каналов ППМ;
- разрабатываются алгоритмы вычислений и методики работы с контрольными сигналами исправности каналов ППМ;
- апробируются разработанные схемотехнические решения на экспериментальных измерительных стендах и в составе ППМ.

Объектами исследования являются приемо-передающие модули для АФАР X-диапазона частот.

Предметом исследования являются взаимодействие приемо-передающих модулей с активной фазированной антенной решеткой.

Научная новизна. В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Разработано оригинальное контактное устройство оперативного контроля, позволяющее проводить измерения ЭП ППМ, с поверхностным контактным типом соединения и отдельно межплатных прижимных СВЧ-соединителей с высокой точностью и повторяемостью результатов.

2. Предложен и успешно апробирован новый метод оперативного контроля коэффициентов усиления каналов ППМ положительной обратной связью. Новый метод позволяет за счет используемых СВЧ-аттенюаторов и СВЧ-фазовращателей в каналах, определять коэффициенты усиления трактов с высокой точностью и быстродействием, без применения дополнительного оборудования для настройки и калибровки параметров ППМ.

3. Предложен и успешно апробирован новый метод оперативного контроля коэффициента усиления приемных каналов ППМ с помощью внешнего входного сиг-

нала передающего канала. Новый метод позволяет за счет ответвления части мощности передатчика в приемник, провести проверку коэффициента усиления приемного канала без использования внешнего входного сигнала подаваемого на вход приемника. Использование нового метода в составе ППМ, позволило проводить оценку работоспособности приемных каналов ППМ и с высоким быстродействием производить калибровку ЭП в составе АФАР.

4. Предложен и успешно апробирован новый метод адаптивного изменения временных диаграмм. Применение нового метода в составе ППМ, позволило обеспечить помехозащищенность активных элементов приемного канала и создать необходимые условия для адаптивного режима работы с полным восстановлением штатного функционирования.

Научная новизна работы подтверждена двумя патентами Российской Федерации: патент РФ на изобретение №2713079 «Приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки СВЧ-диапазона» и патент РФ на изобретение №2730042 «Приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки СВЧ-диапазона».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика, основанная на введении положительной обратной связи, позволяет оценить коэффициент усиления приемного и передающего каналов ППМ за время менее 4 мкс.

2. Предложенная методика, основанная на ответвлении части мощности передающего канала в приемный, позволяет проводить проверку работоспособности приемного канала ППМ за 80 нс.

3. Предложенная методика адаптивного изменения временных диаграмм, основанная на определении параметров импульсного помехового сигнала за время не более 260 нс, дает возможность повысить помехозащищенность приемного канала.

Практическая ценность работы.

1. С помощью оригинального контактного устройства оперативного контроля впервые были проведены измерения ЭП ППМ, имеющих поверхностный контактный тип соединения. Результаты измерений позволили провести модернизацию

ППМ, что привело к повышению выходной мощности передающего тракта, снижению коэффициента шума и уменьшению неравномерности коэффициента усиления приемного тракта в изделиях, разработанных в рамках опытно-конструкторских работах (ОКР) «Аббат-И», «Аспирин-И» и «Аспирин-80». По данным работам было произведено несколько тысяч ППМ. В настоящее время ведется плановое производство многотысячной партии ППМ «Аспирин-80».

2. Предложенные схмотехнические решения по проверке коэффициента усиления каналов положительной обратной связью, реализованы в составе измерительной установки на производственном участке АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина» для обеспечения минимальных затрат времени на проверку основных ЭП ППМ при высоких темпах роста объема производств в рамках ОКР «Аспирин-80» и ОКР «Аналог-М». В дальнейшем оперативный контроль положительной обратной связью может быть реализован в составе ППМ новых поколений.

3. Предложенные схмотехнические решения по проверке коэффициента усиления за счет ответвления части мощности передатчика в приемник, реализованы в ОКР «Аналог-2» и «Аналог-М». По данным работам произведено несколько тысяч ППМ. В настоящее время налажено производство ежегодной многотысячной партии ППМ «Аналог-М» для предприятия заказчика.

4. Предложенные схмотехнические решения по защите приемного канала от воздействий внешних помеховых сигналов, реализованы в составе экспериментальной установки по определению паразитного влияния соседних каналов друг на друга в составе АФАР. В дальнейшем защита приемного канала будет реализована в приемных модулях, изготавливаемых в рамках ОКР «Посланник-ПМ-И» с предприятием заказчика, и может быть реализована в составе ППМ новых поколений.

Реализация, практическая значимость и внедрение результатов работы.

Одним из наиболее перспективных направлений в области современной СВЧ-техники является развитие многофункциональных АФАР. В данный момент ни одна из серийных АФАР не обладает возможностью самокалибровки ЭП в боевом режиме (режиме реального времени). Для обеспечения устойчивости работы АФАР необходимо оперативно проводить оценку работоспособности ППМ. В ходе

работы были предложены методы и схемотехнические решения по оперативному контролю ЭП ППМ, которые при должной реализации позволяют провести быструю проверку и самокалибровку подрешетки антенной в боевом режиме. Реализация методов оперативного контроля в диссертационной работе, является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит существенно повысить многофункциональность ППМ в составе АФАР, значительно упростить и ускорить проверку ЭП каналов, а также исключить работу АФАР с неисправными ППМ искажающими форму диаграммы направленности.

Научные результаты диссертационной работы использованы в ОКР АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина» по созданию ППМ, входящих в состав АФАР радиолокационной станции (РЛС) X-диапазона частот. Впервые разработаны и внедрены ППМ с поверхностным контактным типом соединения для АФАР X-диапазона частот, разрабатываемые по заказу предприятия заказчика. Разработаны и внедрены ППМ с ответвлением части мощности передатчика в приемник, используемые для проверки работоспособности в составе АФАР РЛС X-диапазона частот, разрабатываемые предприятием заказчика. Внедрение результатов подтверждается соответствующими актами.

Достоверность полученных результатов.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждается апробацией методов и технических решений на сертифицированных и поверенных лабораторно-измерительных стендах АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», а также в составе конструкций ППМ, разрабатываемых в процессе выполнения ОКР в АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина».

Апробация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на: 29-й, 30-й и 31-й международной научно-технической конференции «КрыМиКо-2019», «КрыМиКо-2020» и «КрыМиКо-2021» (г. Севастополь, сентябрь 2019-2021г.г.); 6-й, 7-й, 8-й и 10-й всероссийских научно-технических конференциях «Электроника и микроэлектроника СВЧ»

(г. Санкт-Петербург, май-июнь 2017-2019г.г. и 2021г.); 6-й, 7-й конференции молодых ученых и специалистов АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина» (г. Фрязино, апрель 2016г. и 2017г.).

Публикации. Материалы диссертации с необходимой полнотой изложены в 21 научной работе, опубликованной соискателем ученой степени. Из них работ, опубликованных в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, – 8 (5 из них без соавторов), 11 работ - в трудах международных и всероссийских конференций (1 без соавторов), 2 патента на изобретение. Издано 1 учебное пособие.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 151 машинописных страницах и состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, списка литературы. Графический материал представлен в 94 рисунках и 8 таблицах. Список использованных источников включает 164 наименования.

Содержание и результаты работы.

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, представлены основные задачи, решаемые в области исследования.

В первой главе проведен краткий обзор современных ППМ со встроенными узлами проверки работоспособности каналов. Обзор показал, что, не смотря на большое разнообразие разработок, методы проверки имеют схожий принцип. Отличием является только конструктивное исполнение узлов и применяемых элементов детектирования, что влияет на точность получения информации о работоспособности каналов.

Реализации контроля ЭП каналов с высокой точностью, максимальным быстродействием и минимальным усложнением схемы, во избежание паразитного влияния трактов внутри ППМ, можно добиться используя схемы узлов с применением развязывающих и детектирующих элементов, позволяющих получать контрольные сигналы исправности.

После проведенного обзора сделаны выводы, что применяемые методы контроля электрических параметров фирмами-разработчиками не дают полной картины о состоянии ППМ в процессе его работы, поэтому направление по обеспечению оперативного контроля электрических параметров является актуальным.

Во второй главе представлена структурная схема ППМ, включающего в себя два приемных канала и один передающий канал. Описываются основные принципы контроля работоспособности представленной схемы. Ставится задача ввода оперативного контроля электрических параметров для проверки работоспособности ППМ. В качестве устройства контроля амплитуды сигнала предложено использовать систему контроля мощности, включающую в себя детекторы и усилители. Рассматривается принцип контроля порогового значения выходной мощности за счет введения детекторной секции в передающий канал. Представляется реализация системы контроля мощности в составе приемо-передающего модуля с поверхностным контактным типом соединения (ПКТС). Рассматривается принцип передачи СВЧ-сигнала через прижимной СВЧ-соединитель. Представляется оригинальное контактное устройство для решения задачи измерения и контроля электрических параметров приемо-передающих модулей с ПКТС и прижимных СВЧ-соединителей. Проводятся экспериментальные исследования СВЧ-соединителя по показателям СВЧ-потерь и величине проходной мощности (с учетом технологического запаса). Проводятся исследования электрических параметров системы контроля мощности приемо-передающих модулей с ПКТС. Анализируются полученные данные временных задержек реагирования системы контроля мощности, позволяющие оценить продолжительность оперативного контроля канала в составе АФАР. Описываются дальнейшие исследования применения системы контроля мощности в составе передающего канала для повышения точности и стабильности АЧХ в X-диапазоне частот.

В третьей главе предложена и представлена к рассмотрению методика оперативного контроля коэффициента усиления приемного и передающего каналов с помощью положительной обратной связи (ПОС). Представлены формулы для расчета коэффициента усиления проверяемого канала. Представлен экспериментальный

стенд для имитации процедуры оперативного контроля коэффициента усиления с помощью положительной обратной связи в составе конструкции ППМ. Приведены результаты экспериментальной проверки партии ППМ по коэффициенту усиления приемного и передающего каналов, с наглядными иллюстрациями. Проведен анализ результатов эксперимента и на его основе сделаны выводы о правильности работы схемы и методики вычислений коэффициентов усиления проверяемых каналов ППМ. На основе проведенных исследований был разработан базовый алгоритм проверки коэффициента усиления каналов ППМ, который может быть использован в составе АФАР. Проведена оценка продолжительности проверки коэффициента усиления одного канала АФАР по разработанному алгоритму. Определено дальнейшее направление исследований по реализации разработанных схемотехнических решений в составе ППМ и АФАР.

В четвертой главе предложена и представлена к рассмотрению методика оперативного контроля коэффициента усиления приемного канала за счет ответвления части мощности передатчика в приемник. Представлена реализация схемы в составе модернизируемого ППМ с двумя приемными каналами. Рассмотрен принцип вычисления коэффициента усиления канала ППМ по разработанной методике. Представлены расчетные формулы для проектирования элементов схемы контроля коэффициента усиления. Проведен конструктивный анализ и исследование влияния СВЧ-трактов ПРМ и ПРД при совмещении схемы проверки коэффициента усиления приемного канала и схемы проверки коэффициента усиления положительной обратной связью. Представлен экспериментальный образец ППМ с реализацией встроенного контроля коэффициента усиления. Представлена экспериментально-измерительная установка для проверки электрических параметров ППМ по разработанной методике. Представлены сравнительные результаты оценки коэффициентов усиления, измеренных стандартными методиками и коэффициентов усиления, полученных с использованием методики оперативного контроля. Проанализированы результаты проведенных исследований и экспериментальной проверки. Описано дальнейшее направление исследований в составе АФАР.

В пятой главе рассмотрены причины возникновения импульсных помеховых сигналов высокого уровня мощности на входе приемного канала. Описано влияние такого воздействия на ППМ в целом. Предложена и представлена схема и методика отключения питания активных элементов приемного канала. Приведены формулы для расчета электрических параметров элементов, входящих в состав схемы. Произведен расчет задержек реагирования и восстановления приемного канала ППМ после воздействия помехового сигнала. Представлен измерительный стенд для экспериментальной проверки разработанных схемотехнических решений. Проведены измерения времени реагирования разработанной схемы при воздействии СВЧ-сигнала высокого уровня мощности на вход приемного канала. На основе полученных экспериментальных данных, разработана методика адаптивного изменения временных диаграмм работы приемного канала для восстановления штатного режима функционирования. Методика основывается на измерении параметров помехового сигнала и изменении режима работы ППМ. Для выполнения корректировки сигналов управления, разработана методика измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия на вход импульса высокой мощности. Проанализированы полученные экспериментальные результаты измерений образцов ППМ разного типа по разработанной методике. Получены необходимые данные для ввода разработанной схемы в состав каждого типа измеренных ППМ.

В шестой главе представлена разработанная общая структурная схема приемо-передающего модуля АФАР с узлами оперативного контроля электрических параметров. Рассмотрены основные принципы проектирования и конструирования приемо-передающего модуля и основные достоинства такого ППМ при работе в составе АФАР. Описаны эксплуатационные рекомендации по использованию узлов оперативного контроля в составе измерительных установок и АФАР. Описывается применение комбинаций КС для определения электрических параметров каналов в различных поставленных задачах. Рассмотрены направления для дальнейших исследований в области контроля электрических параметров каналов АФАР.

ГЛАВА 1

1.1. Активные фазированные антенные решетки для РЛС

В настоящее время перспективным направлением при разработке радиолокационных станций (РЛС) [1], является использование активных фазированных антенных решеток (АФАР) [2]. Такие изделия широко применяются в бортовых, наземных, корабельных и космических РЛС. Примером последних разработок в этой области могут служить системы обнаружения, установленные в истребители Су-57, МиГ-29, F-15С, F-16С, J-10В, J-15 и EF-2000. РЛС с АФАР позволяют выполнять несколько задач сразу: поиск и обнаружение цели, излучение помехи [3], радиотехническая разведка (РТР), картографирование местности.

РЛС с ФАР при выходе из строя передатчика становится «слепая», а при применении АФАР при выходе из строя 10-15% от общего количества модулей, остальные приемо-передающие модули (ППМ) остаются работать в штатном режиме [4]. Данное преимущество АФАР позволяет повысить эффективность РЛС, работать на нескольких частотах сразу, а также оставаться в работоспособном состоянии даже в самых сложных боевых условиях.

АФАР формируется из отдельных подрешеток (линеек или ячеек) [5]. Подрешетка антенная – это приемо-передающее устройство, предназначенное для формирования диаграммы направленности, усиления принимаемого/передаваемого сигнала, формирования сигналов канала управления и канала данных [6]. Расположение ППМ в составе подрешетки определяется условиями внутренней компоновки всех элементов в целом. Условное изображение компоновки ППМ в подрешетке АФАР, показано на рисунке 1.

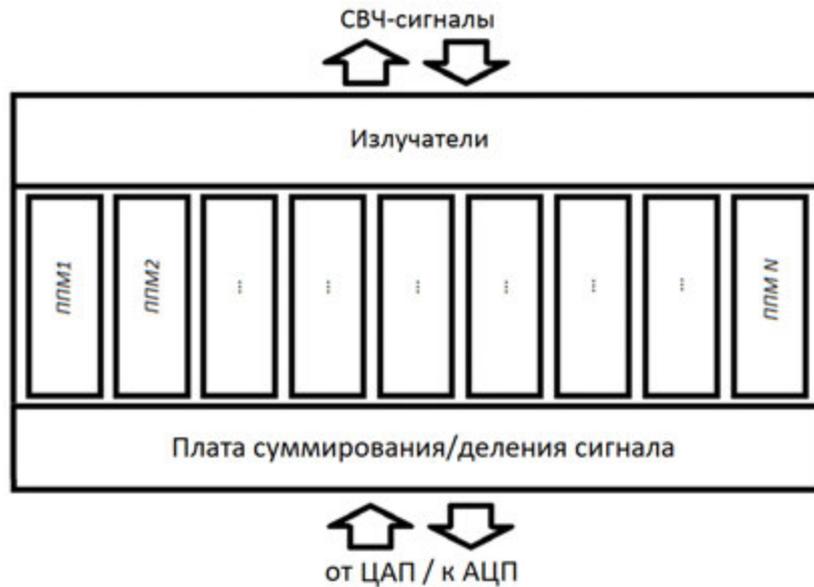


Рис. 1. Условное изображение компоновки ППМ в подрешетке АФАР

При формировании АФАР из подрешеток антенных осуществляется комплексная сборка.

Структурные схемы построения АФАР включают в свой состав множество узлов. Такие схемы могут отличаться друг от друга, но основными и наиболее важными элементами всей АФАР, являются приемо-передающие модули.

1.2. Приемно-передающий модуль активной фазированной антенной решетки

Приемо-передающий модуль – элемент АФАР, позволяющий усиливать передаваемый или принимаемый сигнал в широкой полосе рабочих частот, а также задавать амплитудно-фазовое распределение этого сигнала для формирования требуемой формы диаграммы направленности [7].

Типовая структурная схема приемно-передающего модуля АФАР [8], изображена на рисунке 2.

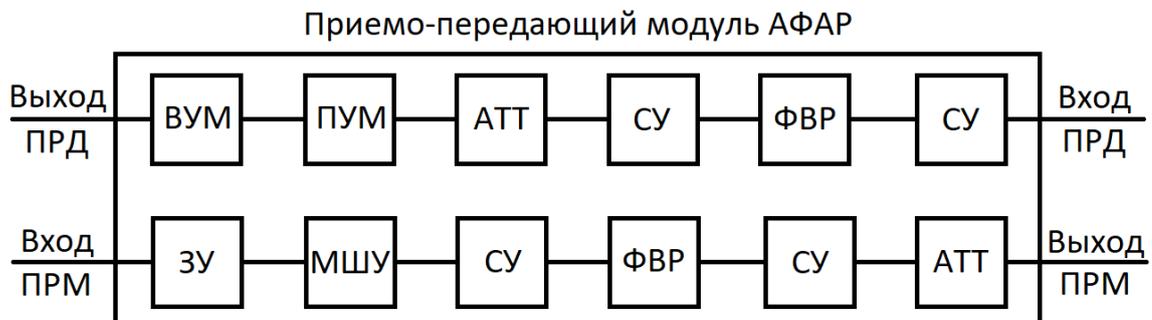


Рис. 2. Типовая структурная схема приемно-передающего модуля АФАР
В состав ППМ [2,8,9] входят:

- защитное устройство (ЗУ);
- малошумящий усилитель (МШУ);
- согласующие усилители (СУ);
- ступенчатые фазовращатели (ФВР) [10,11];
- ступенчатые аттенюаторы (АТТ) [10,11];
- предварительный усилитель мощности (ПУМ) [12];
- выходной усилитель мощности (ВУМ) [12].

В данной схеме дополнительно могут использоваться ферритовые развязывающие устройства, позволяющие совместить вход приемного канала (ПРМ) с выходом передающего канала (ПРД) и наоборот. В некоторых разработках в составе конструкции используются СВЧ-переключатели, установленные на входе/выходе модуля. Такое конструктивное решение является не эффективным, так как влечет за собой возникновение нежелательных СВЧ-потерь мощности сигнала на выходе передатчика, что приводит к снижению общего потенциала РЛС. Также существуют схемотехнические решения объединения входа приемного и передающего каналов без использования ферритовых развязывающих устройств или переключателей, а с помощью согласованных-рассогласованных цепей. Такое решение имеет ограничение по уровню выходной мощности ППМ.

Очевидно, что в составе ППМ могут применяться дополнительные элементы СВЧ-трактов, позволяющие обеспечить различные поставленные задачи при эксплуатации, но базовое построение и принципы работы приема-передающего модуля всегда остаются неизменными.

1.2.1. Принцип работы ППМ в составе АФАР при передаче сигнала

СВЧ-сигнал [13], поступает на вход ПРД ППМ. Задается амплитудно-фазовое распределение сигнала. Согласующие усилители компенсируют СВЧ-потери в АТТ и ФВР. Сигнал поступает на ПУМ. ПУМ усиливает сигнал в режиме насыщения. Максимальная выходная мощность ПУМ рассчитана таким образом, чтобы ВУМ [14,15] при подаче ее на его вход, находился в режиме насыщения на 3 - 5 дБ (в зависимости от режимов эксплуатации ППМ). Сигнал усиливается ВУМ и по-

ступает на распределительную систему. При работе на передачу, сигналы, поступившие на антенное полотно АФАР, суммируются по амплитуде в определенном направлении сканирования, так как имеют заданные состояния фаз. Формирование ДН в направлении Θ условно, изображено на рисунке 3.

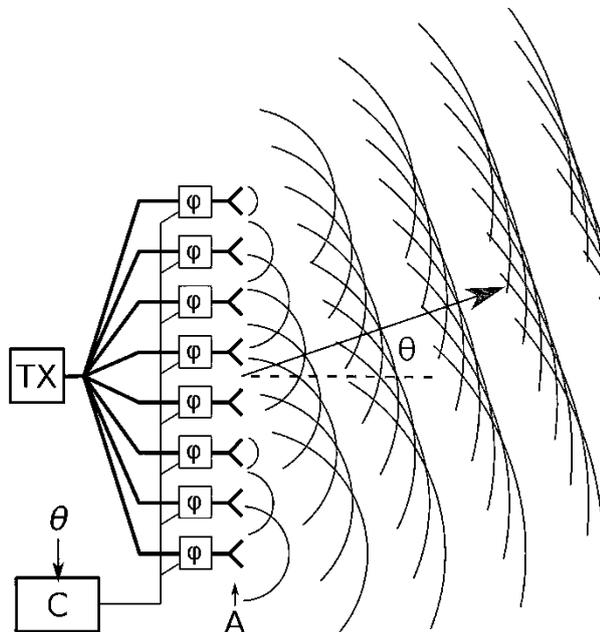


Рис. 3. Распространение радиоволн с антенного полотна АФАР

Типовая форма ДН АФАР при работе в режиме передачи сигнала, изображена на рисунке 4.

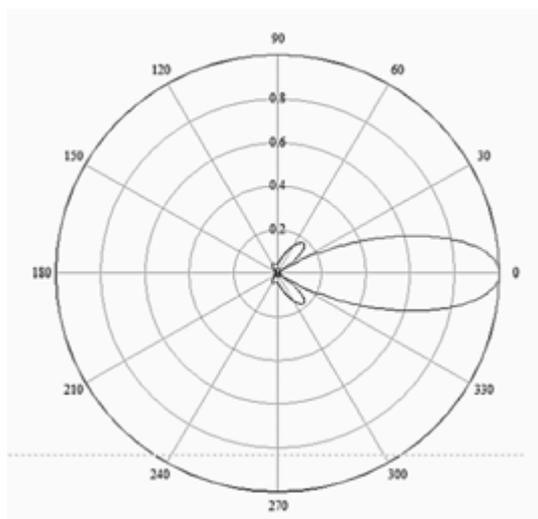


Рис. 4. Типовая форма диаграммы направленности АФАР при работе в режиме передачи сигнала

Форму ДН можно изменять в зависимости от режима работы РЛС за счет управления амплитудой и фазой каждого ППМ по отдельности.

1.2.2. Принцип работы ППМ в составе АФАР при приеме сигнала

Отраженный от объекта сигнал в заданной области сканируемого пространства, поступает на излучатели. Сигнал поступает на вход приемного канала ППМ. Если сигнал имеет допустимый уровень входной мощности, то ЗУ, не внося СВЧ-потерь, пропускает его на вход МШУ. Если сигнал имеет высокий уровень входной мощности, то ЗУ вносит большие СВЧ-потери в сигнал и ограничивает его до безопасного уровня (при этом весь приемный канал находится в режиме глубокого насыщения и информацию о цели получить затруднительно). Сигнал усиливается МШУ и СУ. Задается необходимая амплитуда и фаза, за счет установленных аттенюаторов и фазовращателей в приемном канале. После каждого аттенюатора или фазовращателя необходимо дополнительное усиление сигнала (установка усилителей в СВЧ-тракт) для компенсации возникающих СВЧ-потерь. Далее сигнал с выхода приемного канала поступает на СВЧ-плату суммирования. После этого производится обработка полученных сигналов для получения требуемой информации о цели в заданной области сканируемого пространства (расстояние до объекта, его скорость, угловые координаты).

1.2.3. Цель работы

В составе ППМ используется множество элементов, которые могут выйти из строя вследствие влияния внешних помех или различных воздействующих факторов в процессе эксплуатации. Отказавшие или неисправные ППМ оказывают влияние на точность определения дальности и угловых координат цели при штатной работе РЛС.

Для исключения влияния отказавших или неисправных каналов на форму ДН АФАР, необходима реализация контроля электрических параметров (ЭП) СВЧ-трактов ППМ. Актуально разработать схемотехнические решения минимально усложняющие общую схему, которые позволят отключать неисправные каналы до формирования ДН и производить калибровку (выравнивание) коэффициентов усиления каналов на основе результатов проверки ЭП.

1.3. Современные методы контроля электрических параметров в составе АФАР

Основным методом контроля выходной мощности передающего тракта является контроль токов потребления этого канала. На основе измеряемых токов в процессе работы АФАР, можно оценить мощность, находящуюся на выходе ПРД всех ППМ. Расчет выходной мощности в данном случае будет производиться по формуле [19]:

$$\Sigma P_{\text{вых.ПРД}} = I_{\text{ПРД}} \times U_{\text{ПРД}} \times \text{КПД}_{\text{ВУМ}} \quad (1)$$

где $\Sigma P_{\text{вых.ПРД}}$ – суммарная выходная мощность ПРД; $I_{\text{ПРД}}$ – ток потребления ПРД в режиме насыщения; $U_{\text{ПРД}}$ – напряжение питания ПРД; $\text{КПД}_{\text{ВУМ}}$ – коэффициент полезного действия ВУМ [20].

Такой метод не позволяет точно вычислить действующее значение выходной мощности передающего канала. Связано это с тем, что $\text{КПД}_{\text{ВУМ}}$ применяемых ВУМ, может варьироваться в диапазоне от 23% до 28%. Также при наличии неисправных ППМ в составе АФАР, токи потребления по цепям питания этих модулей в некоторых случаях могут превышать предельное значение и вызывать срабатывание защиты источника питания [21,22]. Но применение такого метода оценки работоспособности передающих каналов, позволяет быстро оценить потенциал станции и сформировать необходимые данные для дальнейшей работы.

Основным методом контроля электрических параметров приемного канала ППМ в составе АФАР, является оценка общей суммы токов потребления всех каналов ПРМ. Общая сумма токов потребления вычисляется по формуле:

$$\Sigma I_{\text{ПРМ}} = I_{\text{ПРМ ППМ 1}} + I_{\text{ПРМ ППМ 2}} + \dots + I_{\text{ПРМ ППМ N}} \quad (2)$$

где $\Sigma I_{\text{ПРМ}}$ – суммарное значение токов потребления каналов ПРМ; $I_{\text{ПРМ ППМ 1}}$ – ток потребления приемного канала ППМ №1 (в подрешетке антенной); $I_{\text{ПРМ ППМ 2}}$ – ток потребления приемного канала ППМ №2; $I_{\text{ПРМ ППМ N}}$ – ток потребления приемного канала №N.

Такой метод позволяет приблизительно рассчитать количество работоспособных каналов. Неточность при расчете связана с тем, что суммарное значение токов потребления каждого ППМ в режиме ПРМ, варьируется в диапазоне от 54 мА до

67 мА. При таком разбросе токов потребления точность определения исправных каналов будет составлять 80%.

Пример. АФАР состоит из 1000 каналов. Суммарное токопотребление решетки в режиме приема составляет 61 Ампер. Если предположить, что все приемные каналы имеют максимальный ток потребления (67 мА), то можно сделать вывод что 90 каналов являются неисправными. Но такой вывод не является верным. Некоторые из модулей могут работать по нижнему пределу токопотребления (в конкретном случае он равен 61 мА). Следовательно, для данного примера точность определения исправности каналов составляет 90 %.

После рассмотрения приведенных выше методов можно сделать вывод, что контроль электрических параметров должен осуществляться с высокой точностью, в автоматическом режиме с высоким быстродействием, быть в составе каждого ППМ по отдельности и иметь возможность подстройки под изменение задач в режиме реального времени.

1.4. Требуемые электрические характеристики для проверки работоспособности и выполнения калибровки ППМ

Приемо-передающий модуль имеет множество электрических параметров, которые должны быть обеспечены для нормальной работы АФАР. Основными из них являются: коэффициент усиления ПРМ, суммарный коэффициент шума ПРМ [23,24] и выходная мощность ПРД.

1.4.1. Коэффициент усиления приемного канала ППМ

В составе приемного канала ППМ используются активные элементы на основе полевых или биполярных транзисторов. Они обеспечивают усиление сигнала по мощности. Коэффициент усиления – это отношение мощности выходного сигнала к мощности входного. Коэффициент усиления рассчитывается по формуле [25]:

$$K_{y \text{ ПРМ}} [\text{раз}] = P_{\text{вых ПРМ}} [\text{мВт}] / P_{\text{вх ПРМ}} [\text{мВт}] \quad (3)$$

где $P_{\text{вых ПРМ}}$ – мощность на выходе приемного канала; $P_{\text{вх ПРМ}}$ – мощность на входе приемного канала; $K_{y \text{ ПРМ}}$ – коэффициент усиления приемного канала.

Полученное значение в «раз» необходимо перевести в единицы «децибел» по формуле [25]:

$$K_{y \text{ ПРМ}} [\text{дБ}] = 10 \times \text{Log} (K_{y \text{ ПРМ}} [\text{раз}]) \quad (4)$$

Типовая характеристика зависимости выходной мощности от входной мощности для приемного канала ППМ, изображена на рисунке 5.

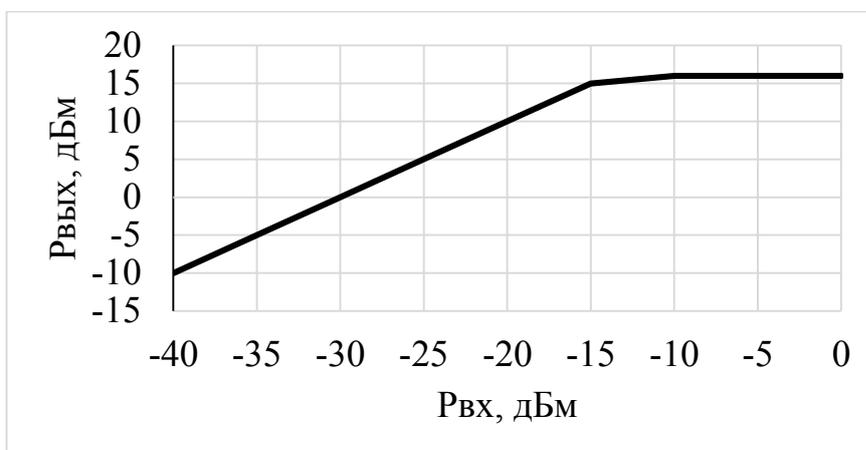


Рис. 5. Типовая характеристика коэффициента усиления приемного канала ППМ по мощности

На рисунке 5 в качестве примера приведена реальная характеристика приемного канала ППМ с коэффициентом усиления 30 дБ. Как видно из рисунка 5, при входной мощности -15 дБм (31 мкВт), усилители канала ПРМ входят в режим ограничения и мощность на выходе ПРМ будет иметь практически постоянную величину. Связано это с переходом в режим насыщения полевых или биполярных транзисторов в составе согласующих усилителей. Вызвать такой режим работы приемного канала может слишком высокий уровень мощности приходящего отраженного сигнала при приближении цели, облучение сигналами-помехами, направленными от систем радиоэлектронной борьбы или паразитными сигналами с передающих каналов при неправильном проектировании антенной решетки. В таком режиме усилитель перестает усиливать приходящий сигнал. Поэтому для нормальной работы приемного канала, требуется работать в линейном режиме усиления.

Из-за не идеальности технологии производства транзисторных усилителей, их коэффициент усиления может различаться. Для того, чтобы выровнять коэффициент усиления и сформировать требуемую ДН антенной решетки, в составе ППМ используются ступенчатые аттенуаторы. Такие устройства позволяют уменьшить

амплитуду выходного сигнала и тем самым изменить коэффициент усиления приемного тракта до требуемого значения.

1.4.2. Коэффициент шума приемного канала ППМ

Усилители, входящие в состав приемного канала, не являются идеальными. Они вносят в полезный сигнал собственные «шумы». Коэффициент шума характеризует вносимые «шумы» в полезный сигнал. Любой реальный усилитель усиливает шумы на своем входе, которые являются составной частью принимаемого/передаваемого сигнала. Также усилитель добавляет собственные шумы и из-за этого вклад «шумов» [26] на выходе усилителя всегда больше, чем на входе.

Если значения коэффициентов шума каждого элемента приемного канала приемно-передающего модуля известны, то можно вычислить суммарный коэффициент шума ПРМ по формуле [27]:

$$\begin{aligned} \Sigma K_{ш \text{ ПРМ}} = R_{\text{пасс. эл.}} + K_{ш1} + ((K_{ш2}-1)/K_{y1}) + \\ + ((K_{ш3}-1)/K_{y1} \times K_{y2}) + \dots + ((K_{шN}-1)/K_{y\beta}) \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Sigma K_{ш \text{ ПРМ}}$ – суммарный коэффициент шума всех элементов приемного тракта; $R_{\text{пасс. эл.}}$ – потери в пассивных элементах до первого усилительного каскада; $K_{ш1}$ – коэффициент шума первого усилителя; $K_{ш2}$ – коэффициент шума второго усилителя; K_{y1} – коэффициент усиления первого усилителя; $K_{ш3}$ – коэффициент шума третьего усилителя; K_{y2} – коэффициент усиления второго усилителя; $K_{шN}$ – коэффициент шума N-усилителя; $K_{y\beta}$ – произведение коэффициентов усиления до N-усилителя.

В данной формуле расчеты производятся в «размах». Зная уровень собственных шумов на выходе АФАР и коэффициент усиления можно рассчитать показатель качества антенны (G/T) [28,29].

1.4.3. Выходная мощность передающего канала ППМ

Электрический параметр «выходная мощность передающего канала» во многом определяет дальность работы РЛС [30]. При суммировании выходной мощности передающих каналов АФАР (к примеру, более 1000 каналов в решетке и при $P_{\text{вых}} \geq 10$ Вт на выходе ПРД каждого ППМ), на выходе передающей антенны мощ-

ность будет составлять более 10 кВт. Дальность действия РЛС определяется энергией излученного радиоимпульса. Поэтому при проектировании АФАР мощность на выходе передающего канала ППМ должна быть максимальной с учетом возможности обеспечения повышенного теплоотвода от элементов АФАР.

При проектировании передающего канала ППМ обязательным условием для нормальной работы АФАР является обеспечение режима насыщения ВУМ. Поэтому усилители до ВУМ [31] должны выходить в режим насыщения позже чем ВУМ. Связано это требование с тем, что выходная мощность должна быть неизменной даже при уменьшении входной мощности или влияния внешних воздействующих факторов. Выполнение такого требования обеспечивает стабильность работы системы в целом при эксплуатации.

Выходная суммарная мощность всех ППМ рассчитывается по формуле (1). Для того чтобы узнать истинное значение выходной мощности АФАР требуется провести измерение этого параметра (потенциала АФАР) на специализированном измерительном оборудовании с учетом всех погрешностей.

1.4.4. Постановка задачи

Перечисленные основные электрические параметры ППМ требуется контролировать в составе АФАР. Для того чтобы проводить автоматическую калибровку (выравнивание) основных электрических параметров до формирования ДН или выполнять корректировку ДН в режиме реального времени, необходимо:

- выбрать методы детектирования для получения контрольных сигналов исправности (КСИ);
- рассмотреть современные аналоги приемо-передающих модулей, в составе конструкций которых использованы узлы контроля электрических параметров;
- разработать базовую схему получения КСИ для определения состояния канала и вычисления близкого значения основных электрических параметров для быстрого реагирования под изменяющиеся задачи в реальном масштабе времени;
- на основе базовой схемы получения КСИ разработать схемы контроля, позволяющие с помощью специальных методик определять электрические параметры каналов ППМ с высокой точностью и быстродействием;

- разработать методики и алгоритмы вычисления электрических параметров каналов для разработанных схем контроля;
- разработать схему защиты ППМ от внешних воздействующих сигналов-помех, возникающих при работе РЛС и АФАР;
- разработать способ и алгоритмы адаптации защиты ППМ под изменяющиеся задачи в реальном масштабе времени;
- разработать общую структурную схему ППМ с узлами оперативного контроля, позволяющую за счет комбинирования КСИ, с высокой точностью получать данные об электрических параметрах каналов с минимальными затратами по времени.

1.5. Современные методы детектирования сигналов

Для контроля электрических параметров ППМ в данной работе, выбраны распространенные в СВЧ-технике амплитудные детекторы (АД) [32,33,34]. АД лучше всего подходят для выделения модулирующего сигнала СВЧ-мощности передающего канала [35].

Амплитудный детектор – устройство, на выходе которого создается напряжение в соответствии с законом модуляции амплитуды входного гармонического сигнала [36]. Если на входе АД действует напряжение $U_{вх}$, модулированное по амплитуде колебанием с частотой F , то график изменения этого напряжения во времени и его спектр имеют вид, показанный на рисунке 6.

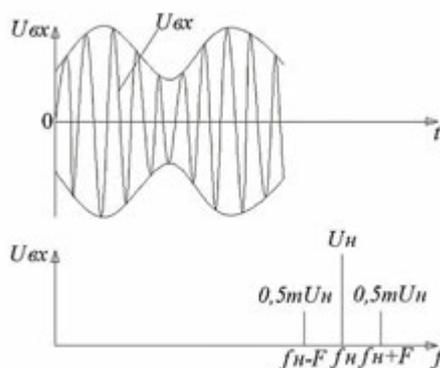


Рис. 6. График изменения напряжения во времени и его спектр

Напряжение на выходе детектора E_d (рис. 7) должно меняться в соответствии с законом изменения огибающей входного напряжения $U_{вх}$.

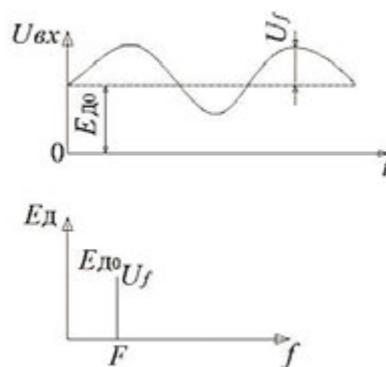


Рис. 7. Напряжение на выходе детектора

Задача амплитудного детектирования не сводится к простой фильтрации с помощью линейной цепи с постоянными параметрами (линейная цепь с постоянными параметрами не создает составляющих с новыми частотами) [37]. Новые частотные составляющие могут возникнуть только при прохождении сигнала через параметрическую линейную цепь либо через нелинейную цепь [38]. Следовательно, в зависимости от способа выполнения АД их можно подразделить на синхронные детекторы, использующие линейную цепь с периодически меняющимися параметрами, и детекторы на основе нелинейной цепи. В свою очередь, в зависимости от типа электронного прибора, реализующего нелинейную цепь, АД подразделяют на диодные и транзисторные. На практике наиболее часто используют диодные АД [39].

Диодные амплитудные детекторы в настоящее время производятся множеством отечественных и зарубежных компаний в разном конструктивном исполнении. Детекторный диод (ДД) должен иметь минимальные габаритные размеры для использования в составе конструкции ППМ, поэтому он должен быть выполнен в бескорпусном исполнении.

В работе [32,39] рассмотрены характеристики диода ZB-27 компании АО «НПФ «Микран», изображенного на рисунке 8.



Рис. 8. Бескорпусной GaAs диод ZB-27

ZB-27 - бескорпусной GaAs диод с балочными выводами, предназначенный для работы в составе гибридно-интегральных СВЧ модулей с общей герметизацией. ZB-27 применяется в схемах детекторов мощности и преобразователей частоты СВЧ сигнала. ZB-27 обладает высоким быстродействием, широкими динамическими и частотными диапазонами преобразования сигнала с эффективной работой в режиме без смещения.

В рассматриваемой статье [32] ZB-27 используется в составе конструкции портативного измерителя мощности СВЧ сигналов в полосе от 50МГц до 6ГГц. Динамический диапазон измерителя мощности составляет 70 дБ (от -50дБм до -20дБм). Применение такого ДД в составе ППМ для контроля ЭП в **Х-диапазоне частот** не является возможным.

В работе [33] рассмотрены характеристики диода HSCH-9161 компании Keysight Technologies (рисунок 9) выполненного по GaAs-технологии.

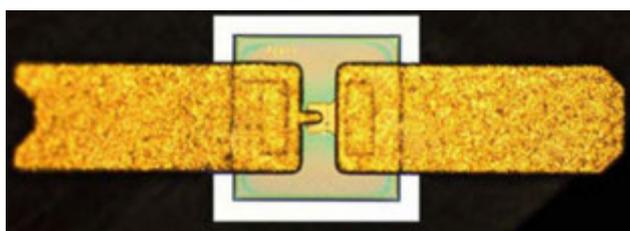


Рис. 9. Диод HSCH-9161 компании Keysight Technologies

ДД имеет малое пробивное напряжение и рассчитан на работу в составе узлов малой мощности. ВВХ характеристика данного диода при малых значениях мощности является абсолютно линейной. Применение такого ДД в составе ППМ для контроля ЭП не является возможных из-за необходимости **импортозамещения ЭКБ**.

В работе [34] рассматривается разработка детектора мощности в составе конструкции которого используется ДД Д-010 (рисунок 10). Д-010 применяется и производится Российским предприятием АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина».

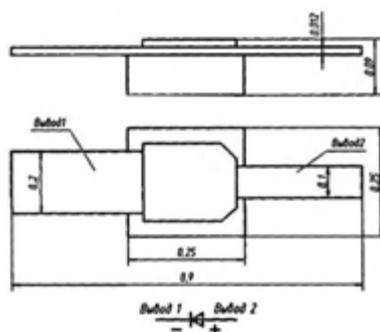


Рис. 10. Детекторный диод Д-010

Д-010 имеет возможность работы с сигналами достаточно высокой мощности в X-диапазоне частот. Применение Д-010 в составе ППМ для контроля ЭП является **приоритетным**.

Проведенный обзор образцов современных отечественных и зарубежных детекторных диодов позволил сделать вывод, что для контроля электрических параметров ППМ, можно использовать любой тип ДД, но следует обращать внимание на АЧХ, ВВХ и предельно-допустимые режимы его эксплуатации.

Для детектирования СВЧ-сигналов, проходящих через линии передачи СВЧ-трактов ППМ и получения КСИ, выбран ДД Д-010 производства АО «НПП «Исток» им. Шокина». Д-010 полностью подходит для решения задачи контроля ЭП каналов ППМ в X-диапазоне частот.

1.6. Современные аналоги ППМ с узлами контроля электрических параметров

Для решения поставленной задачи разработки оперативного контроля ЭП ППМ, необходимо провести обзор современных отечественных и зарубежных аналогов ППМ использующих в составе конструкции узлы контроля электрических параметров. Необходимо рассматривать изделия, работающие в X-диапазоне частот.

Во многих литературных источниках рассматривается ППМ производства компании Eurofighter Typhoon's CAPTOR-E radar (рисунок 11).

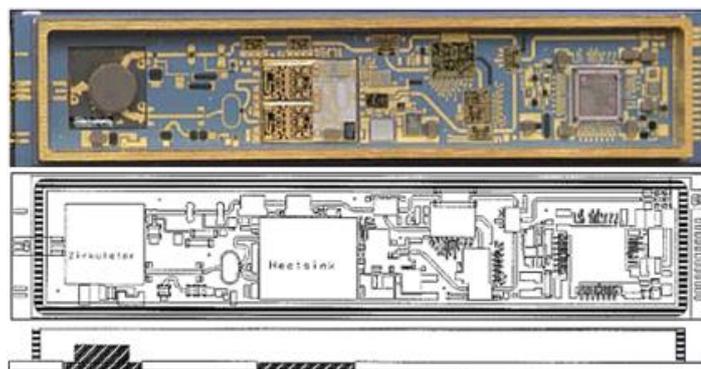


Рис. 11. ППМ производства компании Eurofighter Typhoon's CAPTOR-E radar

В составе модуля имеется встроенный узел контроля выходной мощности, выполненный на детекторном диоде HSCH-9161 [33]. Использование диода HSCH-9161 позволило добиться определения выходной мощности передающего канала с высокой точностью, за счет линейности ВВХ. Выходная импульсная мощность ППМ составляет 6 Вт. Использование рассмотренных схемотехнических решений для решения задачи оперативного контроля ЭП в составе разрабатываемого ППМ приоритетно.

В работе [40] представлен ППМ, производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» (рисунок 12).

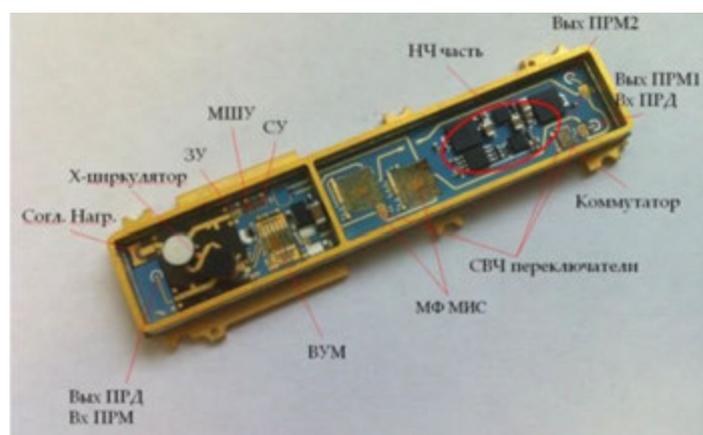


Рис. 12. ППМ производства АО «НПП «Исток» им. Шокина»

ППМ в своем составе имеет узел контроля мощности выполненный на основе ДД 2А131А-3. Выходная мощность ППМ составляет 4 Вт. В данной работе недостатком показанного узла является нелинейность получаемой характеристики срабатывания ДД в зависимости от частоты. Нелинейность связана с рассогласова-

нием плеч направленного ответвителя и недостаточной фильтрацией промодулированного сигнала. Решением данной проблемы может быть ввод дополнительных емкостей малой величины (50-100 пФ) выполняющих роль фильтра в состав узла контроля. В качестве согласованной нагрузки (СН) [41,42] в незадействованное для передачи сигнала плечо НО [43-45], требуется установить АТТ с ослаблением ≈ 10 дБ и не выполнять его разварку на «землю».

Рассмотренные изделия имеют высокий уровень технологичности и функциональности по сравнению с остальными современными разработками ППМ. По КС работоспособности с узлов контроля реализованных в составе рассмотренных аналогов невозможно определить электрические параметры и провести дальнейшую калибровку (выравнивание) коэффициентов усиления каналов. Поэтому разработка оперативного контроля в составе ППМ для определения с быстродействием электрических параметров каналов с высокой точностью является актуальной задачей современной СВЧ-техники.

ГЛАВА 2

2.1. Этапы разработки приемо-передающего модуля

На основе данных, полученных при проведении обзора современных отечественных и зарубежных аналогов приемо-передающих модулей, для достижения цели работы требуется решить ряд задач, поставленных в п.1.4.4. Экспериментальная проверка всех разработанных узлов оперативного контроля в составе конструкции ППМ [46] в настоящее время не представляется возможной, вследствие требований обеспечения малых габаритов аппаратур заказчиков. Корректная работа узлов оперативного контроля электрических параметров будет рассматриваться в составе отдельных образцов ППМ.

Основными этапами проектирования и конструирования ППМ являются:

- разработка структурной схемы ППМ;
- разработка электрической принципиальной схемы;
- разработка конструкции ППМ;
- разработка конструкторской документации (КД) и технологической документации (ТД) на изготовление отдельных деталей и сборки ППМ в целом;
- разработка технических условий (ТУ) на ППМ;
- изготовление опытного образца ППМ по разработанным КД, ТД и ТУ;
- проведение предварительных испытаний ППМ по разработанным ТУ;
- проведение приемосдаточных испытаний ППМ по разработанным ТУ.

Разработка структурной схемы ППМ включает в себя поиск подходящих элементов приемного и передающего тракта [47] позволяющих выполнить требований технического задания. На основе ЭП подобранных элементов производится предварительный расчет электрических и массогабаритных характеристик ППМ [48].

Разработка электрической принципиальной схемы (ЭПС) определяет полный состав элементов ППМ. В ЭПС используются активные элементы (МИС СВЧ, модуляторы, транзисторы и т.п.) и пассивные элементы (конденсаторы, резисторы, НО, микрополосковые платы и т.п.). Все перечисленные элементы отражены на ЭПС и в спецификации.

Разработка конструкции ППМ включает в себя:

- выбор материала металлического основания для обеспечения наилучшего теплоотвода от ВУМ (обязательное требование максимального рассеивания тепла от ВУМ, так как КПД ВУМ составляет $\approx 25\%$);

- выполнение тепловых расчетов для подтверждения правильности выбора материала металлического основания ППМ (максимальный допустимый перегрев согласуется с заказчиком);

- выбор материала платы, на которую будут установлены активные и пассивные элементы (для выполнения требований по габаритным размерам конструкции, используются многослойные платы с высокой радиогерметичностью и стойкостью к внешним воздействующим факторам);

- проектирование топологии и электродинамические расчеты СВЧ-трасс многослойной платы с установленными активными и пассивными элементами (выполняется для подтверждения правильности выбранных элементов СВЧ-трактов и материалов конструкции);

- выбор материалов составных частей корпуса ППМ (выбирается на основе КТР многослойной платы);

- выбор метода герметизации модуля (клей, сварка, пайка) и соединения всех деталей конструкции в целом [49,50].

Разработка КД и ТД.

КД состоит из чертежей и спецификаций на детали конструкции ППМ. В состав КД входят: общая спецификация на КД, ведомость документов на носителях данных, ведомость покупных изделий, габаритный чертеж, ЭПС со спецификацией, сборочный чертеж со спецификацией, а также отдельные чертежи на детали конструкции [51].

ТД состоит из маршрутов изготовления всех деталей конструкции, маршрута сборки ППМ, маршрута измерения и настройки основных электрических параметров. Операции, занесенные в ТД позволяют пошагово выполнить изготовление ППМ производственными рабочими.

Разработка технических условий заключается в написании технического документа, устанавливающего согласно ТЗ требования, которым должен соответствовать изготовленный образец ППМ. В ТУ представляются методики проверки готового образца ППМ на соответствие всем техническим характеристикам, указанным в ТЗ при приемке и поставке заказчику. ТУ являются обязательным документом, входящим в состав КД.

Изготовление опытного образца производится по разработанным КД, ТД и ТУ.

Проведение предварительных испытаний по разработанным ТУ включает в себя: проверку внешнего вида, габаритных и установочных размеров, проверку электрических параметров изготовленного ППМ, проведение испытаний на внешние воздействующие факторы (ВВФ), проведение испытаний транспортной тары.

Проведение приемосдаточных испытаний по разработанным ТУ проводят для подтверждения характеристик разработанного ППМ требованиям ТЗ и дальнейшего принятия решения о пригодности его к поставке заказчику.

После вышеперечисленных действий конструкторской и технологической документации на ППМ присваивается литера «О» и опытно-конструкторская работа (ОКР) переводится на этап межведомственных испытаний (МВИ). Во время МВИ изготовленные опытные образцы ППМ применяются по назначению в составе аппаратуры заказчика. Этап МВИ проводится в совместной работе с представителями заказчика.

2.2. Модернизируемый приемо-передающий модуль

В соответствии с этапами разработки ППМ, проведенными в п.2.1 главы 2, необходимо разработать структурную схему приемо-передающего модуля, включающего в себя узлы контроля электрических параметров. Структурная схема модернизируемого ППМ, изображена на рисунке 13.

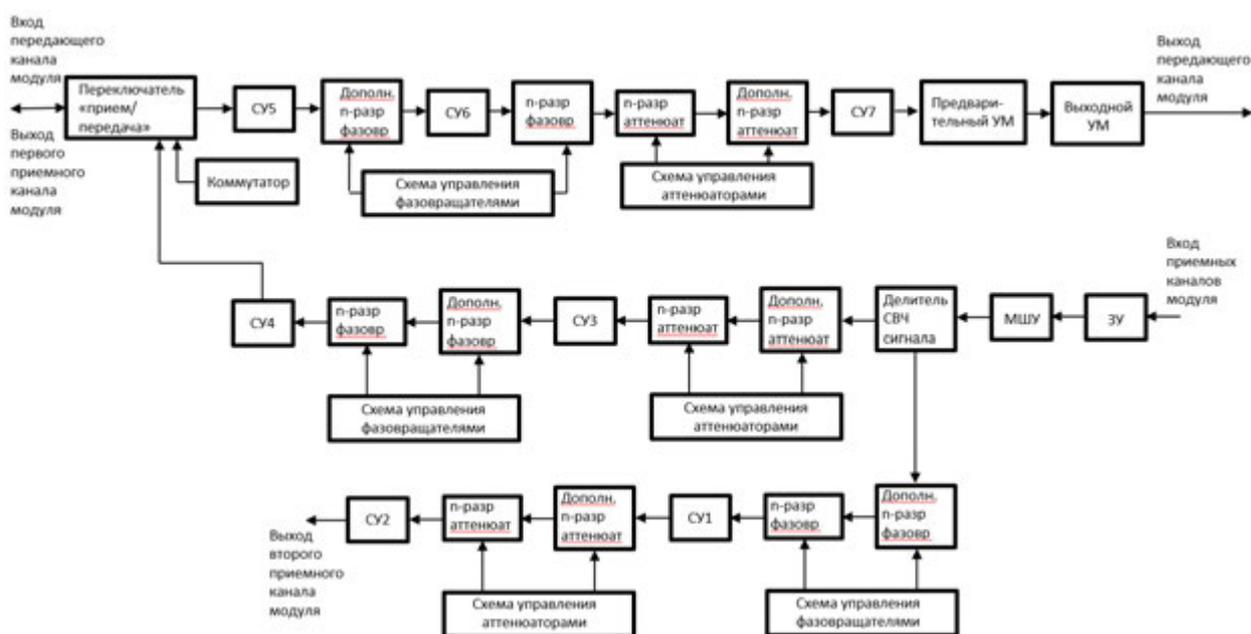


Рис. 13. Структурная схема модернизируемого ППМ

В состав структурной схемы входят:

- переключатель «прием/передача» [52-57] служит для переключения ППМ в режим работы ПРМ/ПРД;

- СУ, n-разрядные ФВР, дополнительные n-разрядные ФВР, n-разрядные АТТ, дополнительные n-разрядные АТТ, МШУ, ЗУ, ПУМ, ВУМ являются основными элементами ППМ и их принцип работы описан в п.1.2.1 и п.1.2.2 главы 1;

- делитель СВЧ сигнала [58-60] позволяет разделить СВЧ-сигнал, проходящий через приемный тракт на две части близкие по амплитуде;

- схема управления аттенуаторами включает в себя микросхемы драйверов-коммутаторов, позволяющие управлять вводимым ослаблением аттенуаторов для задания уровня сигнала, проходящего по СВЧ-тракту;

- схема управления фазовращателями включает в себя микросхемы драйверов-коммутаторов, позволяющими управлять состояниями фазовращателей для задания требуемой фазы сигнала, проходящего по СВЧ-тракту;

- коммутатор изменяет режим работы переключателя «прием/передача» (работа на прием или на передачу).

В рассматриваемой схеме используется большое количество линий передачи СВЧ-сигналов. Для обеспечения развязок основание, на котором располагаются СВЧ- и НЧ-элементы должно быть многослойным. Требование по многослойности

платы выполняется за счет применения в составе конструкции керамического основания, изготовленного по технологии LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) [61-63]. Многослойная керамическая плата, выполненная по технологии LTCC, позволяет произвести послойную разводку питания и управления, исключая при этом возникновение паразитных связей между СВЧ- и НЧ-трактами. Линии передачи, используемые в узлах оперативного контроля должны быть выполнены внутри слоев многослойной платы LTCC, чтобы избежать паразитного влияния приемного или передающего каналов друг на друга.

При вводе оперативного контроля в состав ППМ, понадобится дополнительное пространство внутри объема корпуса для размещения новых элементов, позволяющих получать КСИ. Незначительно увеличатся экономические затраты на производство. Но при использовании разработанных ППМ с узлами оперативного контроля в составе АФАР, появится возможность калибровки (выравнивания) коэффициентов усиления с высокой точностью и оперативностью, а также отключения неисправных модулей до формирования ДН. Введение оперативного контроля в состав конструкций современных СВЧ-устройств высокого класса является приоритетной задачей в настоящее время.

Чтобы разработать схему ППМ с узлами оперативного контроля электрических параметров, требуется спроектировать и разработать каждый узел по отдельности.

2.3. Система контроля мощности ППМ

В качестве базовой схемы для получения контрольных сигналов исправности канала, предлагается использовать разработанную систему контроля мощности (СКМ). Схема СКМ передающего канала ППМ, изображена на рисунке 14.



Рис. 14. Схема системы контроля мощности передающего канала ППМ

Схема состоит из направленного ответвителя (НО), детекторного диода (ДД), согласованной нагрузки 50 Ом, усилителя постоянного тока (УПТ) и компаратора (КОМ) [64-66].

2.3.1. Принцип работы системы контроля мощности

В штатном режиме работы на излучение, на выходе передающего канала присутствует высокий уровень мощности (около 10 Вт), полученный за счет усиления входного сигнала. С помощью методик, представленных в п. 1.3, главы 1, рассчитать выходную мощность передающего канала невозможно. Для контроля работоспособности (получения КСИ) передающего канала необходимо использовать схемотехнические решения, применяемые в составе конструкций близких аналогов (п.1.6). Узел контроля работоспособности должен иметь минимальную неравномерность АЧХ в рабочем диапазоне частот и минимальную задержку получения КСИ при появлении высокого уровня мощности на выходе передающего тракта.

Чтобы обеспечить контроль порога выходной мощности передающего канала, необходимо ответвить часть СВЧ-мощности с основной линии передачи. По требуемой мощности для открытия ДД (пример ВВХ ДД представлен на рисунке 15), можно рассчитать амплитуду ответвляемого сигнала. При этом на выходе ДД возникает напряжение, которое усиливается УПТ. При превышении порогового напряжения при реагировании, на выходе КОМ возникает логическая «1» (уровень напряжения «5В»).

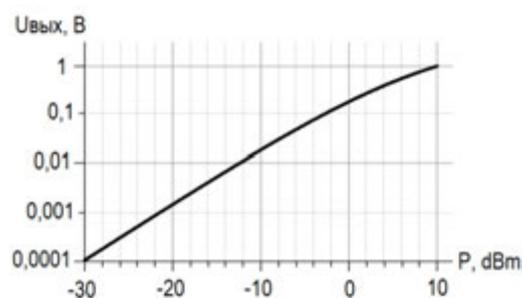


Рис. 15. Типовая вольт-ваттная характеристика ДД

В зависимости от требуемого контролируемого порога выходной мощности, можно регулировать срабатывание СКМ меняя ответвление направленного ответвителя и коэффициент усиления УПТ. Такая регулировка позволяет выбрать номинальное контролируемое значение мощности при работе АФАР.

2.3.2. Настройка основных элементов СКМ

Регулировка схемы СКМ производится за счет изменения электрических параметров НО и УПТ. Такими параметрами являются переходное ослабление НО и коэффициент усиления УПТ.

Переходное ослабление НО [67] регулируется увеличением или уменьшением расстояния между основной линией передачи (ЛП) и ЛП НО (рисунок 16).

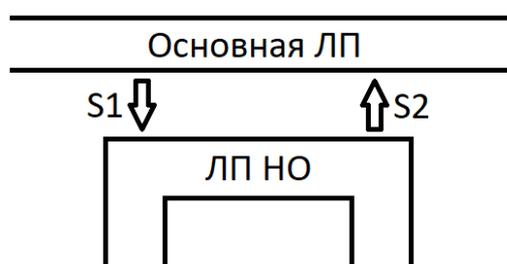


Рис. 16. Регулировка ослабления сигнала, проходящего через НО

В случае $S1$ ослабление сигнала будет увеличиваться за счет отдаления ЛП НО от основной ЛП и тем самым $R_{\text{осл. НО}}$ будет увеличиваться.

В случае $S2$ ослабление сигнала будет уменьшаться за счет приближения ЛП НО к основной ЛП и тем самым $R_{\text{осл. НО}}$ будет уменьшаться.

Следует помнить, что при уменьшении расстояния между основной ЛП и ЛП НО растут СВЧ-потери в основной ЛП. При этом выходная мощность передающего канала будет снижаться. Чтобы обеспечить минимальные СВЧ-потери в основной ЛП, $R_{\text{осл. НО}}$ следует выбирать равной $\approx 20\text{-}30$ дБ.

Коэффициент усиления УПТ регулируется изменением сопротивлений резисторов (R_1 и R_2) в схеме включения УПТ (рисунок 17).

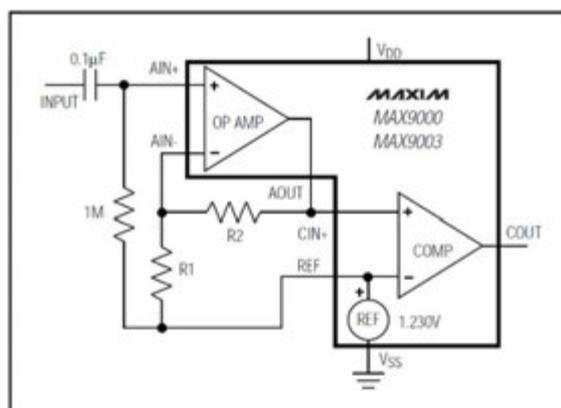


Рис. 17. Принципиальная схема включения УПТ в составе микросхемы
MAX9003EUA

Коэффициент усиления УПТ [68,69] рассчитывается по формуле:

$$K_{y \text{ УПТ}} = 1 + (R_2/R_1) \quad (6)$$

При изменении соотношения резисторов R_1 и R_2 будет изменяться и коэффициент усиления УПТ.

Расчет ответвления НО и коэффициента усиления УПТ в схеме СКМ, производится по разработанным формулам (7) и (8).

$$R_{\text{осл. НО}} [\text{дБ}] = P_{\text{порог.}} [\text{дБм}] - P_{\text{вх. ДД}} [\text{дБм}] \quad (7)$$

где $R_{\text{осл. НО}}$ – ослабление ответвляемого сигнала в плечо СКМ направленного ответвителя; $P_{\text{порог.}}$ – требуемое пороговое значение контроля выходной мощности ПРД; $P_{\text{вх. ДД}}$ – входная мощность ДД.

$$K_{y \text{ УПТ}} = U_{\text{КОМ}} [\text{В}] / U_{\text{вых. ДД}} [\text{В}] \quad (8)$$

где $K_{y \text{ УПТ}}$ – коэффициент усиления УПТ; $U_{\text{КОМ}}$ – пороговое значение применяемого компаратора; $U_{\text{вых. ДД}}$ – выходное напряжение применяемого ДД в соответствии с вольт-ваттной характеристикой (ВВХ).

В некоторых схемах невозможно обеспечить высокое переходное ослабление линии НО относительно основной линии передачи. В таких случаях в СВЧ-тракте СКМ перед ДД устанавливают АТТ с затуханием от 1 дБ до 10 дБ. АТТ дополнительно ослабляет сигнал, приходящий на вход ДД и тем самым позволяет сместить рабочую точку на ВВХ для требуемого режима работы СКМ.

2.3.3. АЧХ СКМ

В реальных СВЧ-устройствах не удается добиться абсолютной линейности характеристики выходной мощности передающего канала и входящего в состав системы контроля мощности НО и ДД. Поэтому $P_{\text{порог}}$ необходимо задавать по нижнему пределу срабатывания СКМ [70]. Идеальная АЧХ узла СКМ, с порогом срабатывания при мощности 3 Вт, приведена на рисунке 18.

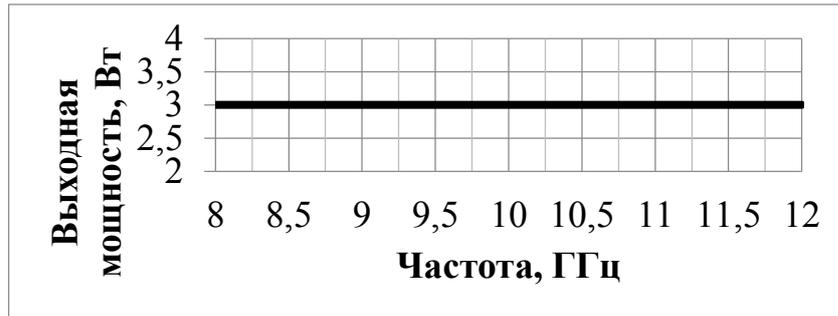


Рис. 18. Идеальная АЧХ узла СКМ, с порогом срабатывания при мощности 3 Вт

Реальная АЧХ узла СКМ, с порогом срабатывания при мощности 3 Вт, приведена на рисунке 19.

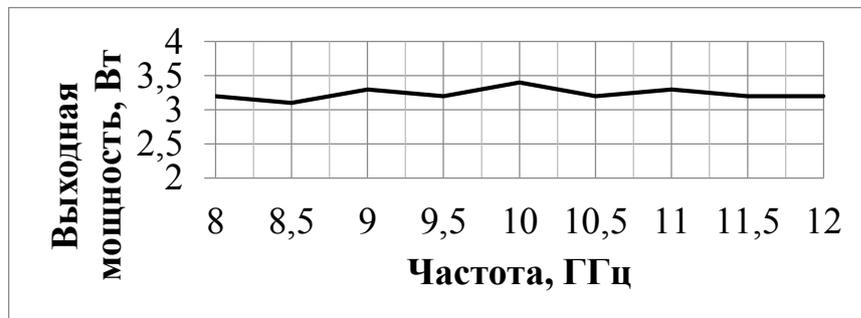


Рис. 19. Реальная АЧХ узла СКМ, с порогом срабатывания при мощности 3 Вт

Точность получения данных о выходной мощности передающего канала ППМ увеличивается по мере приближения $P_{\text{порог}}$ к $P_{\text{вых.}}$. Но так как реальная АЧХ СКМ и $P_{\text{вых.}}$ имеет неравномерность, то по данным с СКМ можно сделать вывод только о работоспособности канала в составе АФАР [71]. Также следует учитывать, что в СВЧ-тракте после ВУМ присутствуют СВЧ-потери в линиях передачи и X-циркуляторе. Эти СВЧ-потери должны быть учтены при расчете задаваемой $P_{\text{порог}}$.

На рассмотренной схеме (рисунок 14), не изображены дополнительные элементы узла СКМ. Ими являются накопительные емкости, установленные после ДД.

Они выполняют роль фильтра, снижающего неравномерность АЧХ сигнала на выходе ДД. В составе СКМ могут использоваться индуктивности, соединенные на «земляной» слой многослойной LTCC платы. Требуется это для согласования СВЧ-тракта, что приводит к выравниванию характеристики получаемого сигнала на выходе ДД. Применение индуктивностей в составе СКМ снижает амплитуду СВЧ-сигнала, приходящего на вход ДД. При этом требуется повышение коэффициента усиления УПТ, что должно быть учтено при расчете электрических параметров СКМ.

2.4. Экспериментальная проверка работы системы контроля мощности в составе ППМ

В настоящее время разработаны ППМ с СКМ, которые внедрены в состав АФАР, изготовленную предприятием заказчика. Выходная мощность каждого канала оценивается методом, представленном в п.1.3. ППМ имеют возможность выдавать контрольный сигнал исправности, сигнализирующий о работоспособности передающего канала. За счет реализации СКМ в составе ППМ можно производить отключение неисправных ППМ АФАР до формирования ДН. После отключения неисправных каналов можно более точно рассчитать среднюю выходную мощность каждого передающего канала. На основе получаемых данных можно оценить потенциал РЛС, и при необходимости, и сформировать требуемую ДН с минимальными искажениями.

2.4.1. Приемо-передающий модуль с системой контроля мощности

Приемо-передающий модуль с СКМ изображен на рисунке 20.

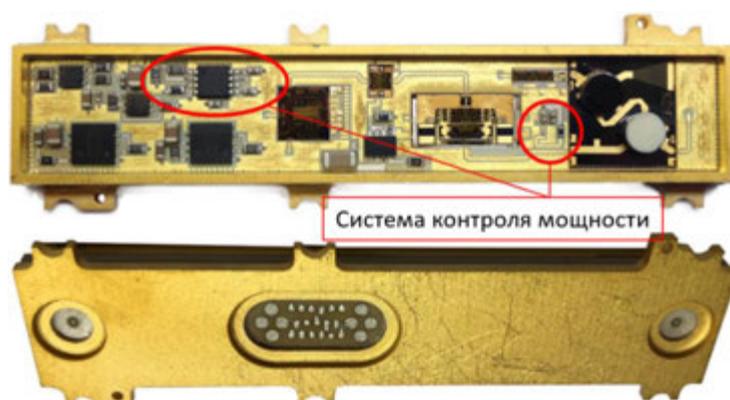


Рис. 20. ППМ АФАР с системой контроля мощности

ППМ работает в X-диапазоне частот. Выходная мощность передающего канала составляет более 10 Вт.

Конструкция СКМ и входящие в его состав элементы будут рассматриваться в составе ППМ, изображенного на рисунке 20. Принцип построения СКМ в ППМ производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» может отличаться величиной отклонения НО и длиной побочной линии передачи НО. Остальные составные элементы СКМ идентичны.

2.4.2. Конструкция СКМ

Схема системы контроля мощности в составе ППМ АО «НПП «Исток» им. Шокина», изображена на рисунке 21.

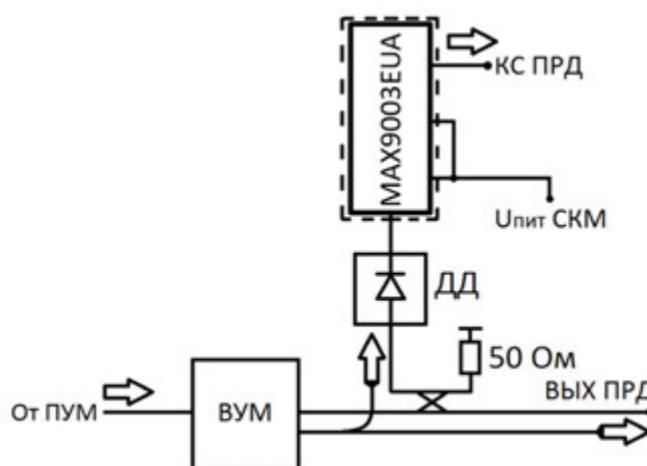


Рис. 21. Схема системы контроля мощности в составе ППМ
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Входящие в состав узла СКМ элементы:

- ДД производства АО «НПП «Исток» им. Шокина»;
- согласованная нагрузка 50 Ом (аттенюатор 10 дБ, производства АО «НПП «Исток» им. Шокина») или резистор 50 Ом с СВЧ-цепью согласования;
- микросхема MAX9003EUA компании «Maxim Integrated» включающая в свой состав УПТ и КОМ.

В рассматриваемом ППМ СКМ спроектирована таким образом, что ДД и НО находятся достаточно близко к основной линии передачи ПРД (рис. 22), а микросхема MAX9003EUA установлена в области НЧ-части ППМ (рис. 23). Установка микросхемы MAX9003EUA обоснована применением паянных соединений на

этапе сборки основания ППМ, которые должны преимущественно располагаться в одной области внутри объема ППМ.

Передача цифрового НЧ-сигнала с компаратора (логической «1») осуществляется через внутренние слои многослойной керамической платы (МКП) LTCC. На нижнем поверхностном слое МКП LTCC ППМ имеются контактные НЧ-площадки для сопряжения с аппаратурой заказчика (рис. 24).

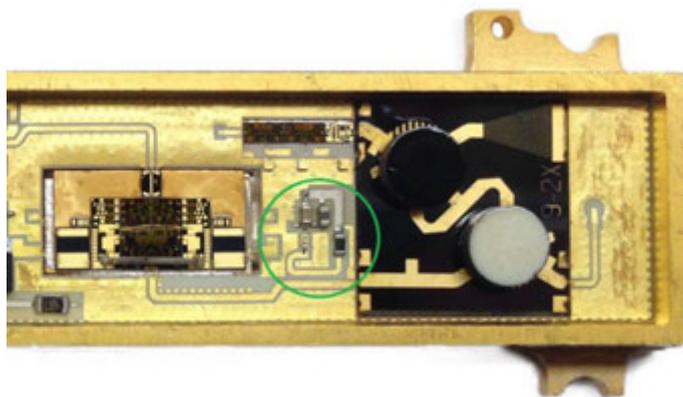


Рис. 22. Область установки ДД и НО

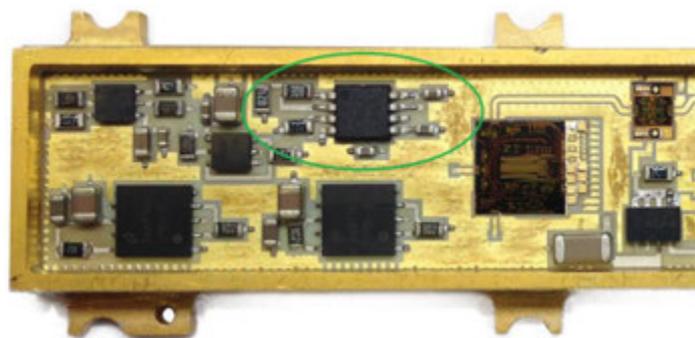


Рис. 23. Область установки MAX9003EUA



Рис. 24. Выход цифрового НЧ-сигнала КСИ с компаратора

Передача КСИ на плату управления АФАР производится через прижимной НЧ-соединитель.

Приведенная конструкция и расположение элементов, будут использоваться во всех рассмотренных экспериментальных образцах ППМ в процессе работы.

2.5. Применение межплатных прижимных СВЧ-соединителей в составе приемо-передающего модуля АФАР

Ключевой проблемой при измерении электрических параметров ППМ АФАР с СКМ, было использование в составе конструкции межплатного прижимного СВЧ-соединителя, который изображен на рисунке 25.



Рис. 25. Межплатный прижимной СВЧ-соединитель

Для проведения экспериментальных исследований приемо-передающих модулей с таким типом СВЧ-соединения и для проверки работы системы контроля мощности, используется разработанное АО «НПП «Исток» им. Шокина» специальное контактно-измерительное устройство.

2.5.1. Поверхностное контактное соединение модулей и коаксиально-волновой переход

Поверхностное контактное соединение модулей (ПКСМ) – способ соединения контактных поверхностей ППМ и АФАР, основанный на прижатии их через межплатный прижимной СВЧ-соединитель (рис. 25).

В данном случае для проверки электрических параметров ППМ и СКМ будет рассматриваться соединение выходного СВЧ-контакта модуля и поверхности АФАР [72,73]. ПКСМ показано на рисунке 26.

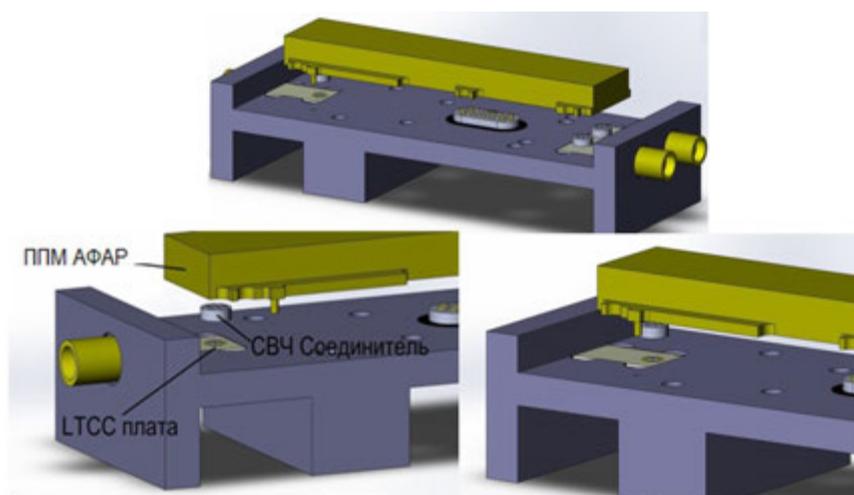


Рис. 26. Поверхностное контактное соединение модулей

Особенности LTCC технологии позволяют при помощи переходных отверстий вывести контактные площадки питания, управления и СВЧ-проводников на нижний поверхностный слой МКП. На рисунке 27 изображены контактные площадки на нижнем поверхностном слое LTCC керамики.

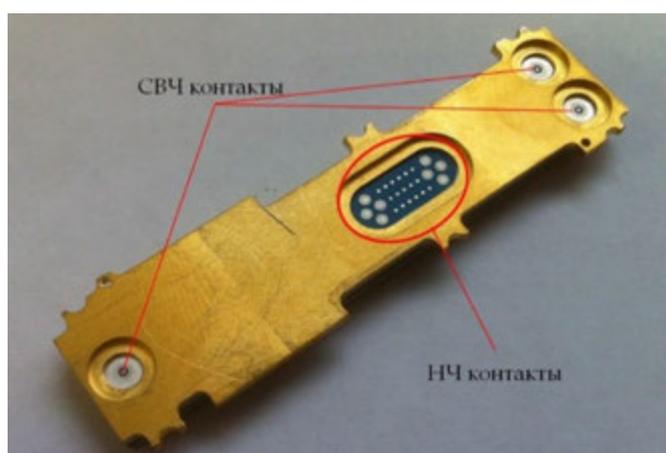


Рис. 27. Контактные площадки на нижнем поверхностном слое
LTCC керамики модуля

Использование поверхностного контактного типа СВЧ-соединения для передачи СВЧ-сигналов имеет множество достоинств и недостатков. К достоинствам можно отнести быструю замену ППМ при ремонте АФАР, радиогерметичную передачу СВЧ-сигналов высокой мощности, а также низкие СВЧ-потери из-за отсутствия дополнительных разварок при сборке АФАР. Недостатками такого соединения являются необходимость повышенной точности изготовления элементов конструкции ППМ и АФАР, а также сложность измерения электрических параметров ППМ в процессе производства [72,73].

Конструкция СВЧ-перехода в МКП выполняется при помощи земляных металлизированных отверстий, проходящих до нижнего слоя, образуя тем самым коаксиально-волновой переход (КВП). В середине КВП протекает СВЧ-энергия по центральному переходному СВЧ-отверстию с верхнего слоя МКП на нижний (рисунок 28).

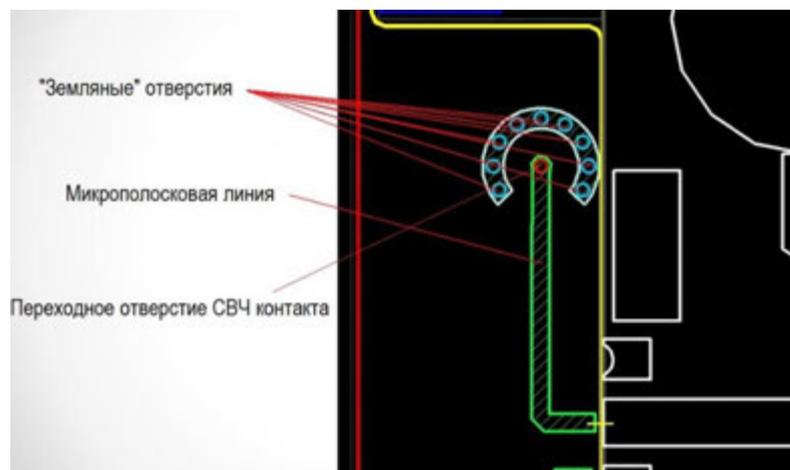


Рис. 28. СВЧ-переход в МКП

Расстояние между центральным переходным СВЧ-отверстием и окружающими его «земляными» отверстиями рассчитывается численными методами как для коаксиального кабеля [72,73].

2.5.2. СВЧ- и НЧ-соединители для ППМ

В настоящее время для передачи СВЧ-энергии в составе ППМ, несколькими Российскими предприятиями разработаны СВЧ-соединители, имеющие низкие потери СВЧ-энергии и позволяющие обеспечить надежное соединение между аппаратурой заказчика и нижней частью МКП ППМ [72,73].

Такие прижимные СВЧ- и НЧ-соединители вкладываются в выборку в металлическом основании и фиксируются резиновым уплотнителем. Резиновый уплотнитель позволяет обеспечить надежную фиксацию СВЧ- и НЧ-соединителя внутри выборки [72,73]. ППМ с вложенными прижимными СВЧ- и НЧ-соединителями, показан на рисунке 29.

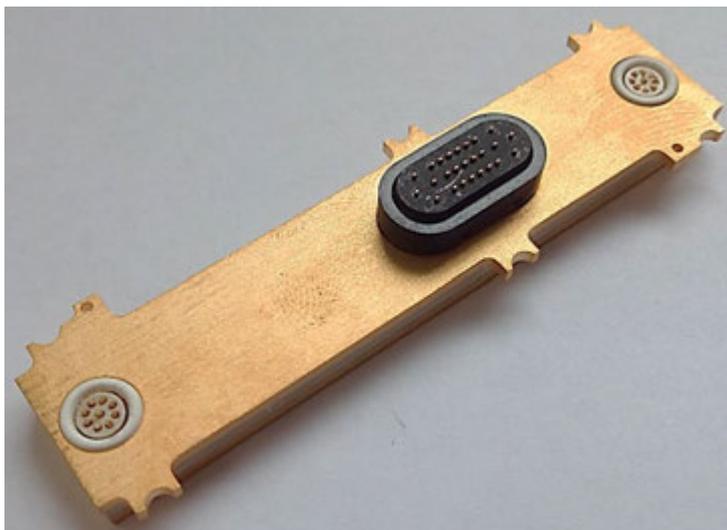


Рис. 29. ППМ с вложенными прижимными СВЧ- и НЧ-соединителями
Прижимные соединители должны быть установлены в АФАР и после этого быть прижаты ППМ.

2.5.3. Контактно-измерительное устройство

Для решения задач измерения, а также контроля электрических параметров ППМ АФАР и прижимных СВЧ-соединителей было разработано контактно-измерительное устройство (КИУ), представленное на рисунке 30.

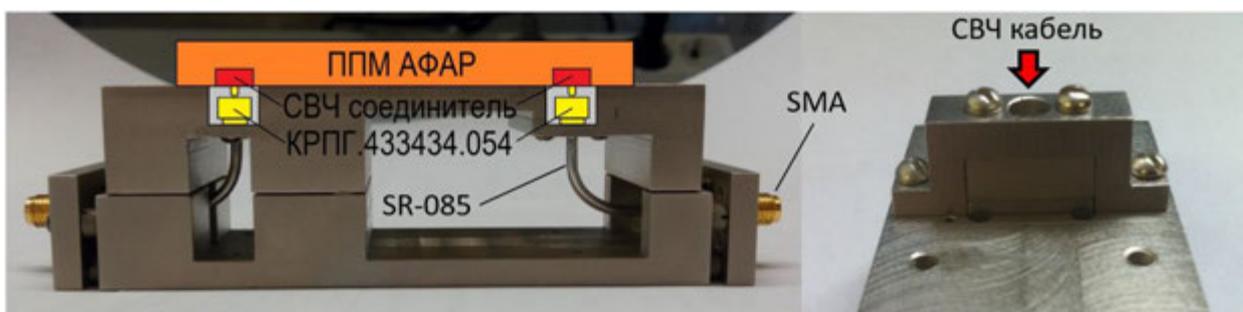


Рис. 30. Контактно-измерительное устройство для контроля электрических параметров приемо-передающих модулей АФАР и прижимный СВЧ-соединителей

Основные элементы контактно-измерительного устройства без металлического корпуса показаны на рисунке 31.

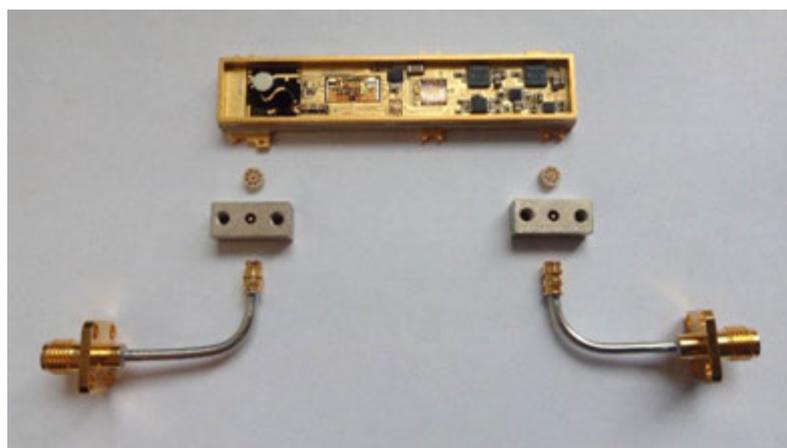


Рис. 31. Основные элементы контактно-измерительного устройства без металлического корпуса

Контактно-измерительное устройство в составе измерительного стенда для измерений электрических параметров ППМ с СКМ изображено на рисунке 32.

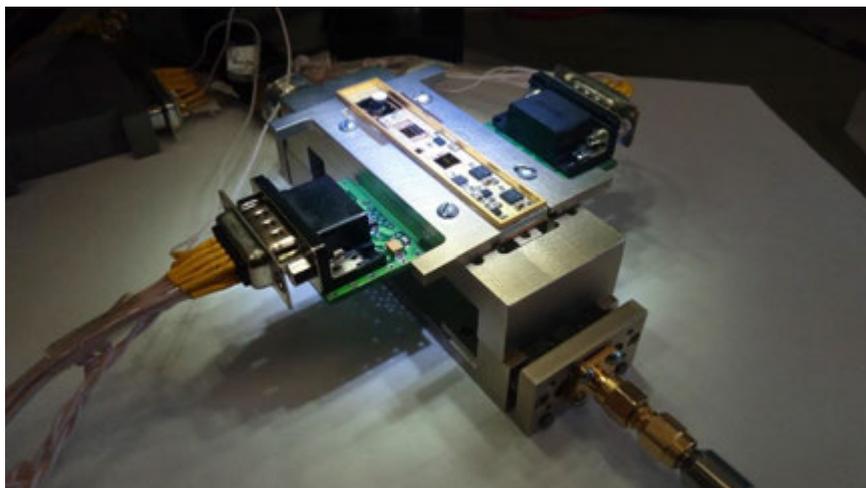


Рис. 32. Контактно-измерительное устройство в составе стенда для измерений электрических параметров ППМ с СКМ

Разработанное контактно-измерительное устройство, позволяет проводить измерения электрических параметров ППМ АФАР. СВЧ-потери на каждый вход/выход составляют $0,6 \pm \text{ПИ}$ дБ. Максимальная проходная мощность ограничивается использованием разъема типа SMP в составе конструкции и составляет 36 Вт. Схемы для паспортизации оправки описаны в следующем подразделе п.2.5.4.

2.5.4. Экспериментальная проверка электрических параметров СВЧ-соединителя

Чтобы измерить СВЧ-потери СВЧ-соединителя, была разработана методика и собрана схема, показанная на рисунке 33.

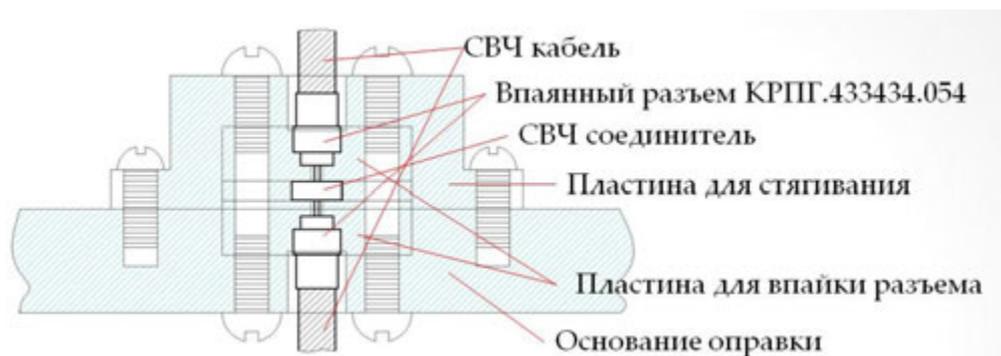


Рис. 33. Схема определения СВЧ-потерь в СВЧ-соединителе

Соединительным элементом между двумя разъемами КРПГ.433434.054 является прижимной СВЧ-соединитель, через который проходит СВЧ-энергия из одного разъема в другой. В работе использовались СВЧ-переходы фирмы Rosenberger (19K132-K00D3, 19K132-S00D3, 19S132-S00S3, 19S132-K00S3), для перехода с SMA (аналог КРПГ.434511.015) на SMP (аналог КРПГ.433434.054), которые изображены на рисунке 34 [72,73].



Рис. 34. СВЧ-переходы с SMA на SMP фирмы Rosenberger

Для измерения СВЧ-потерь в СВЧ-соединителе был собран экспериментальный стенд, структурная схема которого показана на рисунке 35 [72,73].

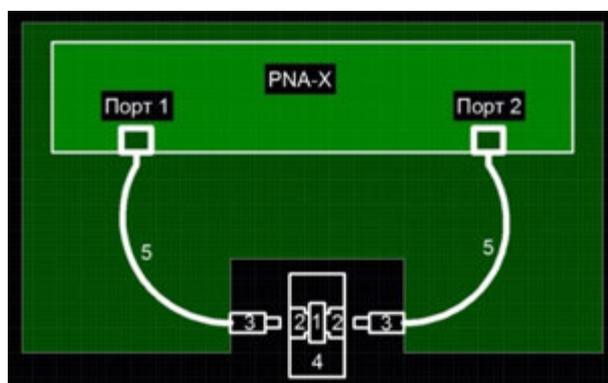


Рис. 35. Экспериментальный стенд для измерений СВЧ-потерь в СВЧ-соединителе

В состав схемы входят:

- 1 – прижимной СВЧ-соединитель;
- 2 – разъем КРПГ.433434.054 («штырь»);
- 3 – СВЧ-переход с SMA на SMP («гнездо») фирмы Rosenberger;
- 4 – контактно-измерительное устройство;
- 5 – СВЧ-кабели.

Откалиброванными элементами на рисунке 35 являются векторный анализатор цепей (PNA-X) и кабели (5). Полученные параметры КСВН (S_{11} и S_{22}) и СВЧ-потери (S_{21}) собранной схемы, изображены на рисунке 36 и сведены в таблицу 1 [72,73].

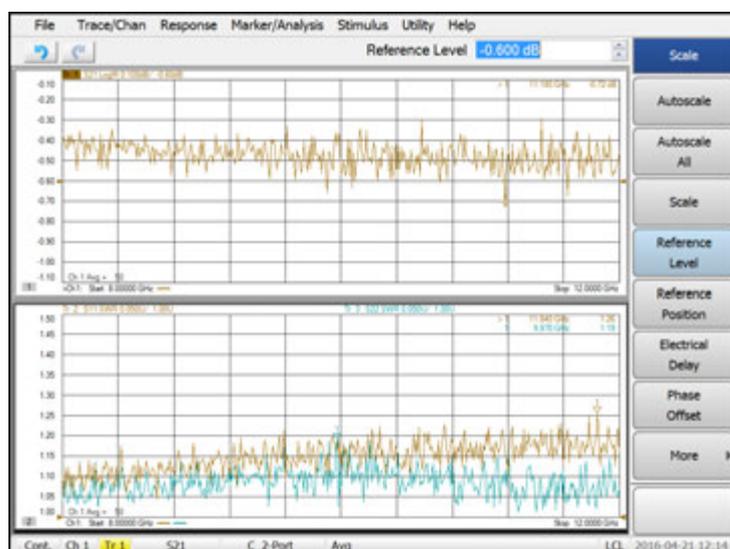


Рис. 36. КСВН (S_{11} и S_{22}) и СВЧ-потери (S_{21}) собранной схемы

Таблица 1. Результаты экспериментальной проверки собранной схемы определения СВЧ-потерь в СВЧ-соединителе

Макс. S_{21} (потери), дБ	0,72
Макс. КСВН входа	1,26
Макс. КСВН выхода	1,19

Полученные результаты включают в себя СВЧ-потери всех элементов конструкции. Для вычисления СВЧ-потерь только в СВЧ-соединителе, необходимо отдельно измерить СВЧ-переходы с SMA на SMP [72,73].

С помощью собранной измерительной схемы, показанной на рисунке 37, можно измерить СВЧ-потери в СВЧ-переходах с SMA на SMP. Если предположить,

что СВЧ-потери в разьеме «гнездо» равны СВЧ-потерям в разьеме «штырь», то можно вычислить СВЧ-потери, которые возникают в контактно-измерительном устройстве [72,73].

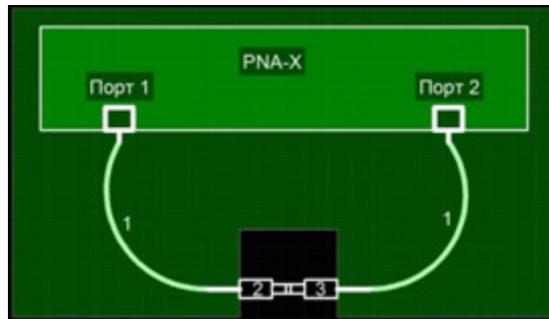


Рис. 37. Схема определения СВЧ-потерь СВЧ-переходов

В состав схемы входят:

- 1 – СВЧ-кабели;
- 2 – переход с SMA на SMP («штырь») (19S132-S00S3, 19S132-K00S3);
- 3 – переход с SMA на SMP («гнездо») (19K132-K00D3, 19K132-S00D3).

Полученные результаты экспериментальной проверки, изображены на рисунке 38 и сведены в таблицу 2 [72,73].

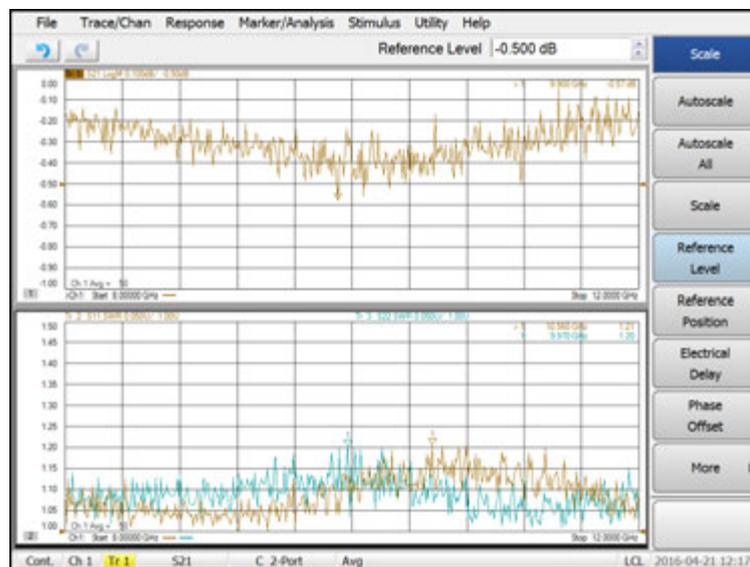


Рис. 38. КСВН (S11 и S22) и СВЧ-потери (S21) СВЧ-переходов SMA-SMP
Таблица 2. Результаты экспериментальной проверки СВЧ-переходов с SMA на SMP

Макс. S21 (потери), дБ	0,57
Макс. КСВН входа	1,21
Макс. КСВН выхода	1,20

На основе результатов, полученных в процессе проведения экспериментальных измерений, произведя расчет по максимальным значениям СВЧ-параметров, можно вычислить СВЧ-потери, возникающие в соединении КРПГ.433434.054 – СВЧ соединитель – КРПГ.433434.054:

$$P_{0.054\text{-СВЧ}} \text{соед} - P_{0.054} \pm \text{ПИ} = (P_{\text{общ}} - P_{\text{пер}}) \pm \text{ПИ} = (0,72 - 0,57) \pm \text{ПИ} \approx \mathbf{0,2 \pm \text{ПИ} \text{ [дБ]}}$$

Из полученных результатов расчета в процессе экспериментального исследования, следует, что СВЧ-потери в СВЧ-соединителе составляют менее 0,2 дБ [72,73].

Основываясь на полученных результатах в ходе эксперимента, можно сделать вывод, что СВЧ-потери, возникающие в СВЧ-соединителе во время передачи СВЧ-мощности, могут быть сравнимы со значениями СВЧ-потерь в линиях передачи, выполненных по микрополосковой технологии. Преимуществом использования СВЧ-соединителя вместо микрополосковой линии передачи является отсутствие паразитных емкостей и индуктивностей, что улучшает согласование СВЧ-тракта и электрические параметры ППМ в целом [72,73].

2.5.5. Воздействие высокого уровня мощности на прижимные СВЧ-соединители

При конструировании ППМ с высоким уровнем выходной мощности требуется учитывать не только СВЧ-потери, но и предельно-допустимую мощность, при которой будет обеспечена стабильность электрических параметров.

В связи с этим необходимо провести измерение предельно-допустимой проходной мощности через СВЧ-соединитель, а также измерение СВЧ-потерь при изменении входной мощности.

Методики измерений СВЧ-потерь основаны на экспериментальных исследованиях, описанных в п.2.5.3. Конструкция измерительной схемы приведена на рисунке 33.

Структурная схема стенда для измерений СВЧ-потерь СВЧ-соединителя при воздействии высокого уровня мощности приведена на рисунке 39.



Рис. 39. Структурная схема стенда для измерений СВЧ-потерь СВЧ-соединителя при воздействии высокого уровня мощности

В качестве измерителя мощности (ИМ) использовался прибор Keysight Technologies E4416A с аттенуатором ослабления 30 дБ. Усилитель мощности (УМ), используемый в схеме, разработан на предприятии АО «НПП «Исток» им. Шокина» и имеет выходную мощность 40 Вт.

При проведении испытания входная мощность подавалась на измерительную оправку с установленным СВЧ-соединителем. СВЧ-потери считывались измерителем мощности. Полученный график зависимости СВЧ-потерь от входной мощности, изображен на рисунке 40.

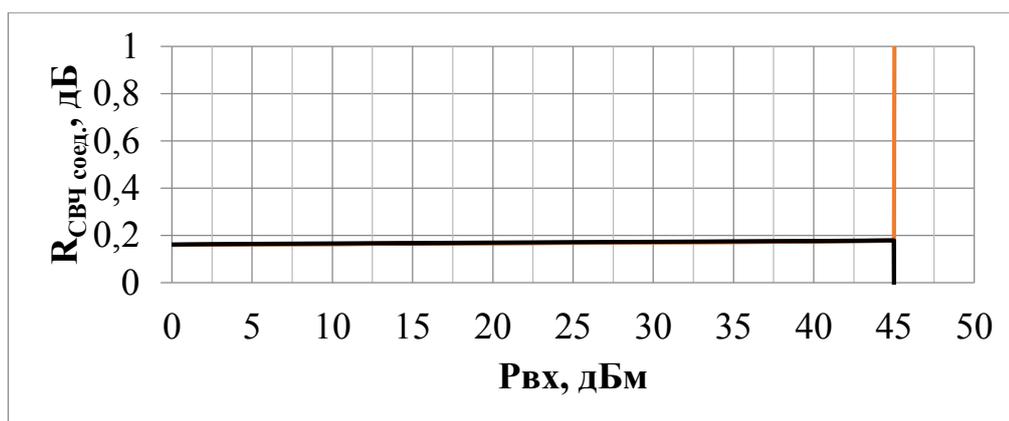


Рис. 40. Зависимость СВЧ-потерь СВЧ-соединителя от изменения входной мощности

Испытания проводились на трех образцах СВЧ-соединителей. Частота входного сигнала составляла 10 ГГц. Из рисунка 40 видно, что при входной мощности равной 45 дБм (32 Вт) происходит разрушение СВЧ-соединителя (СВЧ-потери стремятся к бесконечности). До момента разрушения СВЧ-соединителя СВЧ-потери имеют минимальную неравномерность амплитудной характеристики.

Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод, что использование такого вида соединения в составе конструкции ППМ возможно только при условии, что максимальная выходная мощность прибора не будет превышать 30 Вт. Малое

время использования включенного передатчика при выходной мощности прибора равной 32 Вт и более, может привести к разрушению СВЧ-соединителя. Не рекомендуется при выходной мощности прибора более 32 Вт использовать СВЧ-соединитель в составе конструкции.

Проведенные экспериментальные исследования позволили использовать СВЧ-соединитель в более 4000 ППМ, разработанных в процессе опытно-конструкторских работ АО «НПП «Исток» им. Шокина».

2.5.6. Экспериментальная проверка работы СКМ в составе ППМ

Для экспериментальных исследований системы контроля мощности были выбраны приемо-передающие модули разработанные на предприятии АО «НПП «Исток» им. Шокина».

2.5.6.1. ППМ «А» с СКМ

Экспериментальный образец ППМ «А» с СКМ, представлен на рисунке 41.

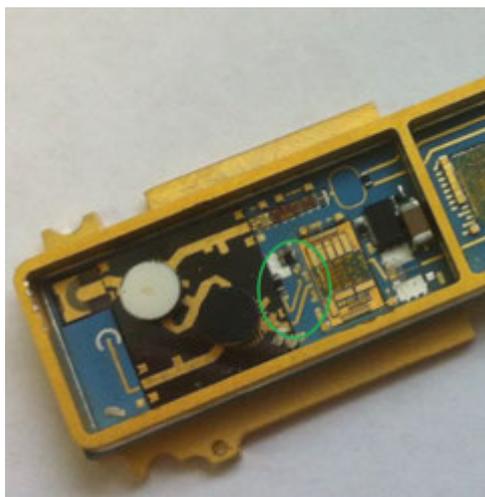


Рис. 41. ППМ «А» с СКМ

На рисунке 41 обведена область СВЧ-части СКМ в составе конструкции. В качестве согласованной нагрузки плеча НО использовался резистор номиналом 50 Ом, соединенный с «земляным» слоем МКП LTCC. Фильтрацию напряжения с ДД обеспечивают две накопительные емкости.

Структурная схема измерительного стенда проверки работы СКМ и измерения выходной мощности ППМ приведена на рисунке 42.

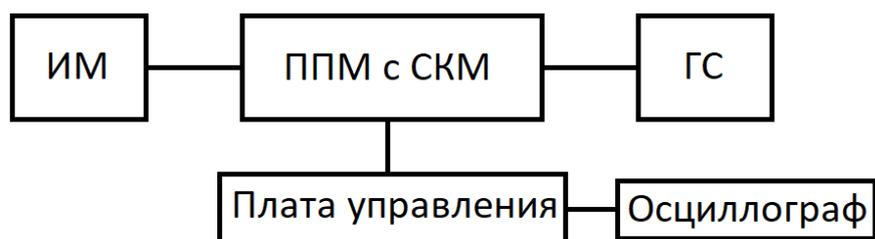


Рис. 42. Структурная схема измерительного стенда проверки работы СКМ и измерения выходной мощности ППМ

В состав измерительного стенда входят:

- измеритель мощности Keysight Technologies E4416A с аттенуатором ослабления 30 дБ (ИМ);
- ППМ «А» с СКМ (ППМ с СКМ);
- генератор сигналов СВЧ Keysight Technologies E8257D (ГС);
- устройство сопряжения ПАЮМ3.549.607 производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Плата управления);
- осциллограф Agilent Technologies MSO6012A (осциллограф).

При работе ППМ «А» в режиме передачи сигнала при номинальной входной мощности, необходимо контролировать порог выходной мощности, составляющий более 3 Вт. При выполнении этого условия получаемый КСИ будет сигнализировать об исправном состоянии передающего канала.

Изменяя уровень входной мощности, можно измерить момент срабатывания СКМ передающего канала ППМ.

Полученная экспериментально АЧХ СКМ передающего канала ППМ «А», изображена на рисунке 43.

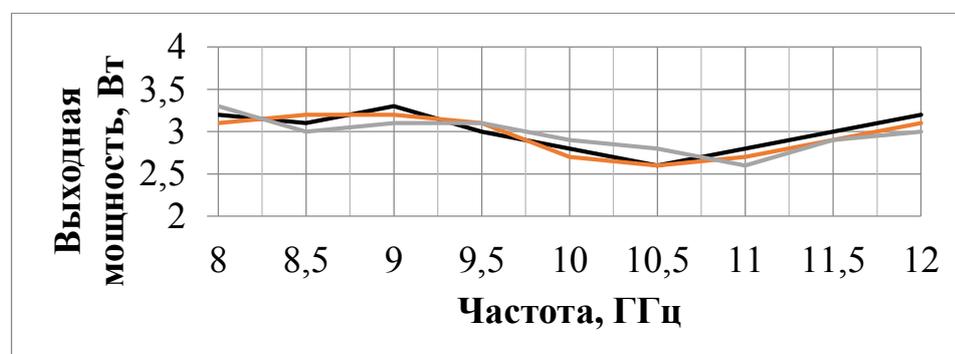


Рис. 43. Полученная экспериментально АЧХ СКМ передающего канала ППМ «А»

Эксперимент проводился на трех образцах ППМ «А». Из рисунка 43 видно, что в диапазоне частот от 9,5 ГГц до 11,5 ГГц происходит «провал» АЧХ СКМ. Связано это с рассогласованием СВЧ-тракта СКМ в области НО на определенных частотах. Неравномерность характеристики в процессе эксперимента составила ≈ 1 дБ. Заданный порог контроля выходной мощности не достигнут.

Для правильной работы СКМ требуется уменьшить неравномерность АЧХ во всем диапазоне рабочих частот.

В ходе эксперимента было выявлено, что в области НО происходит возникновение паразитного реактивного сопротивления. Минимальной неравномерности АЧХ можно добиться введением дополнительных согласующих элементов в СВЧ-тракт.

Область, в которой необходимо ввести согласующий элемент вида «индуктивность», изображена на рисунке 44.

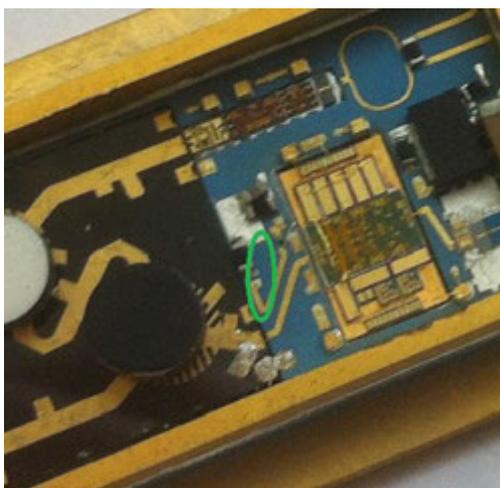


Рис. 44. Область согласования плеча НО с помощью индуктивности

В качестве согласующего элемента можно использовать индиевую полоску (≈ 100 мкм) или золотую проволоку (≈ 25 мкм).

Полученная АЧХ срабатывания СКМ ППМ «А» после согласования, изображена на рисунке 45.

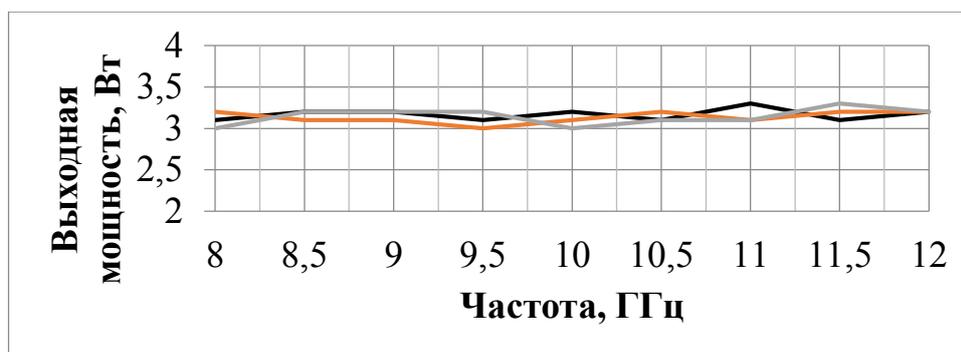


Рис. 45. АЧХ срабатывания узла СКМ ППМ после согласования

Ввод в состав СВЧ-части СКМ компенсирующей СВЧ-индуктивности позволил выровнять АЧХ срабатывания и тем самым выполнить требование по получению КСИ, сигнализирующего о достаточном уровне выходной мощности передающего канала во всем X-диапазоне рабочих частот. Неравномерность характеристики составила менее $0,4 \text{ дБ} \pm \text{ПИ}$.

2.5.6.2. ППМ «Б» с СКМ

Экспериментальный образец ППМ «Б» с СКМ, представлен на рисунке 46.

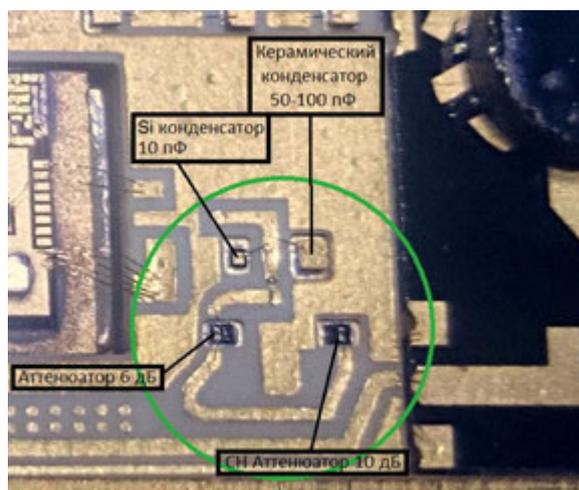


Рис. 46. ППМ «Б» с СКМ

На рисунке 46 показана область узла СКМ в составе конструкции. В ППМ «Б», в качестве согласованной нагрузки плеча НО использовался аттенюатор с ослаблением 10 дБ. Фильтрацию напряжения с ДД обеспечивают две накопительные емкости (1 – выполнена из керамики, емкость от 50 до 100 пФ, 2 – выполнена на подложке из Si, емкость $10 \text{ пФ} \pm 10\%$). Также дополнительно установлен аттенюатор с

ослаблением 6 дБ для снижения входной мощности ДД. Снижение входной мощности позволяет сместить рабочую точку на вольт-ваттной характеристике ДД для работы в более линейном участке.

Разварка аттенюатора номиналом 10 дБ золотой проволокой, используемого в качестве СН, приведена на рисунке 47.

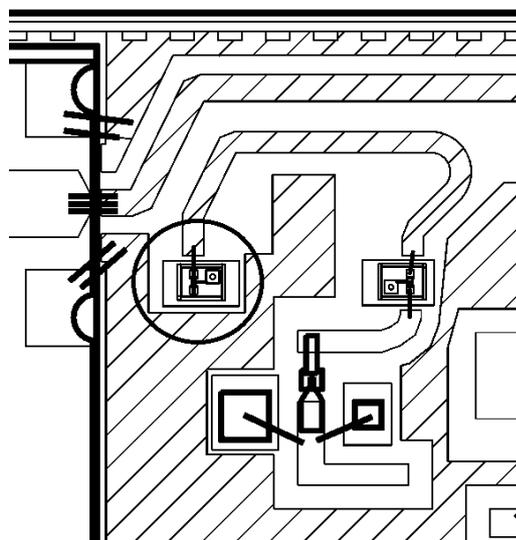


Рис. 47. Разварка аттенюатора 10 дБ золотой проволокой, используемого в качестве СН

Применение такой разварки позволяет достичь волнового сопротивления нагрузки равного $49,5 \text{ Ом} \pm 5\%$ в X-диапазоне частот.

Структурная схема измерительного стенда проверки работы СКМ и измерения выходной мощности ППМ приведена на рисунке 42.

При работе ППМ «Б» в режиме передачи сигнала и номинальной входной мощности необходимо обеспечить контроль порога выходной мощности, составляющего более 5 Вт.

Полученная экспериментально АЧХ СКМ передающего канала ППМ «Б» изображена на рисунке 48.

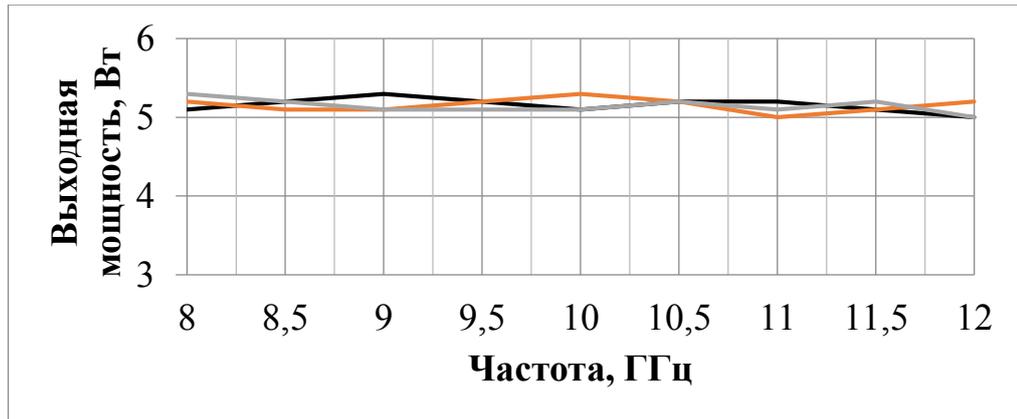


Рис. 48. Полученная экспериментально АЧХ СКМ передающего канала ППМ «Б»
 Также были проведены измерения задержек реагирования системы контроля мощности. Полученные результаты представлены на рисунке 49.



Рис. 49. Задержка реагирования системы контроля мощности

Задержки реагирования СКМ в ППМ «Б» составили ≈ 250 нс \pm ПИ. Данные о реагировании СКМ позволяют в дальнейшем рассчитать время необходимое на оперативный контроль электрических параметров по разработанным методикам и алгоритмам вычислений.

Эксперимент проводился на трех образцах ППМ «Б». Из рисунка 48 видно, что дополнительное согласование элементов СКМ не требуется. Ввод в состав схемы СКМ согласованной нагрузки с волновым сопротивлением близким к 50 Ом (аттенуатор с ослаблением 10 дБ) позволил исключить настройку СКМ и обеспечить минимальную неравномерность АЧХ во всем диапазоне рабочих частот. Неравномерность АЧХ составила менее $0,26$ дБ \pm ПИ.

2.5.6.3. ППМ «В» с СКМ

Экспериментальный образец ППМ «В» с СКМ, представлен на рисунке 50.

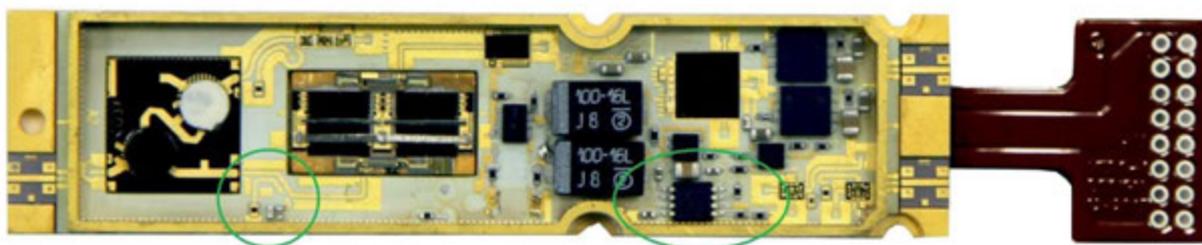


Рис.

50. ППМ «В» с СКМ

На рисунке 50 обведены области узла СКМ в составе конструкции. В рассматриваемом ППМ «В» используются идентичные элементы и топология узла СКМ, применяемые в ППМ «Б». При работе ППМ «В» в режиме передачи сигнала и номинальной входной мощности необходимо обеспечить контроль порога выходной мощности, составляющего более 7 Вт.

Структурная схема для измерений параметров СКМ приведена на рисунке 42.

Полученная экспериментально АЧХ СКМ передающего канала ППМ «В» изображена на рисунке 51.

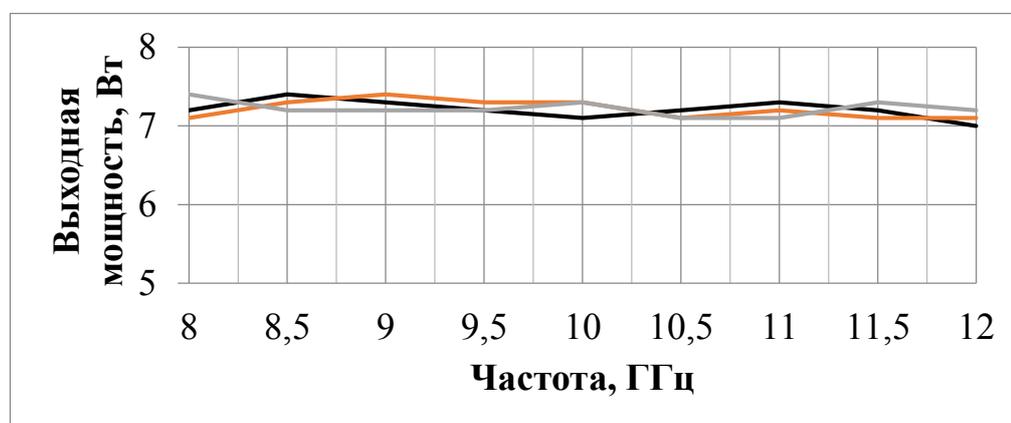


Рис. 51. Полученная экспериментально АЧХ СКМ передающего канала ППМ «В»

Эксперимент проводился на трех образцах ППМ «В». Из рисунка 51 видно, что дополнительное согласование элементов узла СКМ не требуется.

Применение элементов и топологии СКМ, рассмотренных на трех образцах ППМ «Б» и трех образцах ППМ «В», позволяет сделать вывод, что в диапазоне выходной мощности от 3 Вт до 7 Вт и частотном диапазоне от 8 ГГц до 12 ГГц

СКМ работает с высокой повторяемостью результатов измерений. Максимальная неравномерность АЧХ составила $\approx 0,24$ дБ \pm ПИ.

2.5.7. Анализ полученных экспериментальных данных о работе СКМ в составе ППМ АФАР

Исследование конструкций систем контроля мощности в составе ППМ показало, что согласование СВЧ-тракта в области НО является ключевой проблемой при проектировании и конструировании такого узла. Применение согласующих элементов в составе ППМ «А» увеличивает трудоемкость настройки СКМ, что является неприемлемым при больших объемах производств модулей. Применение оригинальных схемотехнических решений в составе ППМ «Б» и ППМ «В» исключает настройку СКМ, что позволяет снизить трудоемкость и стоимость ППМ при производстве, а также увеличить объемы выпуска изделий.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить эталонную схему СКМ, которая была применена в составе конструкции более тысячи штук ППМ, произведенных в процессе проведения опытно-конструкторских работ «Аспирин-И», «Аналог-2», «Аналог-М», «Аспирин-80», выполняемых на предприятии АО «НПП «Исток» им. Шокина». Определение порогового значения выходной мощности в разработанных модулях составляет не более $0,3$ дБ \pm ПИ. Измерение задержки реагирования системы контроля мощности составило ≈ 250 нс \pm ПИ. Полученные данные времени задержки реагирования СКМ позволяют оценить время, требуемое для проверки канала АФАР в режиме реального времени.

2.6. Применение системы контроля мощности ППМ в составе АФАР

Система контроля мощности ППМ в составе АФАР, может выявить неисправный передающий канал при предварительной подготовке системы для работы в лабораторных условиях и штатной работе в составе изделия. Условное изображение подрешетки антенной АФАР с установленными ППМ и элементами СКМ (считывающими информацию по КСИ), изображено на рисунке 52.

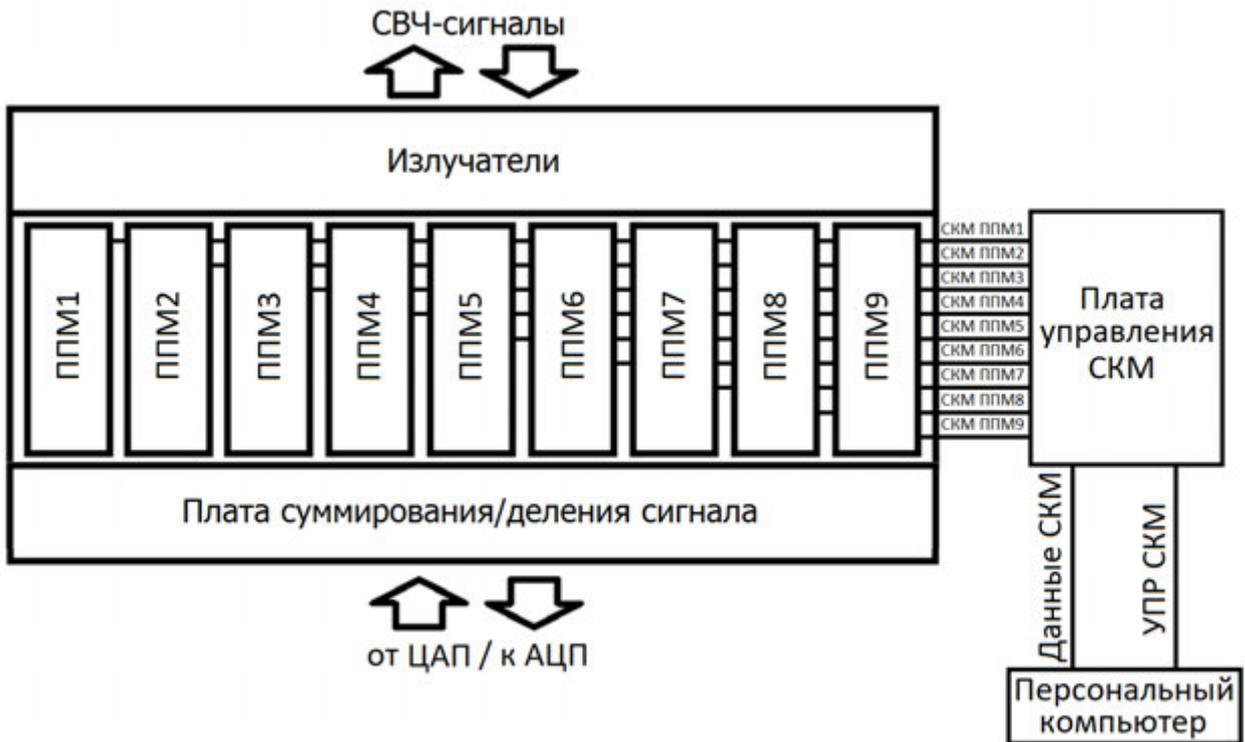


Рис. 52. Подрешетка антенная АФАР с установленными ППМ и элементами СКМ

В данной подрешетке антенной используются 9 штук ППМ [71]. У каждой единицы ППМ имеется свой выход данных СКМ, который соединен с платой управления СКМ. Плата управления СКМ выполняет функцию передачи данных на персональный компьютер (ПК). На ПК установлено специальное программное обеспечение (ПО) для считывания КСИ передающего канала ППМ. С ПК на плату управления СКМ подаются цифровые сигналы для управления микросхемой преобразования данных.

Для контроля исправности передающего канала, подрешетку антенную включают в режим работы на передачу. На элементы СКМ, в ППМ подается питание. С ПК подается управляющий сигнал готовности к приему данных с СКМ ППМ. Происходит подача входной мощности на передающий канал. КСИ с СКМ начинают поступать на плату управления СКМ и обрабатываться с помощью ПО на ПК.

При исправной работе всех передающих каналов ППМ в каждой ячейке, соответствующей номеру установленного модуля будет находиться информация, сигнализирующая об исправности ППМ (цветовая или численная индикация). Условное оформление интерфейса программного обеспечения с реальными значениями выходной мощности каждого исправного канала, показан на рисунке 53.

3,1 Вт	3,2 Вт	3,4 Вт	3,3 Вт	3,2 Вт	3,3 Вт	3,5 Вт	3,4 Вт	3,6 Вт
ППМ1	ППМ2	ППМ3	ППМ4	ППМ5	ППМ6	ППМ7	ППМ8	ППМ9

Рис. 53. Подрешетка антенная с исправными ППМ

При получении контрольного сигнала с общей платы управления СКМ о том, что в подрешетке антенной все передающие каналы исправны, запускается процесс настройки и калибровки электрических параметров АФАР в соответствии с эксплуатационными документами.

Если после включения передающих каналов в штатный режим работы в составе подрешетки антенной имеются неисправные ППМ, то в ПО на экране ПК будет видно, что мощность этих модулей составляет менее порогового значения в 3 Вт. Условное оформление интерфейса ПО с реальными значениями выходной мощности и индикацией неисправных каналов, показан на рисунке 54.

3,1 Вт	0,1 Вт	3,4 Вт	3,3 Вт	3,2 Вт	0,2 Вт	3,5 Вт	3,4 Вт	3,6 Вт
ППМ1	ППМ2	ППМ3	ППМ4	ППМ5	ППМ6	ППМ7	ППМ8	ППМ9

Рис. 54. Подрешетка антенная с двумя неисправными ППМ

Если тестирование и настройка подрешетки антенной происходит в лабораторных условиях, то неисправные ППМ [74] демонтируют, меняют на исправные или производят ремонт.

Если тестирование и настройка подрешетки антенной происходит в штатном режиме в составе изделия, то неисправные ППМ отключают и формируют диаграмму направленности, используя только исправные ППМ. Это нужно для того чтобы неисправные ППМ при дальнейшей работе не ухудшали электрические параметры АФАР и не привели к выходу ее из строя.

Выход из строя ВУМ в составе ППМ [75] может быть вызван выгоранием усилительных каскадов («пальцев» транзисторов). После этого в большинстве случаев возникает короткое замыкание (КЗ), при котором ток силовой цепи «+9В» ограничивается защитой источников питания. КЗ может привести к выгоранию платы питания и управления АФАР или выходу из строя общего источника питания [76].

Поэтому после проверки выходной мощности ППМ с помощью СКМ остаются работать в штатном режиме только исправные ППМ [77].

Приемо-передающий модуль в своем составе имеет два канала: приемный и передающий. При неисправности передающего канала приемный канал может оставаться в исправном состоянии и работать в штатном режиме. Для проверки исправности и электрических параметров приемного канала требуется разработать схемотехнические решения, позволяющие провести по специальным методикам проверку коэффициентов усиления ПРМ и ПРД с высокой точностью и максимальным быстродействием [78].

ГЛАВА 3

3.1. Методика контроля коэффициента усиления положительной обратной связью

Приемный канал в ППМ необходим для усиления сигналов, отраженных от объектов, находящихся в области сканирования АФАР при ее работе [79]. При работе на больших расстояниях до объекта, отраженный сигнал имеет очень малую амплитуду. Его требуется усилить до уровня достаточного для штатной работы канала. По временной задержке между переданным и принятым сигналом можно рассчитать расстояние до цели, скорость движения и угловые координаты.

Коэффициенты усиления [80] приемных каналов АФАР в штатном режиме работы должны иметь минимальную неравномерность АЧХ в рабочем диапазоне частот.

В реальных АФАР не удастся добиться нулевой неравномерности АЧХ коэффициентов усиления приемных каналов [81], так как всегда присутствуют неточности изготовления МИС СВЧ, топологий СВЧ-линий передачи и других элементов, входящих в состав конструкции ППМ. Для выравнивания АЧХ коэффициентов усиления по всей АФАР в каждом из ППМ установлены ступенчатые аттенюаторы, позволяющие изменять значения коэффициентов усиления по заданному закону. Требования по номинальному значению коэффициента усиления в процессе проектирования и конструирования ППМ должны быть заложены с запасом в 20-25% относительно требований к коэффициенту усиления АФАР [82]. Ступенчатые аттенюаторы также могут использоваться для уменьшения коэффициента усиления приемного канала при приближении исследуемого объекта к РЛС с АФАР. При приближении облучаемого объекта амплитуда отраженного сигнала растет [83]. Чтобы обеспечить нормальный режим работы приемника (внутри собственного динамического диапазона), требуется уменьшить коэффициент усиления, не допустив переход усилителей приемного канала в нелинейный режим работы (в режим насыщения) [84].

Методика проверки порогового значения выходной мощности передающего канала, описанная в главе 2, показала, что контроль одного из основных электрических параметров (выходной мощности) ППМ позволяет за минимальное время найти неисправный модуль и произвести его отключение или замену. При этом приемный канал может оставаться в исправном состоянии.

Для подтверждения исправности ППМ в составе АФАР и калибровки электрических параметров каналов, необходимо разработать методики контроля коэффициента усиления приемника и передатчика. Контроль коэффициента усиления должен осуществляться с высокой точностью и быстродействием.

3.1.1. Положительная обратная связь СВЧ-тракта

Методика контроля основывается на введении положительной обратной связи в передающий и приемный СВЧ-тракт [85,86].

Обратная связь СВЧ-тракта – это связь, между выходом и входом усилительного тракта, через которую передается часть СВЧ-энергии с целью задания требуемого режима работы. При этом различают отрицательную обратную связь (ООС) и положительную обратную связь (ПОС) [87].

Обратная связь, введенная в СВЧ-тракт [88], показана на рисунке 55.

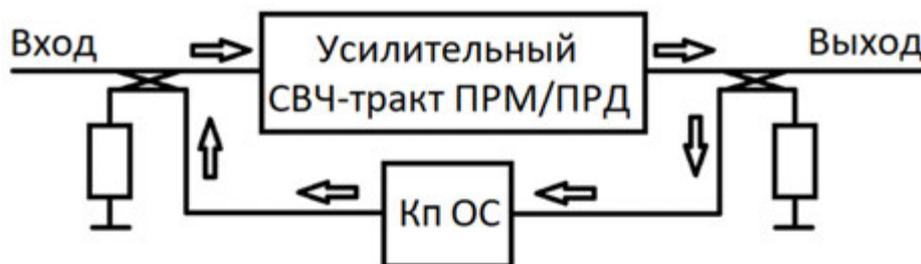


Рис. 55. СВЧ-тракт с обратной связью

ООС в СВЧ-тракте возникает при коэффициенте передачи обратной связи ($K_{п\text{ ОС}}$) большем чем коэффициент усиления СВЧ-тракта ($K_{у\text{ ОС}} < |K_{п\text{ ОС}}|$). $K_{п\text{ ОС}}$ имеет отрицательное значение в единицах «децибел». При возникновении ООС в СВЧ-тракте система будет иметь устойчивое состояние, так как имеется достаточная развязка между входом и выходом усилительного тракта.

ПОС в СВЧ-тракте возникает если $K_{п\text{ ОС}}$ меньше или равен коэффициенту усиления СВЧ-тракта ($K_{у\text{ ОС}} \geq |K_{п\text{ ОС}}|$). Обратную связь такого типа называют «паразитной обратной связью между входом и выходом СВЧ-тракта», «генерацией» или «самовозбуждением СВЧ-тракта». При возникновении такого типа обратной связи сигнал больший, чем входной сигнал СВЧ-тракта по амплитуде, с выхода усилительного тракта ответвляется и поступает обратно на вход. Этот сигнал усиливается до еще большей величины и заново поступает на вход усилительного тракта. Эффект будет повторяться и стремиться к бесконечности. Через минимальный промежуток времени все элементы усилительного СВЧ-тракта будут находиться в режиме глубокого насыщения. Присутствие ПОС и ее длительное воздействие на СВЧ-тракт может привести к выходу строя элементов канала. Исключениями могут быть только короткие промежутки времени до выключения канала при обнаружении самовозбуждения. После отключения канала требуется поиск причины возникновения ПОС. При проектировании и конструировании конструкции ППМ стараются исключить появление ПОС, так как это может привести к выходу из строя всего модуля в целом [89].

Разработанная методика позволяет намеренно использовать ПОС в составе конструкции СВЧ-тракта для контролирования работоспособности и вычисления коэффициентов усиления ПРМ и ПРД [90].

3.1.2. Структурная схема ППМ с узлами контроля коэффициента усиления положительной обратной связью

Структурная схема ППМ с узлами контроля коэффициента усиления ПРМ и ПРД положительной обратной связью, представлена на рисунке 56.

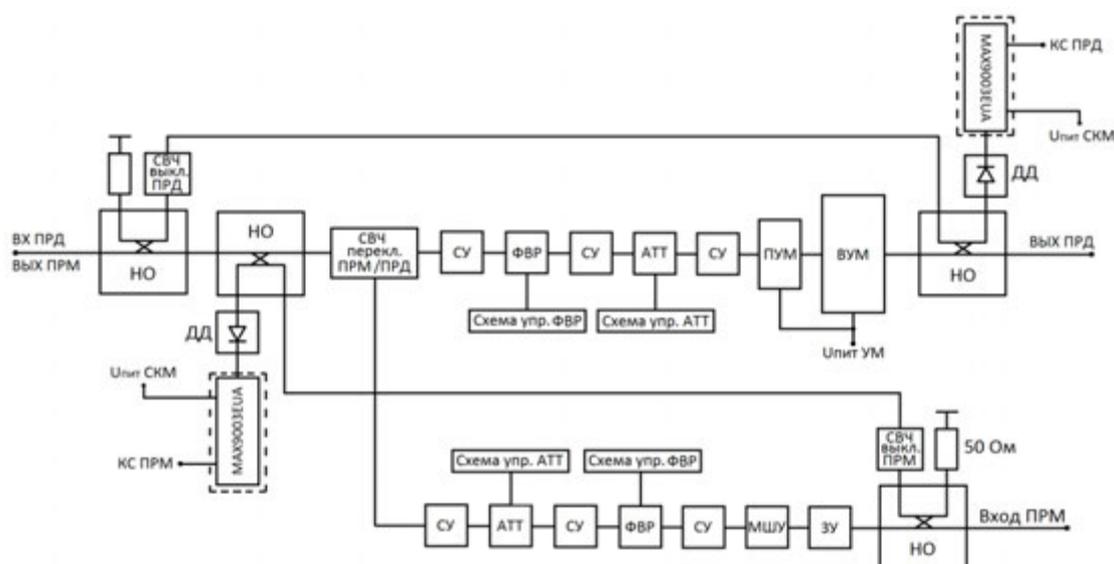


Рис. 56. Структурная схема ППМ с узлами контроля коэффициента усиления ПРМ и ПРД положительной обратной связью

Описание элементов структурной схемы представлено в главе 2 п.2.2.

Система контроля мощности в данной схеме используется в качестве детектора самовозбуждения тракта. На выводе КС ПРМ/ПРД возникает КСИ, сигнализирующий о самовозбуждении тракта. ПОС обеспечивается за счет введения линии передачи с СВЧ-выключателем между входом и выходом канала. $K_{п\text{ ОС}}$ имеет меньшее значение по «модулю» ($|K_{п\text{ ОС}}|$) чем коэффициент усиления канала.

3.1.3. Методика контроля коэффициента усиления положительной обратной связью в составе ППМ

3.1.3.1. Методика контроля коэффициента усиления передающего канала

ППМ включен и работает в штатном режиме на передачу. На вход передающего канала при замыкании СВЧ-выключателя ПРД через направленные ответвители передающего канала проникает часть СВЧ-мощности, ответвленной с ВУМ через НО с СКМ ПРД. Возникает самовозбуждение передающего канала из-за ПОС [91]. Направление СВЧ-сигнала при самовозбуждении передающего тракта в схеме контроля коэффициента усиления с помощью ПОС, изображено на рисунке 57 [92-95].

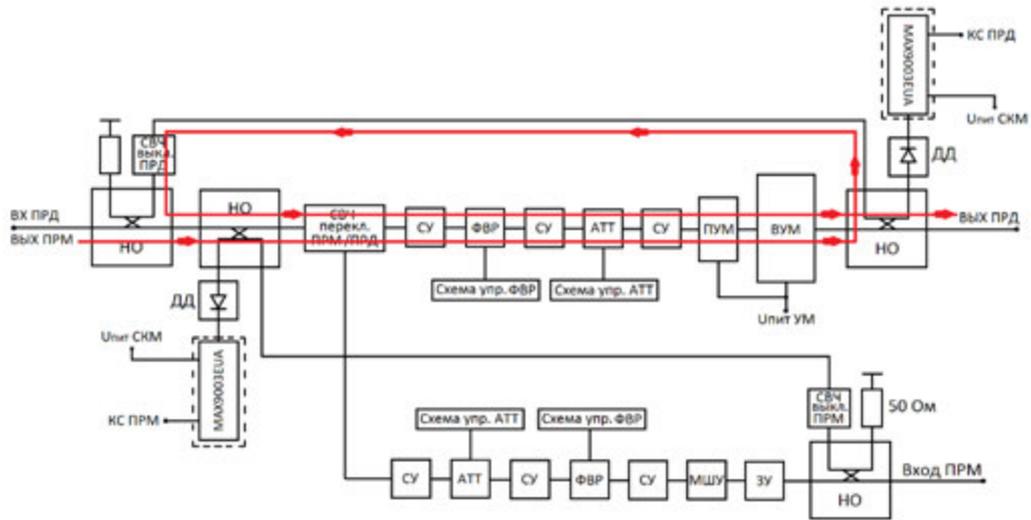


Рис. 57. Направление СВЧ-сигнала при самовозбуждении ПРД тракта в схеме контроля коэффициента усиления с помощью ПОС

Ответвление ПОС ПРД имеет известное значение относительно коэффициента усиления тракта.

Ввод ослабления в передающий тракт при помощи аттенюаторов (АТТ) ПРД позволяет снизить коэффициент усиления и убрать самовозбуждение тракта (происходит это за счет увеличения $|K_{п\text{ ОС}}|$ по отношению к $K_{у\text{ тракта ПРД}}$). Расчет по формуле (9) позволяет вычислить максимальный коэффициент усиления ПРД, а соответственно подтвердить работоспособность передающего канала [92-95].

$$K_{у\text{ ПРД макс.}} = |K_{п\text{ ОС}}| + \sum R_{\text{АТТ ПРД}} \quad (9)$$

При самовозбуждении канала на КС ПРД СКМ, возникает напряжение, соответствующее уровню логической «1». Так как передающий канал работает в импульсном режиме, то форма импульса напряжения с ДД будет соответствовать рисунку 58.

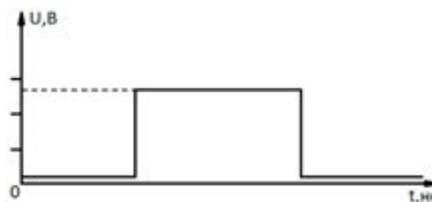


Рис. 58. Форма импульса напряжения с вывода КС ПРД при самовозбуждении тракта

При замыкании СВЧ-переключателя ПРД самовозбуждение тракта может не возникнуть, так как фазовые характеристики не соответствуют условию $\Delta\varphi_{\text{ПРД}} = 0$.

Для возникновения самовозбуждения тракта требуется изменять состояние разрядов фазовращателей до появления самовозбуждения.

При отсутствии самовозбуждения канала ПРД при всех состояниях фазовращателей и аттенюаторов - канал ПРД является неисправным.

3.1.3.2. Методика контроля коэффициента усиления приемного канала

ППМ включен и работает в штатном режиме на прием. На вход приемного канала при замыкании СВЧ-выключателя ПРМ через направленный ответвитель приемного канала проникает часть СВЧ-мощности, ответвленная с выхода приемного канала через НО с СКМ ПРМ. Возникает самовозбуждение приемного канала из-за ПОС. Направление СВЧ-сигнала при самовозбуждении приемного тракта в схеме контроля коэффициента усиления с помощью ПОС изображено на рисунке 59.

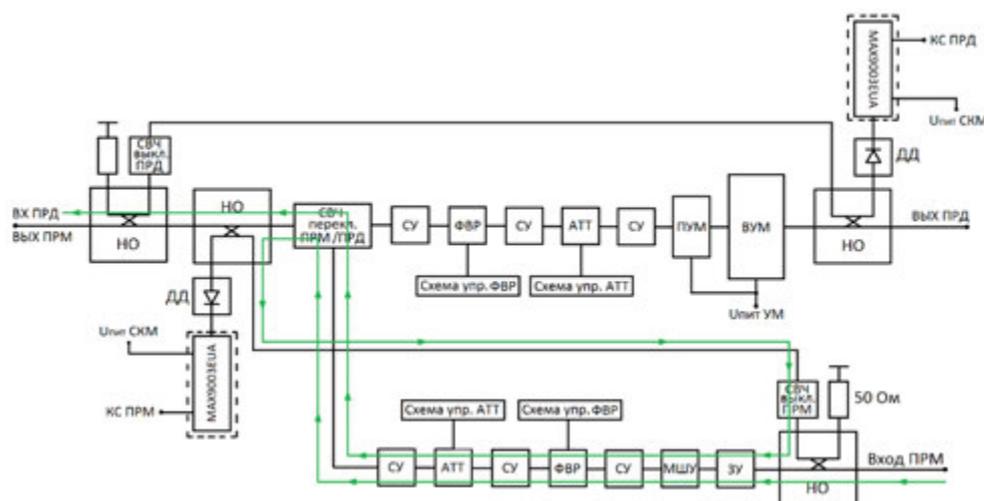


Рис. 59. Направление СВЧ-сигнала при самовозбуждении ПРМ тракта в схеме контроля коэффициента усиления с помощью ПОС

Ответвление ПОС ПРМ имеет известное значение относительно коэффициента усиления тракта.

Ввод ослабления в приемный тракт при помощи аттенюаторов (АТТ) ПРМ позволяет снизить коэффициент усиления и убрать самовозбуждение тракта. Расчет по формуле (10) позволяет вычислить максимальный коэффициент усиления ПРМ, а соответственно подтвердить работоспособность приемного канала [92-95].

$$K_{y \text{ ПРМ макс.}} = |K_{\text{П ОС}}| + \sum R_{\text{АТТ ПРМ}} \quad (10)$$

При самовозбуждении канала на КС ПРМ СКМ, возникает напряжение, соответствующее уровню логической «1».

При замыкании СВЧ-выключателя ПРМ самовозбуждение тракта может не возникнуть, так как фазовые характеристики не соответствуют условию $\Delta\varphi_{\text{ПРМ}} = 0$. Для возникновения самовозбуждения тракта, требуется изменять состояние разрядов фазовращателей до появления самовозбуждения.

При отсутствии самовозбуждения канала ПРМ при всех состояниях фазовращателей и аттенюаторов - канал ПРМ является неисправным.

3.2. Экспериментальная проверка методики контроля коэффициента усиления ПРМ и ПРД с помощью ПОС

Методика контроля коэффициента усиления с помощью положительной обратной связи в составе конструкции ППМ АФАР в настоящее время не применялась. Но провести экспериментальную проверку можно на образце ППМ АФАР с СКМ и подключенных к нему внешних измерительных приборах. Такими приборами являются направленные ответвители, аттенюаторы, амплитудный детекторы, осциллограф и измеритель мощности.

3.2.1. Структурная схема экспериментального стенда

На рисунке 60 изображена структурная схема экспериментального стенда, для проверки методики контроля коэффициента усиления ПРМ и ПРД с помощью ПОС.

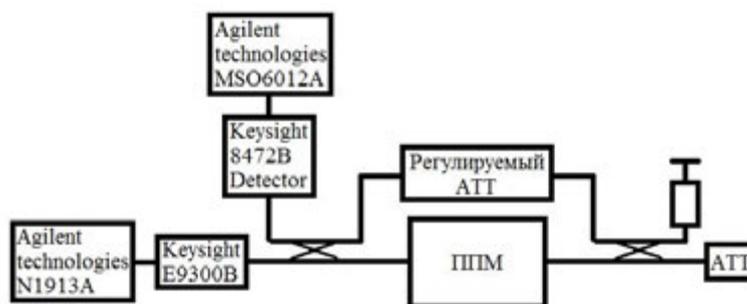


Рис. 60. Структурная схема экспериментального стенда

Регулируемый аттенюатор используется для регулировки коэффициента передачи петли обратной связи. Вход и выход модуля в составе стенда может меняться в зависимости от проверки канала ПРМ или ПРД.

Используемый экспериментальный образец ППМ АФАР, показан на рисунке 20.

3.2.1.1. Методика измерения коэффициента усиления приемного канала с помощью положительной обратной связи

Входная мощность при эксперименте составляет -30 дБм (1 мкВт). Коэффициент усиления тракта ПРМ неизвестен. Коэффициент передачи петли обратной связи, заданный с помощью регулируемого аттенюатора, составляет -20дБ. Приемный канал ППМ работает в штатном режиме. При замыкании СВЧ-выключателя ПРМ возникает самовозбуждение канала (в соответствии с п.3.1.1). Амплитуда и форма сигнала с выхода детекторного диода при возникновении самовозбуждения канала ПРМ изображены на рисунке 61.



Рис. 61. Сигнал с выхода детекторного диода при возникновении самовозбуждения канала ПРМ

Включается оригинальное специализированное ПО. Происходит поочередное включение разрядов ослабления от 0,5 дБ до 31,5 дБ (0,5 дБ, 1,0 дБ, 1,5 дБ, ..., 31,5 дБ). При вводе суммы разрядов ослабления равной 4,5 дБ (разряды 0,5 дБ и 4 дБ) самовозбуждение канала не пропадает. А при вводе суммы разрядов ослабления равной 5 дБ (разряды 1 дБ и 4 дБ) самовозбуждение канала пропадает. Амплитуда сигнала с выхода детекторного диода при отсутствии самовозбуждения канала ПРМ, изображены на рисунке 62.

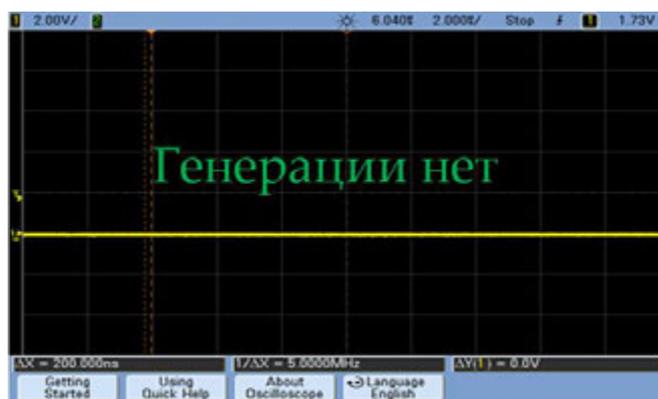


Рис. 62. Уровень сигнала с выхода детекторного диода при отсутствии самовозбуждения канала ПРМ

Прокрутив все состояния фазовращателей и убедившись в том, что самовозбуждение не возникает, ПО производит расчет $K_{y \text{ ПРМ макс.}}$ по формуле (10) и вычисляет максимальный коэффициент усиления СВЧ-тракта.

$$K_{y \text{ ПРМ макс.}} = |K_{\text{п ОС}}| + \sum R_{\text{АТТ ПРМ}} = |-20| + 5 = 25 \text{ [дБ]} \pm \text{ПИ}$$

$$(K_{y \text{ ПРМ макс.}} - R_{\text{АТТ младш.}}) < K_{y \text{ ПРМ}} \leq K_{y \text{ ПРМ макс.}}$$

Точность получаемого значения коэффициента усиления данным методом составляет величину младшего разряда СВЧ-аттенюатора, установленного в СВЧ-тракте. На основе этого можно сделать вывод что коэффициент усиления приемного канала ППМ составляет от 24,5 дБ до 25 дБ \pm ПИ.

3.2.1.2. Методика измерения коэффициента усиления передающего канала с помощью положительной обратной связи

Входная мощность при эксперименте составляет 5 дБм (3 мВт). Коэффициент усиления тракта ПРД ППМ неизвестен. Коэффициент передачи петли обратной связи, заданный с помощью регулируемого аттенюатора, составляет -30дБ. Передающий канал ППМ работает в штатном режиме. При замыкании СВЧ-выключателя ПРД возникает самовозбуждение канала. Форма сигнала с детекторного диода при возникновении самовозбуждения канала ПРД будет такой же, как и в канале ПРМ (рис. 61). Амплитуда сигнала будет отличаться.

Включается оригинальное специализированное ПО. Происходит поочередное включение разрядов ослабления от 0,5 дБ до 31,5 дБ (0,5 дБ, 1,0 дБ, 1,5 дБ, ..., 31,5

дБ). При вводе суммы разрядов ослабления равной 5 дБ (разряды 1 дБ и 4 дБ) самовозбуждение канала не пропадает. При вводе суммы разрядов ослабления равной 5,5 дБ (разряды 0,5 дБ, 1 дБ и 4 дБ) самовозбуждение канала пропадает. Амплитуда и форма сигнала с детекторного диода при отсутствии самовозбуждения канала ПРД будут такими же, как и в канале ПРМ (рис. 62).

Прокрутив все состояния фазовращателей и убедившись в том, что самовозбуждение не возникает, ПО производит расчет $K_{y \text{ ПРД макс.}}$ по формуле (9) и вычисляет максимальный коэффициент усиления СВЧ-тракта.

$$K_{y \text{ ПРД макс.}} = |K_{y \text{ ОС}}| + \sum R_{\text{АТТ ПРД}} = |-30| + 5,5 = 35,5 \text{ [дБ]} \pm \text{ПИ}$$

$$(K_{y \text{ ПРД макс.}} - R_{\text{АТТ младш.}}) < K_{y \text{ ПРД}} \leq K_{y \text{ ПРД макс.}}$$

Точность получаемого значения коэффициента усиления данным методом составляет величину младшего разряда СВЧ-аттенюатора, установленного в СВЧ-тракте. На основе этого можно сделать вывод что коэффициент усиления ПРД составляет от 35 дБ до 35,5 дБ \pm ПИ. Если входная мощность известна, то можно вычислить выходную мощность передающего канала:

1. $P_{\text{ВЫХ МИН ПРД}} = P_{\text{ВХ}} + K_{y \text{ МИН ПРД}} = 5 \text{ [дБм]} + 35 \text{ [дБ]} = 40 \text{ [дБм]} = 10 \text{ [Вт]}$
2. $P_{\text{ВЫХ МАКС ПРД}} = P_{\text{ВХ}} + K_{y \text{ МАКС ПРД}} = 5 \text{ [дБм]} + 35,5 \text{ [дБ]} = 40,5 \text{ [дБм]} \approx 11,2 \text{ [Вт]}$

Истинное значение выходной мощности, полученное с помощью разработанного метода, находится в диапазоне от 10 Вт до 11,2 Вт. При повышении выходной мощности, точность выдаваемых значений по разработанной методике, начинает значительно снижаться. Решением этой проблемы может быть применение методов изменения АЧХ СВЧ-тракта за счет согласования импедансов линий передачи в заданном диапазоне частот. Если провести наиболее точную подстройку регулируемого аттенюатора на экспериментальном стенде, то можно вычислить значение коэффициента усиления и выходной мощности близкое к истинному.

Для данного ППМ значение ослабления ПОС с помощью аттенюатора было выставлено на уровень 30,2 [дБ]. После повторного проведения эксперимента, коэффициент усиления ПРД составил 35,2 дБ (разряды 1дБ и 4дБ). Выходная мощ-

ность составила 40,2 дБм, что соответствует 10,5 Вт. В результате проведения прямых измерений выходной мощности было получено значение 10,6 Вт. Отличие составило $\approx 0,1$ дБ.

3.2.2. Анализ экспериментальных данных

Экспериментальные исследования проводились на десяти опытных образцах ППМ АФАР. По разработанной методике, описанной в п.3.1, были получены коэффициенты усиления ПРМ и ПРД ППМ АФАР. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение значений коэффициентов усиления ПРМ и ПРД полученных в ходе экспериментального исследования

Наим. образца	Приемный канал		Передающий канал	
	Измерения ПРМ по ТУ	Методика проверки K_y ПРМ с ПОС	Измерения ПРД по ТУ	Методика проверки K_y ПРД с ПОС
ППМ1	25,2±ПИ	25,0±ПИ – 25,5±ПИ	40,1±ПИ	39,7±ПИ – 40,2±ПИ
ППМ2	25,4±ПИ	25,0±ПИ – 25,5±ПИ	40,2±ПИ	40,0±ПИ – 40,5±ПИ
ППМ3	25,7±ПИ	25,5±ПИ – 26,0±ПИ	40,1±ПИ	40,0±ПИ – 40,5±ПИ
ППМ4	25,1±ПИ	25,0±ПИ – 25,5±ПИ	40,3±ПИ	39,8±ПИ – 40,3±ПИ
ППМ5	25,3±ПИ	25,0±ПИ – 25,5±ПИ	40,1±ПИ	40,0±ПИ – 40,5±ПИ
ППМ6	25,8±ПИ	25,5±ПИ – 26,0±ПИ	40,0±ПИ	39,7±ПИ – 40,2±ПИ
ППМ7	25,8±ПИ	25,5±ПИ – 26,0±ПИ	40,2±ПИ	39,9±ПИ – 40,4±ПИ
ППМ8	25,6±ПИ	25,5±ПИ – 26,0±ПИ	40,1±ПИ	39,9±ПИ – 40,4±ПИ
ППМ9	25,1±ПИ	25,0±ПИ – 25,5±ПИ	40,3±ПИ	39,8±ПИ – 40,3±ПИ
ППМ10	25,2±ПИ	25,0±ПИ – 25,5±ПИ	40,1±ПИ	39,7±ПИ – 40,2±ПИ

Как видно из таблицы 3, коэффициенты усиления, полученные в ходе измерений по ТУ, находятся в диапазонах значений коэффициентов усиления ПРМ и ПРД полученных по разработанной методике.

Из проведенного эксперимента можно сделать вывод, что реализация контроля коэффициентов усиления ПРМ и ПРД с помощью ПОС в составе ППМ АФАР, позволит с точностью младшего разряда АТТ определять действующее значение коэффициента усиления по разработанной методике. Для повышения точности определения коэффициента усиления канала можно провести дополнительную отстройку узла (при больших затратах времени) позволяющую проконтролировать коэффициент усиления с точностью $\approx 0,1$ дБ.

3.3. Проверка коэффициента усиления каналов в составе АФАР

На основе проведенных экспериментальных исследований был разработан алгоритм контроля коэффициента усиления канала ПРМ/ПРД, который может быть использован в составе АФАР. На рисунке 63 приведен алгоритм, который пошагово описывает контроль коэффициента усиления приемного канала, лежащего в диапазоне от 25 дБ до 29 дБ [96].

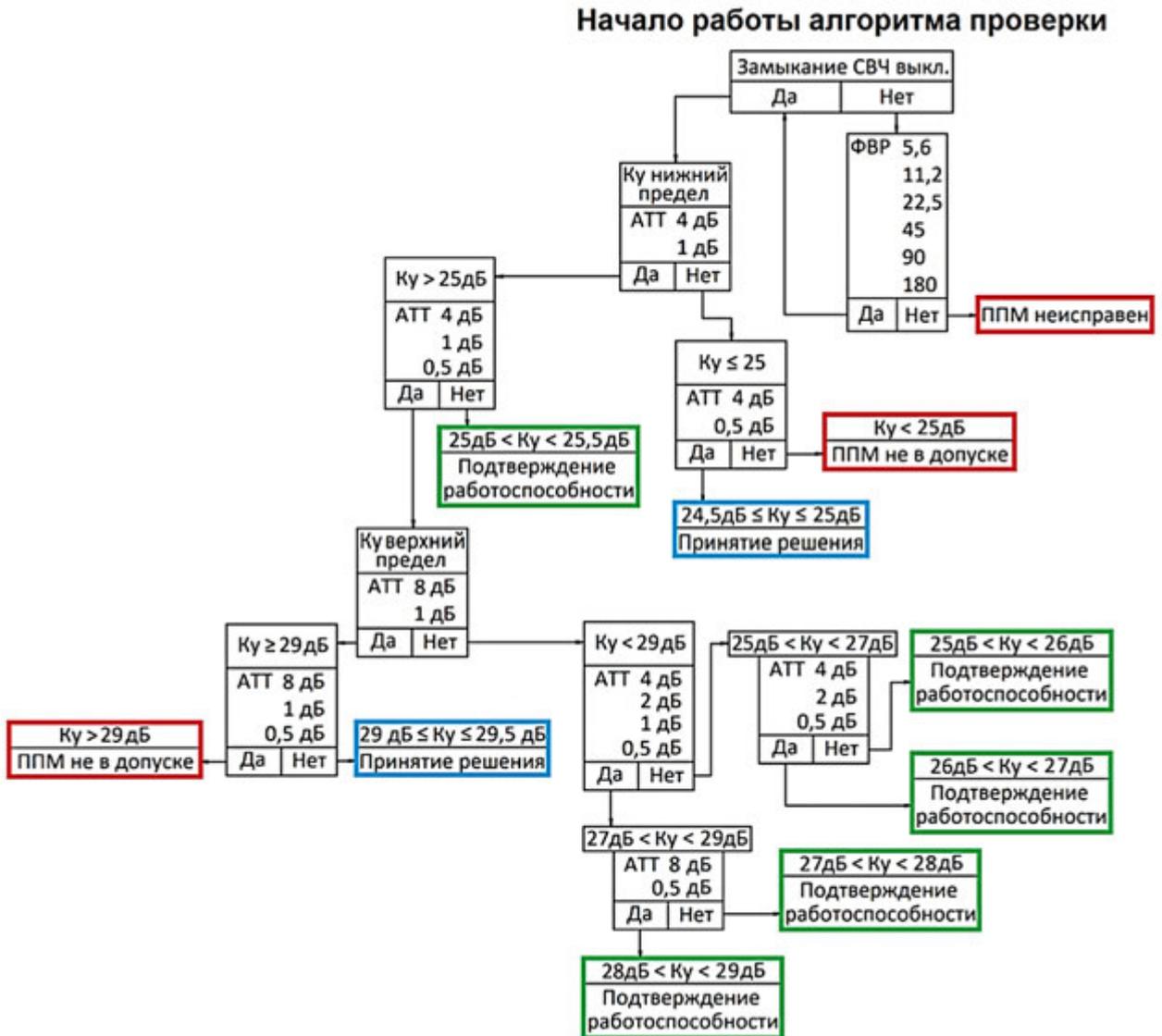


Рис. 63. Алгоритм проверки коэффициента усиления приемного канала АФАР в диапазоне значений от 25 дБ до 29 дБ

Проверка должна происходить в автоматическом режиме с помощью специализированного ПО. Время проверки коэффициента усиления экспериментальным путем составило менее 4 мкс. Проверка АФАР состоящей из 1000 каналов составит не более 4 мс (без учета задержек обработки КСИ устройством управления АФАР).

Проверка коэффициента усиления ПРМ/ПРД каналов может быть проведена как в лабораторных, так и в штатном режиме в составе изделия. Предложенная методика может использоваться для проверки коэффициентов усиления каналов ППМ в составе измерительных стендов и измерительных установок [97,98]. В АФАР применение такого метода контроля обеспечивает получение данных о работоспособности ППМ и коэффициенте усиления каналов с высоким быстродействием и точностью.

Условное изображения схемы подрешетки антенной с необходимыми элементами контроля коэффициентов усиления ПРМ/ПРД каналов с помощью ПОС представлено на рисунке 64.

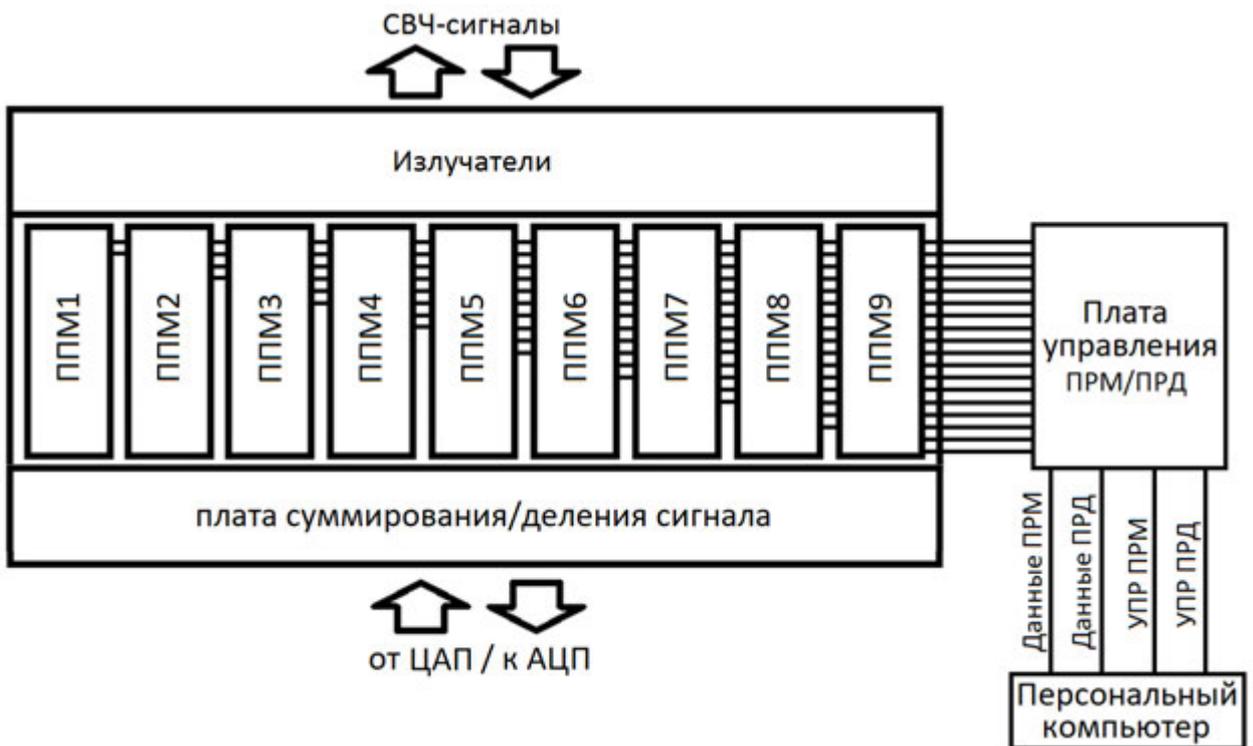


Рис. 64. Условное изображения схемы подрешетки антенной с необходимыми элементами контроля коэффициентов усиления ПРМ/ПРД каналов с помощью ПОС

Для корректной работы схемы контроля необходимо использовать по два вывода данных («Данные ПРМ» и «Данные ПРД») на каждый из ППМ АФАР. Через такие выводы будут передаваться КСИ с СКМ установленных в каналах. Управление амплитудами и фазами каналов производится с помощью схем управления, не

отображенных на рисунке 64. Подстройка (выравнивание) амплитуд и фаз происходит в автоматическом режиме с помощью специального программного обеспечения.

Методика проверки коэффициента усиления с помощью разработанного алгоритма контроля будет рассмотрена ниже на примере ППМ1.

Напряжения питания подается на приемный канал ППМ. Аттenuаторы и фазовращатели находятся в «нулевом» состоянии. Подается управляющий сигнал на СВЧ-выключатель ПРМ1. СВЧ-выключатель ПРМ1 замыкается. На выходе СКМ ПРМ1 появляется импульс напряжения (КСИ), сигнализирующий о возникновении самовозбуждения канала ПРМ1 из-за ПОС. С помощью специального программного обеспечения по разработанному алгоритму происходит вычисление требуемой суммы вводимых разрядов ослабления АТТ, позволяющей убрать самовозбуждение СВЧ-тракта ПРМ1. После того как импульс СКМ ПРМ1 исчезает, ПО производит перепроверку на случай возникновения повторного самовозбуждения при изменении состояний фазовращателей СВЧ-тракта. После подтверждения отсутствия импульса с СКМ ПРМ1 ПО завершает проверку выводя на экран коэффициент усиления канала ПРМ1. После получения данных о коэффициенте усиления каждого канала появляется возможность выровнять амплитуды каналов с минимальной неравномерностью 0,5 дБ. Выравнивание осуществляется за счет ослабления коэффициента усиления аттenuаторами, установленными в каналах ППМ.

Представленная методика проверки одинакова для каждого из ППМ.

Как было описано ранее, точность определения коэффициента усиления с помощью ПОС составляет величину младшего разряда ступенчатого аттenuатора, используемого в составе конструкции СВЧ-тракта.

Пример визуального оповещения об исправности ППМ в составе подрешетки антенной, изображен на рисунке 65.

Приемный канал								
26,4	26,1	26,5	26,3	26,2	26,6	26,1	26,7	26,6
ппм1	ппм2	ппм3	ппм4	ппм5	ппм6	ппм7	ппм8	ппм9

Передающий канал								
32,4	33,2	32,7	33,0	32,9	33,2	33,1	32,8	32,6
ппм1	ппм2	ппм3	ппм4	ппм5	ппм6	ппм7	ппм8	ппм9

Рис. 65. Подрешетка антенная с исправными ППМ

Пример визуального оповещения о неисправности ППМ в составе подрешетки антенной, изображен на рисунке 66.

Приемный канал								
-	26,1	26,5	26,3	26,2	26,6	-	26,7	26,6
ппм1	ппм2	ппм3	ппм4	ппм5	ппм6	ппм7	ппм8	ппм9

Передающий канал								
-	33,2	32,7	-	32,9	33,2	-	32,8	32,6
ппм1	ппм2	ппм3	ппм4	ппм5	ппм6	ппм7	ппм8	ппм9

Рис. 66. Подрешетка антенная с неисправными ППМ

При проверке электрических параметров в лабораторных условиях принимается решение о замене или ремонте неисправных ППМ. При работе в штатном режиме в составе изделия неисправные каналы отключают и формируют ДН.

Разработанная методика контроля электрических параметров имеет высокую точность и быстродействие. Недостатками являются высокие требования, предъявляемые к программному обеспечению (изменяемые под конкретные типы приборов) и уровню технологичности изготовления узлов контроля в составе конструкции ППМ.

ГЛАВА 4

4.1. Методика проверки коэффициента усиления приемного канала ППМ основанная на ответвлении части мощности передатчика в приемник

Контроль коэффициента усиления в составе ППМ необходим для определения уровня выходной мощности ППМ и задания калибровочных коэффициентов при подготовке АФАР к работе. После того как АФАР откалибрована и подготовлена к работе, можно начать формирование диаграммы направленности [99]. Добиться контроля коэффициента усиления с высокой точностью можно при помощи методики, описанной в главе 3. Для решения различных задач в процессе работы, ППМ должен иметь несколько вариантов проверки основных электрических параметров. Это позволит повысить точность получения результатов тестовых измерений, а также взаимозаменяемость элементов контроля в процессе эксплуатации.

Предлагаемая методика основана на ответвлении в приемный канал часть СВЧ-мощности, подаваемой на вход ПРД. С помощью данной методики можно с максимальным быстродействием оценить величину коэффициента усиления приемного канала ППМ с высокой точностью.

4.1.1. Структурная схема ППМ с узлами контроля коэффициента усиления с помощью внешнего сигнала, подаваемого на вход передающего канала

Упрощенная структурная схема ППМ (полная схема ППМ показана на рисунке 13) с узлами контроля коэффициента усиления второго приемного канала изображена на рисунке 67 [94].

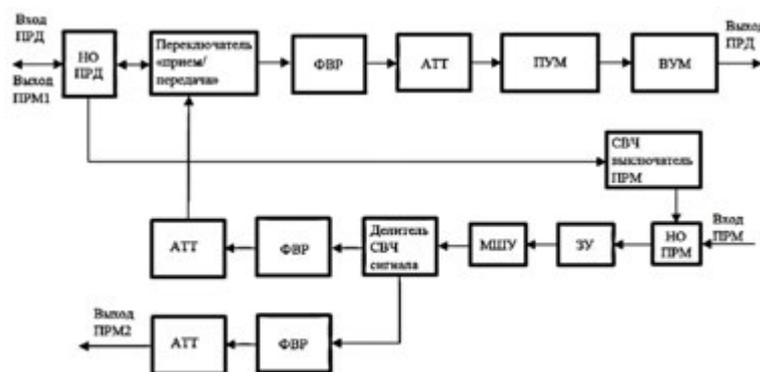


Рис. 67. Упрощенная структурная схема ППМ с узлами контроля коэффициента усиления второго приемного канала

Контроль коэффициента усиления приемного канала по разработанной методике может осуществляться только при условии отсутствия связи входов и выходов СВЧ-трактов ПРМ и ПРД между собой.

В качестве более наглядного примера можно привести структурную схему ППМ с несвязанными линиями передачи ПРМ и ПРД каналов, изображенную на рисунке 68.

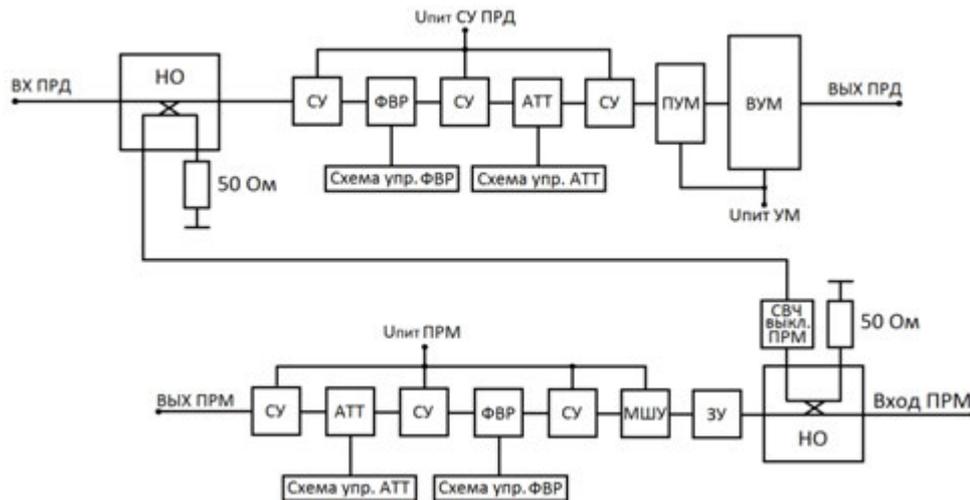


Рис. 68. ППМ с несвязанными линиями передачи каналов ПРМ и ПРД

В приведенной схеме контроль коэффициента усиления может осуществляться только в канале ПРМ2 (в соответствии с условием, описанным выше). Направление СВЧ-сигнала при возникновении связи между каналами ПРМ и ПРД, показано на рисунке 69 [94].

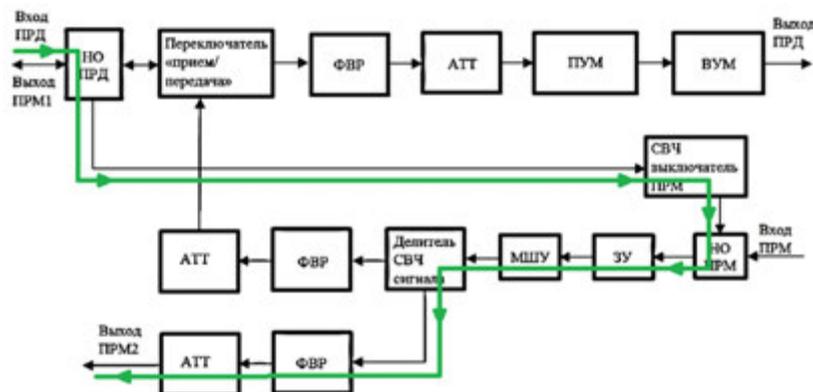


Рис. 69. Направление СВЧ-сигнала при возникновении связи между каналами ПРМ и ПРД

После установления связи между каналами появляется возможность провести контроль коэффициента усиления приемного канала №2.

4.1.2. Методика контроля коэффициента усиления приемного канала ППМ

Питание передающего канала отключено. Входная мощность подается на вход ПРД. За счет применения НО ПРД часть мощности через СВЧ-выключатель ПРМ ответвляется на вход ПРМ через НО ПРМ. Так как приемный канал работает в штатном режиме, то на его выходе имеется усиленный сигнал, по которому можно вычислить значение коэффициента усиления. Расчет требуемой входной мощности производится по формуле:

$$P_{\text{вх ПРМ}} = P_{\text{вх ПРД}} - \sum R_{\text{отв НО}} - R_{\text{СВЧ выкл.}} \quad (11)$$

где $P_{\text{вх ПРМ}}$ – требуемая входная мощность приемного канала; $P_{\text{вх ПРД}}$ – номинальное значение входной мощности передающего канала; $\sum R_{\text{отв НО}}$ – суммарное ответвление входной мощности передающего канала на вход приемного канала через НО; $R_{\text{СВЧ выкл.}}$ – потери в СВЧ-выключателе.

Для расчета $P_{\text{вх ПРМ}}$ по формуле (11) необходимо задать входную мощность ПРД (при штатном режиме работы на передачу) и $R_{\text{СВЧ выкл. ПРМ}}$ (указаны в паспорте на микросхему СВЧ-выключателя). Суммарное ответвление $\sum R_{\text{отв НО}}$ рассчитывается в зависимости от требуемого номинального уровня входной мощности подаваемой на вход приемного канала.

Для получения наиболее близких значений коэффициентов усиления приемного канала рекомендуется использовать схемное решение, изображенное на рисунке 68. Такое решение исключает влияния каналов друг на друга. При проектировании СВЧ-трактов на основе проведенных расчетов и при учете всех S-параметров элементов каналов ПРМ и ПРД можно добиться повышения функциональности изделия в целом, что актуально в области СВЧ-техники высокого класса.

Разработанная методика может применяться вместе с методикой контроля коэффициента усиления с помощью ПОС, описанным в главе 3. Для этого не понадобится вводить дополнительные элементы СВЧ-тракта, но потребуются скорректировать и дополнить программное обеспечение соответствующими алгоритмами вычислений.

4.2. Экспериментальная проверка коэффициента усиления приемного канала в составе ППМ по разработанной методике

Методика и схемотехнические решения, описанные в п. 4.1., были применены в составе ППМ АФАР X-диапазона частот. ППМ был разработан в рамках выполнения опытно-конструкторской работы на предприятии АО «НПП «Исток» им. Шокина». В процессе проведения работы выпущено более 4500 ППМ АФАР. Реализация разработанных схемотехнических решений и предложенной методики позволила калибровать (выравнивать) коэффициенты усиления каналов АФАР с высокой точностью и максимальным быстродействием. В настоящее время вводится производство таких типов ППМ АФАР по плановой программе 34000 шт. в год.

4.2.1. Реализация контроля коэффициента усиления приемного канала в составе приемо-передающего модуля

ППМ АФАР в котором реализован контроль коэффициента усиления с помощью внешнего сигнала, подаваемого на вход передающего канала, изображен на рисунке 70.

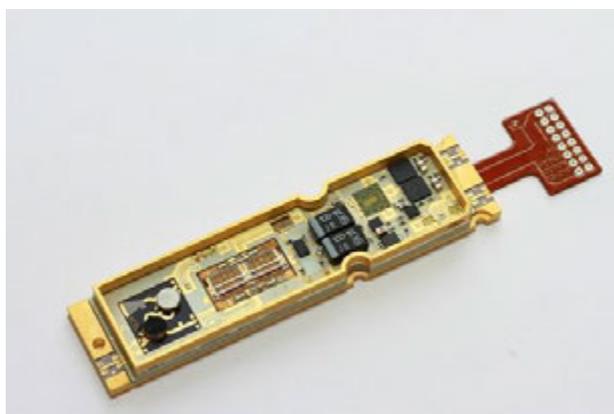


Рис. 70. ППМ АФАР с узлами контроля коэффициента усиления

ППМ имеет выходную мощность передающего канала более 15 Вт и коэффициент усиления приемного канала более 26 дБ. Все комплектующие СВЧ-элементы в составе конструкции ППМ производятся на предприятии АО «НПП «Исток» им. Шокина». Подробное описание входящих узлов представлено ниже.

Узел направленного ответвления мощности с передающего канала изображен на рисунке 71.

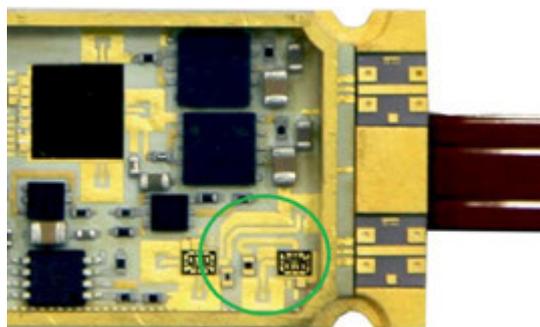


Рис. 71. Узел направленного ответвления мощности с передающего канала

Узел направленного ответвления мощности с передающего канала на вход приемного канала изображен на рисунке 72.

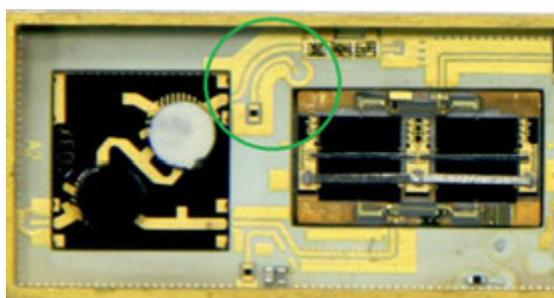


Рис. 72. Узел направленного ответвления мощности с передающего канала на вход приемного канала

Каждый из узлов ответвления имеет ослабление относительно основной линии передачи на вторичную линию НО равное -20 дБ. При таком суммарном ответвлении на входе приемного канала не удастся получить мощность равную -30 дБм. Величину ответвления больше -20 дБ применять нельзя, так как увеличиваются СВЧ-потери в основной линии передачи из-за влияния НО. Но даже при входной мощности -40 дБм на входе, приемный канал будет находиться в линейном режиме (из-за широкого динамического диапазона приемника).

4.2.2. Экспериментальная проверка методики контроля коэффициента усиления ППМ

Для проверки корректной работы узлов контроля в составе ППМ, была разработана структурная схема измерительного стенда, изображенная на рисунке 73.

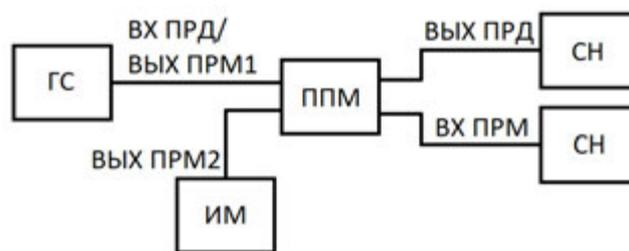


Рис. 73. Структурная схема измерительного стенда проверки работы узлов контроля в составе ППМ

В состав измерительного стенда входят:

- генератор сигналов Keysight Technologies N5183B (ГС);
- согласованная нагрузка НС3-20-13 «Микран» (СН);
- измеритель мощности Keysight Technologies 8478В (ИМ);
- измеряемый приемо-передающий модуль (ППМ).

При проведении измерений питание элементов передающего канала должно быть отключено.

Выходная мощность генератора сигналов составляет 0 дБм. Приемный канал работает в штатном режиме.

При подаче выходной мощности с ГС на выходе ПРМ, возникает мощность исследуемого ППМ которую считывает ИМ.

Полученные экспериментальные значения входной мощности приемного канала в зависимости от частоты, показаны на рисунке 74.

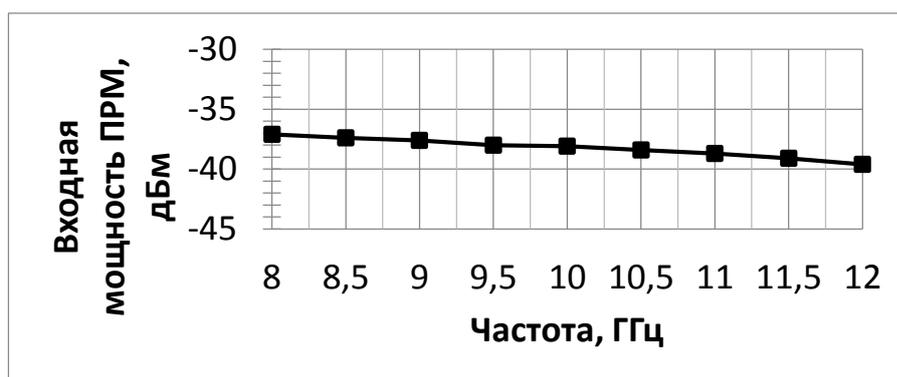


Рис. 74. Полученные экспериментальные значения входной мощности приемного канала в зависимости от частоты

Как видно из рисунка 74, входная мощность приемного канала изменяется в диапазоне от -37,1 дБм до -39,6 дБм. Полученные значения удовлетворяют требованиям по нахождению входной мощности приемного канала внутри своего динамического диапазона.

При экспериментальных исследованиях, измерения коэффициентов усиления проводились по методам, описанным в ТУ и с использованием разработанной методики. Сравнительные АЧХ полученных коэффициентов усиления в ходе экспериментальной проверки представлены на рисунке 75.

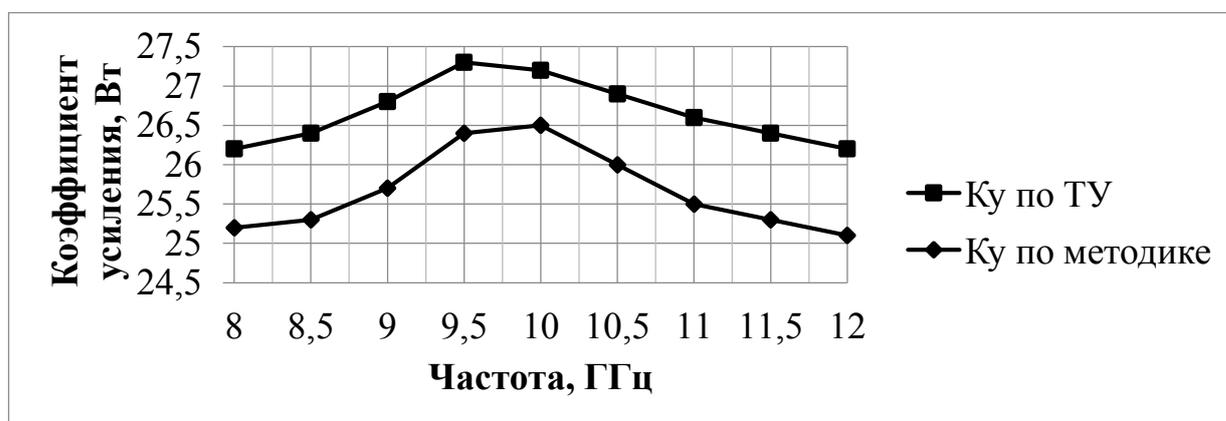


Рис. 75. Сравнительные АЧХ полученных коэффициентов усиления в ходе экспериментальной проверки

Как видно из графика, характер линий коэффициентов усиления имеет схожую форму, но имеет различие в АЧХ. Связанно это с рассогласованием приемного тракта и узлов направленного ответвления с ПРД в ПРМ. Но если при измерениях в автоматическом режиме ввести уравнение (12), то кривая примет близкое значение по отношению к $K_{у по ТУ}$ (рисунок 76).

$$K_{у} = K_{у по методике} + (1 \pm 0,2) \pm ПИ [дБ] \quad (12)$$

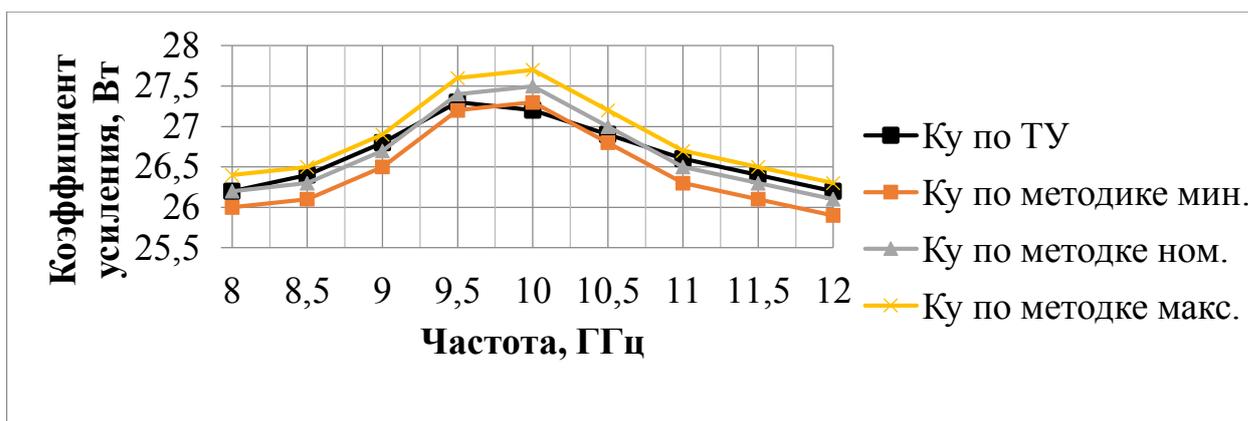


Рис. 76. Полученные АЧХ коэффициента усиления по методам ТУ и АЧХ коэффициентов усиления с помощью разработанной методики

Так как при формировании ДН в АФАР используют калибровку каналов между собой для реализации требуемого амплитудного распределения, следовательно, схема обеспечивает получение АЧХ лежащую в пределах $\pm 0,2 \pm \text{ПИ}$ [дБ] от значения, принятого за номинал. Неточности получения коэффициента усиления связаны с технологическими особенностями изготовления топологии многослойной платы и электрическими параметрами элементов, входящих в состав узла контроля.

4.2.3. Анализ полученных результатов эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на десяти образцах ППМ АФАР, имеющих в составе конструкции узлы контроля коэффициента усиления. Полученные значения коэффициентов усиления по методам ТУ и с использованием разработанной методики приведены в таблице 4. Данные пересчитаны с учетом формулы (12).

Таблица 4. Полученные значение коэффициентов усиления по методам ТУ и с использованием разработанной методики

Наим. образца	Метод измерения	Частота, ГГц				
		8	9	10	11	12
ППМ1	K_u по ТУ, дБ	26,2	26,8	27,2	26,6	26,2
	K_u по методике, дБ	26,1±0,2	26,7±0,2	27,0±0,2	26,4±0,2	26,0±0,2
ППМ2	K_u по ТУ, дБ	26,3	26,7	26,9	26,7	26,4
	K_u по методике, дБ	26,2±0,2	26,8±0,2	27,1±0,2	26,5±0,2	26,4±0,2
ППМ3	K_u по ТУ, дБ	26,2	26,6	26,8	27,0	26,5
	K_u по методике, дБ	26,0±0,2	26,7±0,2	26,9±0,2	26,8±0,2	26,4±0,2
ППМ4	K_u по ТУ, дБ	26,1	26,5	26,7	26,4	26,2
	K_u по методике, дБ	26,0±0,2	26,5±0,2	26,9±0,2	26,4±0,2	26,2±0,2
ППМ5	K_u по ТУ, дБ	26,4	26,8	27,2	27,0	26,5
	K_u по методике, дБ	26,3±0,2	26,8±0,2	27,1±0,2	27,1±0,2	26,4±0,2
ППМ6	K_u по ТУ, дБ	26,3	26,9	26,9	26,6	26,2
	K_u по методике, дБ	26,2±0,2	26,8±0,2	26,9±0,2	26,6±0,2	26,1±0,2
ППМ7	K_u по ТУ, дБ	26,4	26,7	27,1	27,0	26,7
	K_u по методике, дБ	26,3±0,2	26,7±0,2	27,1±0,2	27,0±0,2	26,8±0,2
ППМ8	K_u по ТУ, дБ	26,3	26,8	26,9	26,6	26,2
	K_u по методике, дБ	26,2±0,2	26,7±0,2	27,0±0,2	26,5±0,2	26,3±0,2
ППМ9	K_u по ТУ, дБ	26,2	26,6	26,9	26,3	26,0
	K_u по методике, дБ	26,0±0,2	26,6±0,2	26,8±0,2	26,4±0,2	26,2±0,2
ППМ10	K_u по ТУ, дБ	26,1	26,5	26,9	26,2	26,0
	K_u по методике, дБ	26,1±0,2	26,6±0,2	27,0±0,2	26,1±0,2	26,1±0,2

Примечание: в полученных экспериментальных данных необходимо учесть погрешности измерения приборов в составе измерительного стенда (\pm ПИ).

Как видно, из таблицы 4, полученные результаты в ходе экспериментальных исследований с точностью $\pm 0,2 \pm$ ПИ дБ совпали со значениями коэффициентов усиления приемных каналов, измеренных по методам ТУ.

Экспериментально измеренное время проверки коэффициента усиления приемного канала в одной точке рабочего диапазона частот составляет менее 80 нс.

Из результатов эксперимента можно сделать вывод, что применение разработанной методики и схемотехнических решений в составе конструкции ППМ АФАР, позволяет определять коэффициент усиления приемного канала с высокой точностью и быстродействием. Использование разработанной методики позволяет проводить калибровку (выравнивание) амплитуд каналов АФАР без включения ак-

тивных элементов передающего канала, экономя при этом затраты на дополнительное оборудование и время настройки РЛС. В настоящее время разработанные ППМ АФАР используются в составе РЛС с АФАР разработанной предприятием заказчика.

4.3. Калибровка коэффициентов усиления приемных каналов в составе подрешетки антенной

Применение узлов контроля коэффициента усиления в составе ППМ позволяет не только проверить коэффициент усиления каналов. При минимальных затратах времени можно вычислить калибровочные коэффициенты, вводимые при настройке и калибровке АФАР для выравнивания АЧХ каналов [100-103].

Недостатком разработанной методики является шум, вносимый в СВЧ-сигнал при его прохождении с входа передатчика на вход приемника. При дальнейшем прохождении этого сигнала по усилительному тракту ПРМ шумы усиливаются [104-108]. Разработанная методика используется в первую очередь чтобы откалибровать (выровнять) коэффициенты усиления каналов АФАР. В этом случае высокая точность определения коэффициента усиления до формирования ДН АФАР не требуется [109-113]. Ввод калибровочных коэффициентов может осуществляться в автоматическом режиме при помощи специализированного ПО [114,115]. Применяемое ПО имеет схожий принцип работы с методикой проверки коэффициентов усиления ПРМ и ПРД описанный в главе 3.

ГЛАВА 5

5.1. Схема работы АФАР в режиме приема

Схема подрешетки антенной [116], включающей в свой состав ППМ работающие в режиме приема сигнала показана на рисунке 77. В составе АФАР подобных подрешеток антенных может быть более 100.

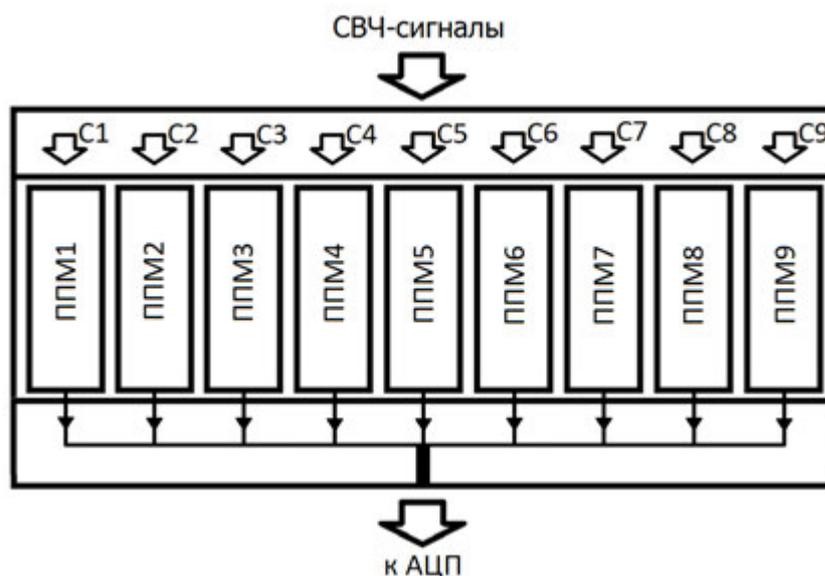


Рис. 77. Подрешетка антенная с приемно-передающими модулями, работающими в режиме приема сигнала

Количество ППМ в составе подрешеток может быть различным в зависимости от конструкции АФАР.

5.1.1. Принцип работы подрешетки антенной в режиме приема сигнала

Отраженный сигнал от объекта принимается приемной антенной. Принятые сигналы поступают на вход приемно-передающих модулей, работающих в режиме «прием». Сигналы усиливаются приемными каналами ППМ. Задается необходимое амплитудно-фазовое распределение и промодулированный сигнал передается на плату суммирования [117-124]. СВЧ-сигналы суммируются и передаются на приемник обработки сигналов. Производится перевод аналогового сигнала в цифровой. Происходит обработка поступившей информации о сканируемом объекте [125-128].

В современных АФАР величина входной мощности, поступающей на вход приемного канала составляет ≈ 1 мкВт (-30 дБм). Если коэффициент усиления приемного канала составляет около 30 дБ, то мощность на выходе приемного канала будет составлять 1 мВт (0 дБм). При суммировании более 1000 каналов, мощность, поступающая на вход приемника обработки сигналов будет составлять около 1 Вт. Такой уровень входной мощности для современных приемников обработки сигналов является приемлемым.

5.1.2. Помеховый сигнал высокого уровня мощности на входе приемного канала

Штатный режим работы ППМ может быть нарушен внешними помеховыми сигналами, затрудняющими сканирование окружающего пространства. Связано это с неправильным распределением мощности передающих каналов, работающих в штатном режиме рядом с приемной АФАР [129,130] или направленным облучением от цели [131].

При высоком уровне входной мощности срабатывает защита (защитное устройство) приемного канала и происходит переход в режим ограничения. Защитное устройство обязательно устанавливается в составе конструкции каждого приемного канала модуля [132]. При отсутствии защитного устройства и присутствии высокого уровня мощности на входе приемного канала СВЧ-тракт с большой вероятностью выйдет из строя. При срабатывании защитного устройства усилители СВЧ-тракта находятся в режим глубокого насыщения и получение информации об объекте затрудняется. К тому же усилители приемного канала, работающие в режиме глубокого насыщения, при длительном воздействии могут выйти из строя, что приведет приемные каналы АФАР в неисправное состояние.

При перенасыщении каналов входной мощностью, на выходе каждого приемного канала ППМ амплитуда выходного сигнала будет составлять более 15 мВт. При суммировании сигналов более 1000 каналов, мощность, подаваемая на вход приемника обработки сигналов, будет составлять более 15 Вт, что приведет к выходу его из строя.

Для предотвращения выхода из строя приемника обработки сигналов АФАР требуется минимизировать подаваемую на него входную мощность и обеспечить получение информации об облучении АФАР в режиме приема сигнала.

5.2. Используемый метод ограничения мощности входящих сигналов

Наиболее распространенным методом ограничения сигналов большой мощности является установка защитного устройства (ЗУ) в начале СВЧ-тракта (рис.2) [133].

Основными электрическими параметрами ЗУ являются:

- максимально допустимая входная мощность;
- выходная мощность ЗУ в режиме запираения;
- СВЧ-потери в режиме пропускания сигнала;
- время восстановления ЗУ в режим пропускания после воздействия высокого уровня мощности.

Различают два основных вида ЗУ: ограничительные и переключательные [134].

Ограничительные ЗУ основаны на методе обратимого пробоя полупроводникового диода, при котором возникает высокий коэффициент отражения и высокий уровень мощности не попадает в приемный тракт. Такие ЗУ называют пассивными, так как для их работы не нужен источник питания [135]. Пассивные ЗУ обычно срабатывают при уровне входной мощности около 15 мВт.

Переключательные ЗУ основаны на быстродействующих pin-диодах с малой собственной емкостью. Такие элементы имитируют короткое замыкание, разрыв линии передачи или оба случая сразу.

На практике наиболее часто применяются ограничительные ЗУ [136].

При входной мощности более 15 Вт требуется использовать ЗУ на ограничительных диодах. Количество диодов должно быть рассчитано с высокой точностью. Неправильный расчет количества диодов может привести к выгоранию ЗУ и просачиванию входной мощности в приемный канал ППМ. После просачивания входной мощности высокого уровня в СВЧ-тракт активные элементы приемного канала выйдут из строя.

Недостатками установки общего ЗУ в схему защиты приемника обработки сигналов являются:

- высокое выделение тепла в месте работы ограничителя, которое необходимо рассеять;
- ухудшение согласования СВЧ-тракта в месте установки общего ЗУ;
- СВЧ-потери мощности при работе ЗУ в режиме пропускания.

5.3. Методика защиты приемника обработки сигналов АФАР от высокого уровня входной мощности

При воздействии высокого входного уровня мощности (от 8 Вт до 10 Вт) на выходе приемного канала мощность составляет ≈ 15 мВт. ЗУ работает в режиме ограничения, поэтому мощность на выходе приемного канала не растет [137-141]. Приемный канал работает в штатном режиме, поэтому усилители усиливают проходящий сигнал до максимально возможного значения, ограниченного режимом насыщения транзистора.

Разработанная методика основана на отключении питания усилительных элементов СВЧ-тракта, что позволит внести СВЧ-потери в тракт и снизить уровень мощности, проникающий на вход приемника обработки сигналов.

5.3.1. Структурная схема защиты приемника обработки сигналов

Разработанная структурная схема защиты, показана на рисунке 78.

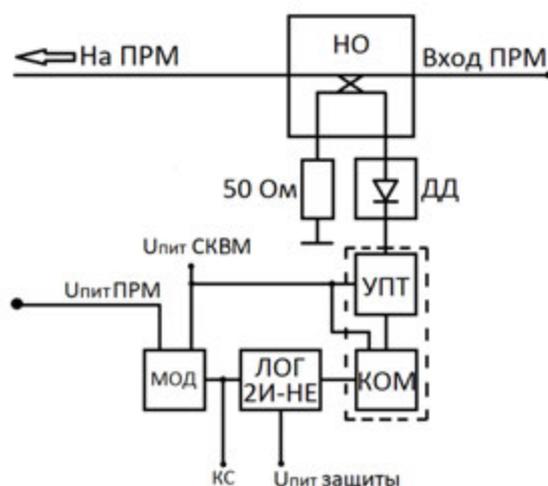


Рис. 78. Структурная схема защиты приемника обработки сигналов

Схема включает в свой состав СКМ (п.2.3), логический элемент «2И-НЕ» и модулятор питания (МОД).

Принцип контроля входной мощности высокого уровня основан на методике, описанном в главе 2.

5.3.2. Методика защиты приемника обработки сигналов

При возникновении высокого уровня мощности на входе приемного канала ДД открывается и преобразует поступающую на его вход мощность в выходное напряжение (в соответствии с ВВХ выбранного ДД). Регулировка максимальной входной мощности ДД производится за счет увеличения или уменьшения расстояния вторичной линии передачи НО от основной линии передачи (п. 2.3.2, глава 2). Номинал напряжения питания « $U_{\text{пит}}$ СКМ» составляет «5В». Номинал напряжения может быть различным в зависимости от выбранных элементов схемы. Напряжение питания « $U_{\text{пит}}$ защиты» постоянное. При отключении напряжения питания « $U_{\text{пит}}$ защиты» защита приемника обработки сигналов не будет реагировать на высокий уровень входной мощности. УПТ усиливает напряжение с выхода ДД и подает на КОМ. При превышении порогового напряжения микросхемы КОМ на выходе имеется логическая «1». Логическая «1» подается на вход микросхемы «2И-НЕ» и в соответствии с установленной логикой (при двух логических «1» нет выходного напряжения) подает сигнал отключения питания активных элементов приемного канала на модулятор. При этом активные элементы вместо усиления принимаемого сигнала значительно ослабляют СВЧ-сигнал в приемном тракте.

Для схемы, изображенной на рисунке 11, СВЧ-потери будут высчитываться по формулам:

$$P_{\text{вых ПРМ1}} = P_{\text{вх ПРМ}} - R_{\text{но защ. АЦП}} - R_{\text{но ПРМ1}} - R_{\text{но ПРМ2}} - R_{\text{зу}} - R_{\text{мшш}} - (3 \times R_{\text{су}}) - R_{\text{СВЧ дел.}} - R_{\text{АТТ}} - R_{\text{ФВР}} - R_{\text{СВЧ перекл.}} - R_{\text{НО СКМ ПРМ1}} - R_{\text{НО ПРД}} \quad (11)$$

$$P_{\text{вых ПРМ2}} = P_{\text{вх ПРМ}} - R_{\text{но защ. АЦП}} - R_{\text{но ПРМ1}} - R_{\text{но ПРМ2}} - R_{\text{зу}} - R_{\text{мшш}} - (3 \times R_{\text{су}}) - R_{\text{СВЧ дел.}} - R_{\text{АТТ}} - R_{\text{ФВР}} - R_{\text{СВЧ перекл.}} - R_{\text{НО СКМ ПРМ2}} \quad (12)$$

Из представленных формул (11) и (12) можно сделать вывод, что выходная мощность ПРМ1 и ПРМ2 будет составлять минимальную величину, что позволит защитить приемник обработки сигналов АФАР и активные элементы СВЧ-трактов ППМ от выхода из строя.

В схеме защиты приемника обработки сигналов оперативным контролем присутствия высокого уровня мощности на входе приемного канала является вывод «КС». С помощью этого вывода можно получить контрольный сигнал присутствия (КСП). Появление КСП в момент работы АФАР позволяет выявить облучение системы или некорректную работу элементов АФАР друг с другом.

Рассмотренную методику защиты приемника обработки сигналов АФАР можно применять совместно с методиками контроля электрических параметров, описанными в главах 2-4. При этом не ухудшаются параметры согласования элементов на входе приемного канала и повышается многофункциональность ППМ и АФАР в целом.

5.3.3. Рассеивание отраженного сигнала от защитного устройства в составе ППМ

При появлении высокого уровня мощности на входе приемного канала ППМ с установленным защитным устройством отраженная мощность будет отражаться обратно на вход приемного канала [142]. Происходит это из-за увеличения СВЧ-потерь при повышении входной мощности ЗУ. В таком режиме большая часть отраженной мощности высокого уровня должна быть поглощена.

Для решения этой проблемы на входе приемного канала устанавливают ферритовые вентили. Такие приборы позволяют не только согласовать вход СВЧ-тракта, но и перенаправить отраженный сигнал от защитного устройства в согласованную нагрузку для его поглощения.

Структурная схема с показанным направлением отраженной мощности от ЗУ в согласованную нагрузку, изображена на рисунке 79.

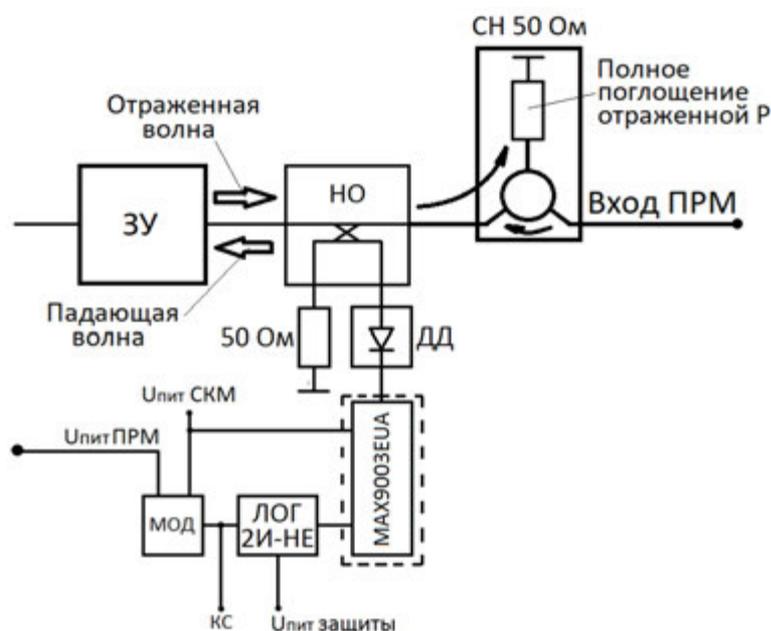


Рис. 79. Структурная схема с показанным направлением отраженной мощности от ЗУ в согласованную нагрузку

Метод поглощения отраженной мощности от ЗУ основан на изменении направления движения СВЧ-сигнала в ферритовых устройствах [143-150]. Происходит это за счет одностороннего прохождения электромагнитной волны, то есть малым затуханием волны, проходящей в одном направлении и очень большим для волны обратного направления.

СВЧ-сигнал высокой мощности при прохождении через вентиль движется в направлении входа защитного устройства. После отражения от ЗУ сигнал попадает на обратный вход вентиля по направлению входа приемного канала. В этом случае отраженный сигнал проходит в третье плечо вентиля, где установлена согласованная нагрузка с волновым сопротивлением 50 Ом (СН 50 Ом на рисунке 79). При правильном конструировании и расчете согласованной нагрузки, сигнал, отраженный от ЗУ, будет поглощен. При не правильном проектировании согласованной нагрузки, большая часть СВЧ-мощности будет отражена на вход приемного канала.

Область установки согласованной нагрузки должна обладать высоким теплоотводом, так как поглощение отраженной мощности вызывает повышенное тепловыделение. Для этого используются материалы с высоким значением теплопроводности. Такими материалами могут быть различные композиты (AlSiC) [151-158],

молибденовые сплавы или любой другой материал, имеющий высокую теплопроводность и совместимый КТР с материалом теплоотводящего основания ППМ и используемой ферритовой подложки вентиля.

5.3.4. Задержки реагирования защиты приемника обработки сигналов АФАР

Основными элементами, влияющими на восстановление системы после воздействия на вход приемного канала мощности высокого уровня, являются: детекторный диод, усилитель постоянного тока, компаратор, микросхема «2И-НЕ» и модулятор питания. При расчете режимов работы защиты необходимо учитывать время реагирования на помеховый сигнал высокого уровня мощности и ее восстановления. Для расчета этих двух электрических параметров суммируются задержки реагирования и восстановления всех элементов схемы защиты. Расчет производится по формулам:

$$\tau_{\text{зад.защ.реаг.}} = \tau_{\text{СКМ.реаг.}} + \tau_{\text{2и-не.реаг.}} + \tau_{\text{мод.реаг.}} \quad (13)$$

$$\tau_{\text{зад.защ.восст.}} = \tau_{\text{СКМ.восст.}} + \tau_{\text{2и-не.восст.}} + \tau_{\text{мод.восст.}} \quad (14)$$

Из представленных формул можно сделать вывод, что при конструировании схемы защиты приемника обработки сигналов АФАР необходимо подбирать элементную базу в зависимости от режима работы элементов управления АФАР. Задержки реагирования и восстановления должны быть учтены во временных окнах при которых АФАР находится в отключенном состоянии.

5.4. Экспериментальная проверка методики защиты приемника обработки сигналов АФАР

Экспериментальная проверка методики проводилась на образце ППМ АФАР с встроенными логическими элементами запирающего канала ПРМ при подаче логической «1». В качестве усилителя, формирующего помеховый сигнал высокого уровня мощности, был выбран ППМ АФАР с встроенной СКМ имитирующей присутствие сигнала высокой мощности на входе ПРМ.

ППМ АФАР с логическими элементами запирающего канала ПРМ приведен на рисунке 80 [159-161].

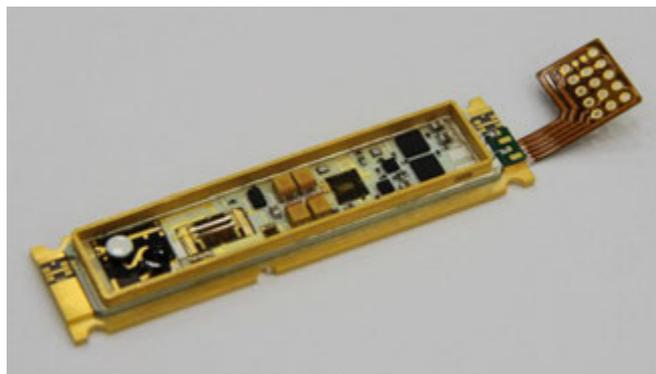


Рис. 80. ППМ АФАР с логическими элементами запираания канала ПРМ

Логические элементы, используемые в составе ППМ, при возникновении КС ПРМ с СКМ отключают питание активных элементов приемного канала (канал выключен).

ППМ имитирующий сигнал высокой мощности на входе ПРМ с встроенным узлом СКМ, показан на рисунке 20 п.2.4.1.

5.4.1. Структурная схема экспериментального стенда

Структурная схема экспериментально-измерительного стенда представлена на рисунке 81.

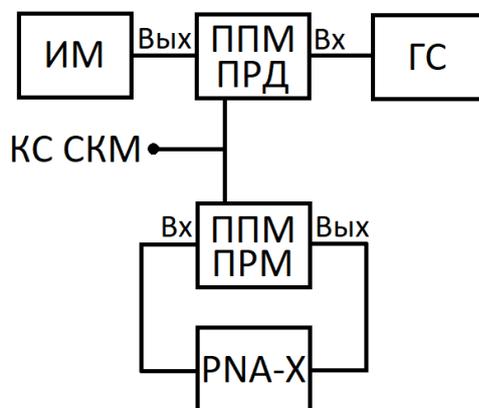


Рис. 81. Структурная схема экспериментально-измерительного стенда проверки методики защиты приемника обработки сигналов

В состав экспериментально-измерительного стенда входят:

- измеритель мощности Keysight Technologies 8478B (ИМ);
- генератор сигналов Keysight Technologies N5183B (ГС);
- векторный анализатор цепей PNA-X N5242B серии PNA-X, 26,5 ГГц (PNA-X);
- ППМ АФАР с встроенным узлом СКМ (ППМ ПРД);

- ППМ АФАР с логическими элементами запирающего канала ПРМ (ППМ ПРМ).

5.4.2. Методика проверки защиты приемника обработки сигналов

При включении ПРД ППМ в штатный режим работы, на выходе СКМ возникает КСИ, сигнализирующий о том, что в линии передачи СВЧ-тракта присутствует мощность выше 5 Вт. ПРМ ППМ работает в штатном режиме и при возникновении на управляющем контакте «блокировка» логической «1» питание активных элементов ПРМ отключается. Экспериментальная проверка доказывает, что разработанная методика позволяет отключить питание активных элементов ПРМ при возникновении на входе ПРМ мощности высокого уровня.

При экспериментальной проверке были измерены задержки реагирования схемы защиты приемника обработки сигналов, а также времени восстановления работы канала при исчезновении помехового сигнала на входе ПРМ.

При измерениях учитывался КСИ, поступающий с компаратора. К данному значению необходимо добавить задержки реагирования микросхемы «2И-НЕ» и модулятора управления напряжением питания. Расчет реагирования и восстановления производился по формулам (13) и (14). Подставив данные в формулы получим:

$$\tau_{\text{зад.защ.реак.}} = 250 \text{ [нс]} + 10 \text{ [нс]} + 25 \text{ [нс]} \approx 285 \text{ [нс]}$$

$$\tau_{\text{зад.защ.восст.}} = 250 \text{ [нс]} + 10 \text{ [нс]} + 40 \text{ [нс]} \approx 300 \text{ [нс]}$$

Полученные значения расчета времени реагирования и восстановления имеют близкие значения относительно друг друга. Большую задержку по реагированию и восстановлению в составе узла СКМ вносит УПТ. Применяв другую элементную компонентную базу можно добиться значительного уменьшения времени реагирования и восстановления СКМ.

5.4.2. Анализ полученных данных экспериментальной проверки

Проведенный эксперимент показал, что схема защиты приемника обработки сигналов АФАР может применяться в составе ППМ АФАР. Полученные данные о временных задержках реагирования и восстановления линейного режима работы ПРМ показали значения от 285 нс до 300 нс. Эксперимент доказывает, что разра-

ботанная методика с высоким быстродействием получения КСИ может применяться в ППМ АФАР для дальнейшего отключения питания ПРМ. При использовании элементной компонентной базы СКМ с более высоким быстродействием, возможно уменьшение времени задержки реагирования и восстановления, что позволит применять эту схему в СВЧ-трактах сверхбыстрого реагирования.

5.5. Методика адаптивного изменения временных диаграмм

Разработанная методика позволяет не только отключить питание активных элементов приемного канала модуля, но и обеспечить систему управления и контроля АФАР необходимыми данными об электрических параметрах помехового сигнала проходящего на вход приемника [162]. За счет обработки контрольного сигнала (КС на рисунке 78) можно вычислить скважность, длительность и амплитуду сигнала, проходящего на вход приемного канала АФАР. При появлении помехового сигнала на выходе «КС», ППМ должен переводиться в адаптивный импульсный режим работы. По форме проходящего импульса помехового сигнала на устройство обработки сигналов, вычисляется его скважность и длительность. После этого корректируются параметры импульсов управления ППМ. Таким образом, при наличии помехового сигнала на входе приемных каналов активные элементы ПРМ отключены, а после окончания воздействия помехового сигнала будет подан сигнал с передающего канала. В оставшийся интервал времени до начала воздействия помехового сигнала включается работа приемных каналов. Если у облучаемого объекта нет подобного адаптивного режима работы, то объект, излучающий помеховый сигнал будет «ослеплен».

Пример корректировки параметров импульсов управления ППМ, показан на рисунке 82.

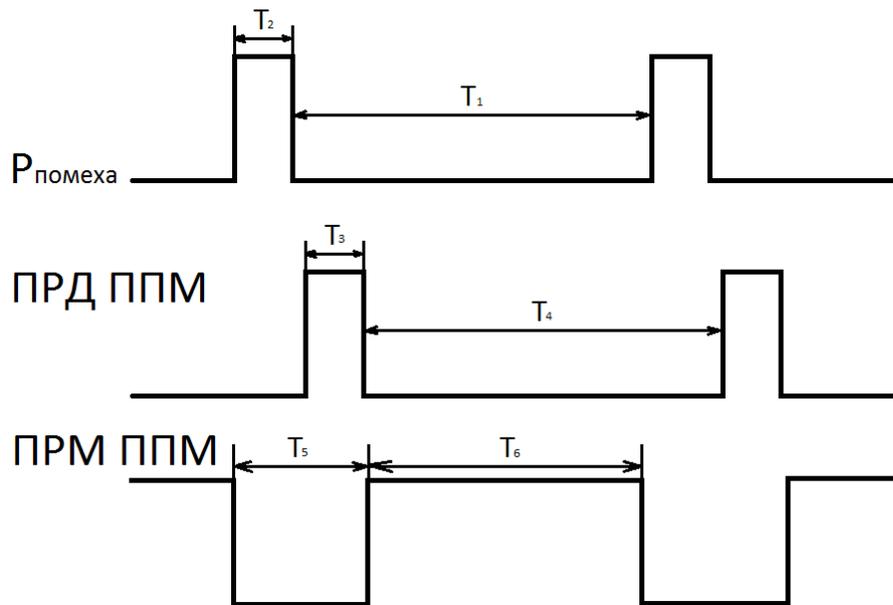


Рис. 82. Временная диаграмма работы ППМ после корректировки параметров импульсов управления

Для расчета параметров помехового сигнала требуется знать время восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия высокого уровня мощности на вход приемника.

5.6. Методика проверки времени восстановления коэффициента передачи ПРМ при подаче высокого уровня мощности на приемный тракт

При проектировании АФАР необходимо рассчитать временные задержки импульсных сигналов управления, возникающие в системе при ее работе. Одним из важных электрических параметров является время восстановления коэффициента передачи приемного канала при воздействии на вход импульсной (непрерывной) мощности высокого уровня (более 8 Вт) [163].

Попадание на вход приемного канала ППМ мощности высокого уровня может возникнуть:

- при не правильном построении АФАР. При этом выходная мощность передающей антенны может просачиваться на вход антенны работающей в режиме приема (низкая развязка между каналами);
- при возникновении самовозбуждения передающего канала, что приводит к проникновению выходной мощности в приемный канал;

- при облучении приемной антенны сигналом высокой мощности из области сканирования;

- при отклонении ДН на большие углы (проблема обеспечения широкоугольного согласования).

При возникновении любой из причин, перечисленных выше необходимо знать временной интервал, через который система восстановит свой штатный режим работы. Зная этот интервал, можно разработать временную диаграмму работы АФАР и снизить вероятность выхода из строя входящих в нее элементов.

Общая проверка АФАР на время восстановления коэффициента передачи после воздействия высокой мощности на вход приемника необязательна, так как ППМ является основой ее конструкции. Измерение рассматриваемого параметра в составе ППМ позволяет получить все необходимые данные для задания режимов работы АФАР.

Методика проверки времени восстановления коэффициента передачи после воздействия высокого уровня мощности на вход приемного канала включает в себя два способа измерения с использованием одного или двух генераторов сигналов. При проверке разными методиками используются отличающиеся структурные схемы измерительных стендов. В лабораторных условиях использование той или иной методики обуславливается наличием необходимого испытательного оборудования [163].

Проверка по разработанной методике проводилась на ППМ разработанном в АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», который изображен на рисунке 83.

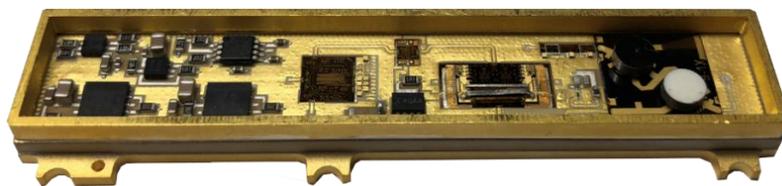


Рис. 83. ППМ, используемый для проверки разработанной методики определения времени восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия на его вход импульса высокой мощности

Для рассматриваемого ППМ максимальное значение времени восстановления коэффициента передачи должно составлять не более 100 нс (требования ТЗ на изделие). В качестве усилителя, формирующего помеховый сигнал высокого уровня мощности (от 8 Вт до 10 Вт), использовался ППМ, изображенный на рисунке 84.

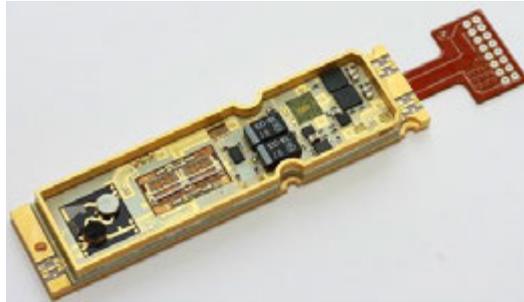


Рис. 84. ППМ, используемый для формирования помехового сигнала высокого уровня мощности

Применяемые ППМ являются одними из передовых изделий АО «НПП «Исток» им. Шокина» в области СВЧ-техники и включают в себя новейшие решения по проектированию и конструированию данного вида устройств.

5.6.1. Методика проверки времени восстановления коэффициента передачи с использованием одного генератора сигналов

Структурная схема стенда для измерений времени восстановления коэффициента передачи приемного канала с использованием одного генератора сигналов показана на рисунке 85 [163].

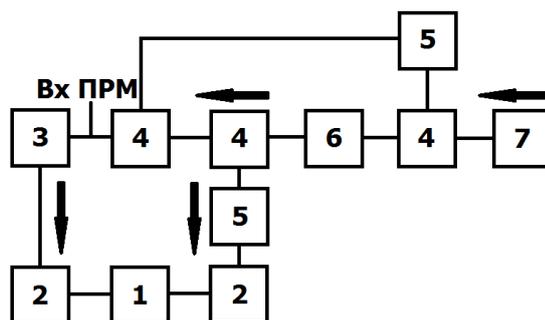


Рис. 85. Структурная схема стенда для измерений времени восстановления коэффициента передачи приемного канала

В состав стенда входят:

1. Осциллограф;
2. Амплитудный детектор;
3. Измеряемый модуль;

4. Направленный ответвитель -10дБ;
5. Атенюатор регулируемый;
6. Усилитель мощности 8 Вт;
7. Генератор непрерывных сигналов.

Направление движения СВЧ-энергии показано стрелками.

Сигнал подается с генератора непрерывных сигналов (7) через НО (4) на вход усилителя мощности (6). Усилитель мощности (6) работает в штатном режиме и, при наличии достаточной входной мощности, на выходе обеспечивает усиленный сигнал мощностью более 8 Вт. Этот сигнал ответвляется через НО (4), ослабляется регулируемым аттенюатором (5), преобразуется в напряжение амплитудным детектором (2) и передается на первый вход осциллографа (1). Большая часть сигнала высокой мощности проходит через НО (4) и попадает на вход приемного канала (Вх ПРМ) измеряемого модуля (3). Измеряемый модуль (3) работает в непрерывном режиме и вводится в режим ограничения (из-за установленного ЗУ на входе ПРМ). Ослабленный сигнал с выхода приемного канала детектируется амплитудным детектором (2) и подается на второй вход осциллографа (1). Так как ППМ, формирующий помеховый сигнал высокого уровня мощности, работает в импульсном режиме ПРД, на осциллографе будет наблюдаться задержка выходного импульса напряжения приемного канала относительно импульса помехового сигнала. Полученные экспериментальные результаты задержки импульсов на выходе и входе приемного канала, показаны на рисунке 86.



Рис. 86. Полученные экспериментальные результаты измерений времени восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия на вход импульса мощности 8 Вт

Время восстановления коэффициента передачи приемного канала измеряемого модуля составило $96 \text{ нс} \pm \text{ПИ}$ [163].

Достоинством структурной схемы стенда (рис. 85) является малое количество используемых приборов для измерительного стенда и простота его сборки. Из недостатков можно выделить невозможность перестройки импульсной мощности, подаваемой на вход приемника, без изменения номиналов ослабления аттенюаторов и направленных ответвителей [163].

Экспериментальные исследования проводились на десяти опытных образцах ППМ (рис. 83). Полученные значения времени восстановления коэффициента передачи ПРМ при воздействии на вход высокого уровня мощности по разработанной методике приведены в таблице 5 [163].

Таблица 5. Полученные значения времени восстановления коэффициента передачи ПРМ при воздействии на вход высокого уровня мощности по разработанной методике

Наименование образца	Результат эксперимента, нс
ППМ1	96 ± ПИ
ППМ2	91 ± ПИ
ППМ3	95 ± ПИ
ППМ4	97 ± ПИ
ППМ5	90 ± ПИ
ППМ6	93 ± ПИ
ППМ7	98 ± ПИ
ППМ8	97 ± ПИ
ППМ9	98 ± ПИ
ППМ10	94 ± ПИ

Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют в дальнейшем учесть временные задержки восстановления АФАР в штатный режим работы при пропадании высокого уровня мощности на входе приемного канала.

5.6.2. Методика проверки времени восстановления коэффициента передачи с использованием двух генераторов сигнала

Структурная схема стенда для измерений времени восстановления коэффициента передачи приемного канала с использованием двух генераторов сигнала показана на рисунке 87 [163].

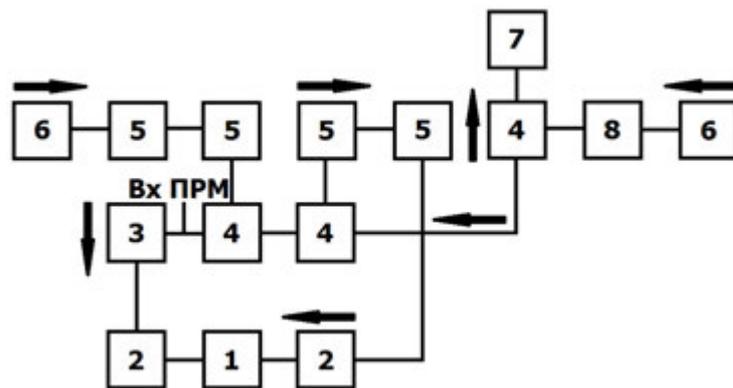


Рис. 87. Структурная схема стенда для измерений времени восстановления коэффициента передачи приемного канала

В состав стенда входят:

1. Осциллограф;
2. Амплитудный детектор;

3. Измеряемый модуль;
4. Направленный ответвитель -10дБ;
5. Аттenuатор 3дБ;
6. Генератор непрерывных сигналов;
7. Измеритель мощности;
8. Усилитель мощности 8 Вт.

Непрерывный сигнал с генератора сигналов (6) подается на вход усилителя мощности (8) и усиливается до выходной мощности 8 Вт. Требуемое значение мощности контролируется измерителем мощности (7) за счет ответвления части усиленного сигнала с основной линии передачи. Сигнал мощностью 8 Вт поступает на вход приемного канала (Вх ПРМ). НО (4) установленный перед приемным каналом ответвляет часть СВЧ-мощности на амплитудный детектор (2). Сигнал детектируется и поступает на первый вход осциллографа (1). Для регулировки входной мощности приемного канала в схеме установлен дополнительный генератор непрерывных сигналов (6). Поступивший сигнал высокой мощности на вход приемного канала ограничивается ЗУ, детектируется амплитудным детектором (2) и передается на второй вход осциллографа. После получения осциллографом двух импульсных СВЧ-сигналов на экране будет наблюдаться задержка выходного импульса напряжения приемного канала относительно импульса помехового сигнала.

Полученные экспериментальные результаты задержки импульсов на выходе и входе приемного канала, показаны на рисунке 88.



Рис. 88. Полученные экспериментальные результаты измерений времени восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия на вход импульса мощности 8 Вт

Время восстановления коэффициента передачи приемного канала измеряемого модуля, как и в п.6.2.1, составило $96 \text{ нс} \pm \text{ПИ}$ [163].

Достоинством структурной схемы стенда (рис. 87) является перестройка импульсной мощности, подаваемой на вход приемника, без изменения номиналов ослабления аттенюаторов и направленных ответвителей. Из недостатков можно выявить большое количество приборов, входящих в состав стенда [163].

Экспериментальные исследования проводились на десяти опытных образцах ППМ (рис. 83). Полученные значения времени восстановления коэффициента передачи ПРМ при воздействии на вход высокого уровня мощности приведены в таблице 6 [163].

Таблица 6. Полученные значения времени восстановления коэффициента передачи ПРМ при воздействии на вход высокого уровня мощности по разработанной методике

Наименование образца	Результат эксперимента, нс
ППМ1	$96 \pm \text{ПИ}$
ППМ2	$91 \pm \text{ПИ}$
ППМ3	$95 \pm \text{ПИ}$
ППМ4	$97 \pm \text{ПИ}$
ППМ5	$90 \pm \text{ПИ}$
ППМ6	$93 \pm \text{ПИ}$
ППМ7	$98 \pm \text{ПИ}$
ППМ8	$97 \pm \text{ПИ}$
ППМ9	$98 \pm \text{ПИ}$
ППМ10	$94 \pm \text{ПИ}$

Проведенные экспериментальные исследования по разработанной методике позволяют учесть временные задержки восстановления АФАР в режиме приема при пропадании высокого уровня мощности на входе приемного канала, а также провести дополнительные испытания, связанные с влиянием помехового сигнала на СВЧ-тракт при изменении входной мощности приемного канала при штатном режиме работы.

5.6.3. Сравнение результатов эксперимента

Сравнение времени восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия высокого уровня мощности измеренного с помощью двух разных схем измерительных стендов по разработанной методике показано на рисунке 89.



Рис. 89. Сравнение результатов измерений, полученных с помощью двух разных схем измерительных стендов по разработанной методике

Обе структурные схемы измерительных стендов показали одинаковые временные задержки - $96 \text{ нс} \pm \text{ПИ}$. При статистических измерениях на десяти опытных образцах временные задержки составили от 90 нс до 100 нс [163].

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что результаты измерений времени восстановления приемного канала, выполненные на двух разработанных измерительных стендах в соответствии с разработанной методикой, идентичны. Выбор используемой схемы при производстве ППМ производится на основании наличия необходимого оборудования для измерительного стенда [163].

Рассмотренная методика и экспериментальные результаты измерений времени восстановления коэффициента передачи приемного канала прямо-передающего модуля АФАР после воздействия на вход СВЧ-импульса высокой мощности, позволяют задать необходимые временные характеристики сигналов управления при разработке прямо-передающих устройств для обеспечения корректной работы РЛС в целом [163].

Разработанная методика позволила провести измерения электрического параметра «Время восстановления коэффициента передачи ПРМ при воздействии на

вход СВЧ импульса мощностью 8 Вт» в восьми опытно-конструкторских работах по результатам которых было выпущено более 6000 ППМ.

ГЛАВА 6

6.1. Структурная схема приемо-передающего модуля АФАР с узлами оперативного контроля электрических параметров

Структурная схема приемо-передающего модуля АФАР с узлами оперативного контроля электрических параметров, изображена на рисунке 90.

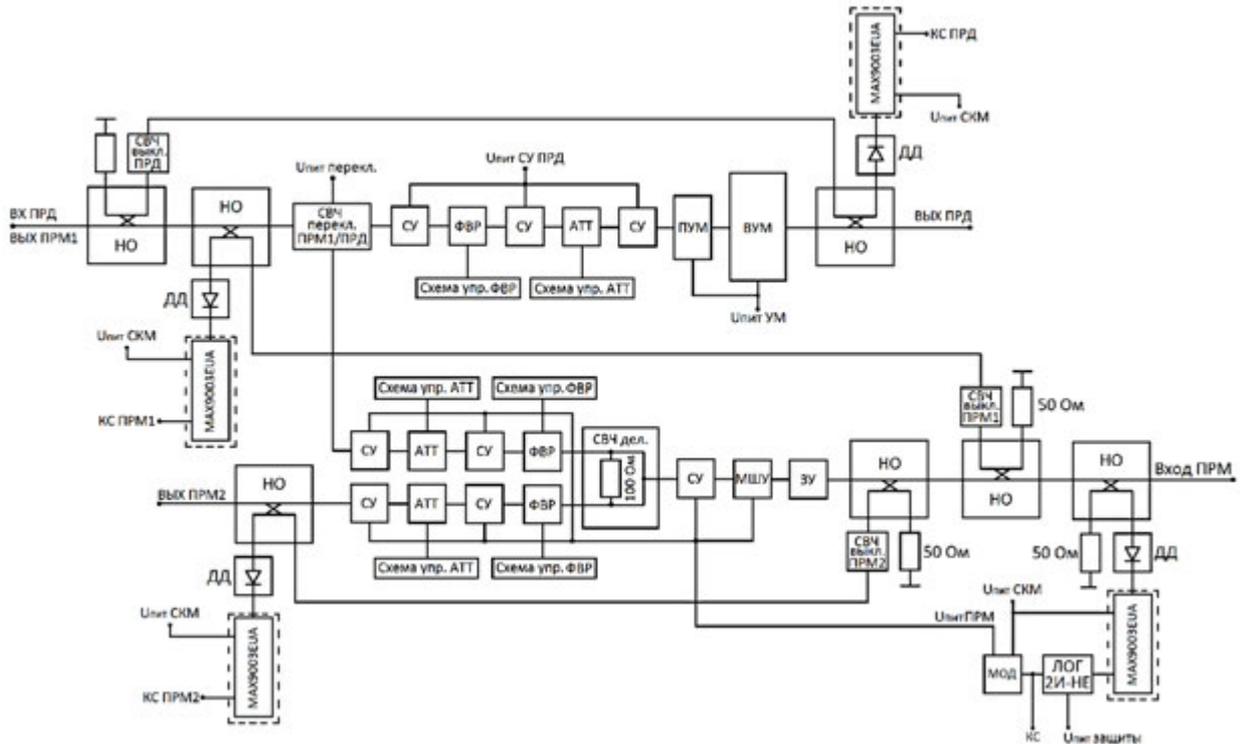


Рис. 90. Структурная схема приемо-передающего модуля АФАР с узлами оперативного контроля электрических параметров

Разработанная структурная схема ППМ при необходимой точности проектирования, расчетов, конструирования и правильно подобранной элементной компонентной базой, будет обеспечивать систему управления и контроля АФАР всей необходимой информацией о работоспособности и электрических параметрах каналов, а также защитой от всевозможных помех, возникающих от объектов в окружающем пространстве.

Для оценки правильности выбранных схемотехнических решений при разработке схемы с узлами оперативного контроля необходимо провести расчет времени проверки основных электрических параметров.

6.2. Оценка времени проверки передающего канала

В передающем канале встроена система контроля мощности, которая входит в состав узла контроля коэффициента усиления положительной обратной связью. Рассматриваемый узел выделен на рисунке 91.

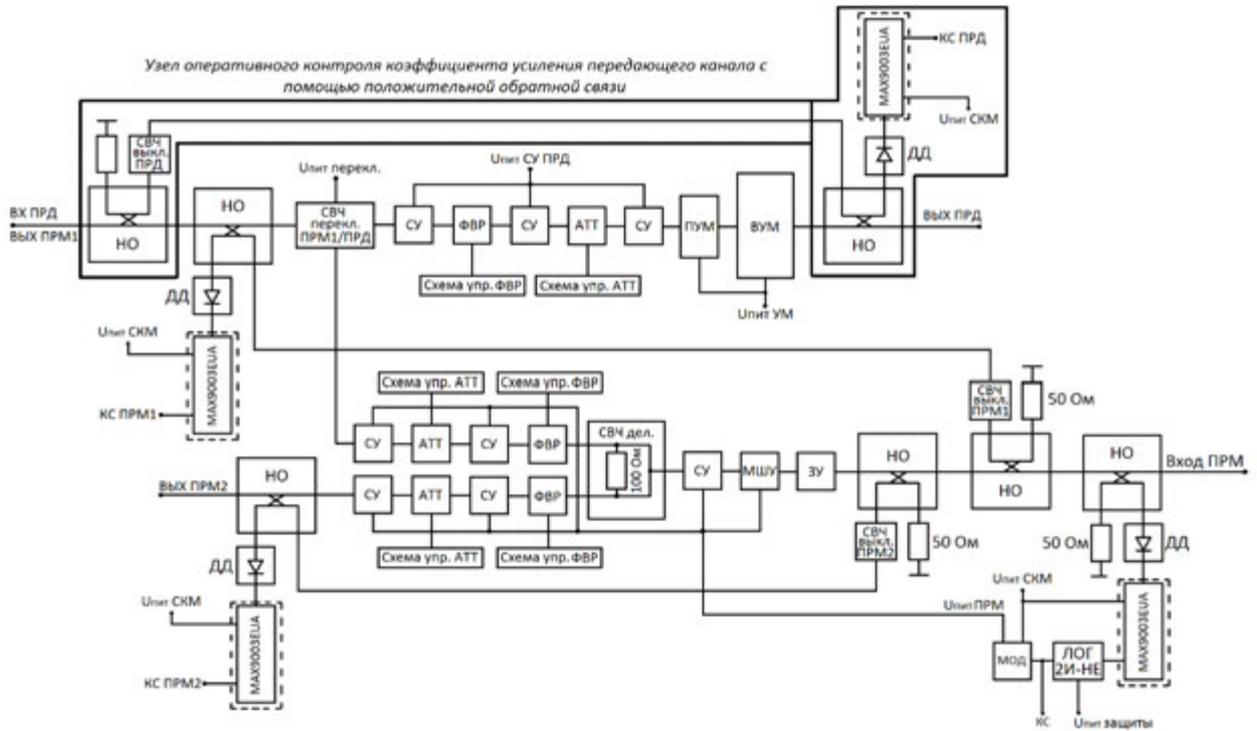


Рис. 91. Структурная схема приемо-передающего модуля с обозначенными узлами оперативного контроля электрических параметров передающего канала

В разработанной схеме, оперативный контроль основных электрических параметров может выполняться двумя способами.

6.2.1. Контроль электрических параметров передающего канала с помощью системы контроля мощности в составе приемо-передающего модуля

6.2.1.1. Методика измерения порога мощности в составе измерительного стенда при помощи системы контроля мощности

Наиболее типовым способом при измерениях на измерительном стенде является определение порогового значения выходной мощности передающего канала с помощью узла системы контроля мощности. Время определения минимального порога требуемой мощности в передающем канале составляет 250 нс на каждую точку рабочего диапазона частот (п.2.5.6.2). Подстройка входной мощности от минимально заданного значения составляет 50 нс.

Условный алгоритм получения КСИ в рабочем диапазоне частот при минимальном пороговом значении выходной мощности, приведен в таблице 7.

Таблица 7. Условный алгоритм получения КСИ

Рвх, дБм	Контрольный сигнал исправности, В				
	F1, ГГц	F2, ГГц	F3, ГГц	F4, ГГц	F5, ГГц
-10	0	0	0	0	0
-9	0	0	0	0	0
-8	0	0	0	0	0
-7	0	0	0	0	0
-6	0	0	0	5	0
-5	0	0	0	5	0
-4	0	0	0	5	0
-3	0	0	5	5	0
-2	5	0	5	5	0
-1	5	0	5	5	0
0	5	0	5	5	5
1	5	5	5	5	5
2	5	5	5	5	5
3	5	5	5	5	5
4	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5

При изменении входной мощности передающего тракта, мощность на выходе ВУМ увеличивается (линейный режим работы). При достижении входной мощности, при которой на выходе ВУМ появляется минимальный требуемый порог, на контрольном выходе СКМ возникает логическая единица (напряжение питания 5 вольт). КСИ означает, что передающий канал находится в штатном режиме работы с минимально требуемым значением выходной мощности. Если при изменении входной мощности от минимального к максимальному, КСИ не возникает, то узел СКМ или передающий канал являются неисправными.

Из таблицы 7 видно, что КСИ возникает на выбранных частотных точках при разной входной мощности. Происходит это из-за нелинейности АЧХ выходного усилителя в рабочем диапазоне частот. В данном примере максимальная входная мощность, подаваемая на вход передающего канала, составляет 5 дБм (3 мВт). При достижении порога минимальной мощности на выходе ВУМ при мощности на

входе меньше чем максимальная, требования по обеспечению контроля работоспособности передающего канала будут удовлетворяться. Проверка работы передающего канала, а также контроль порогового значения срабатывания СКМ выполняется на измерительном стенде, структурная схема которого показана на рисунке 92 [164].

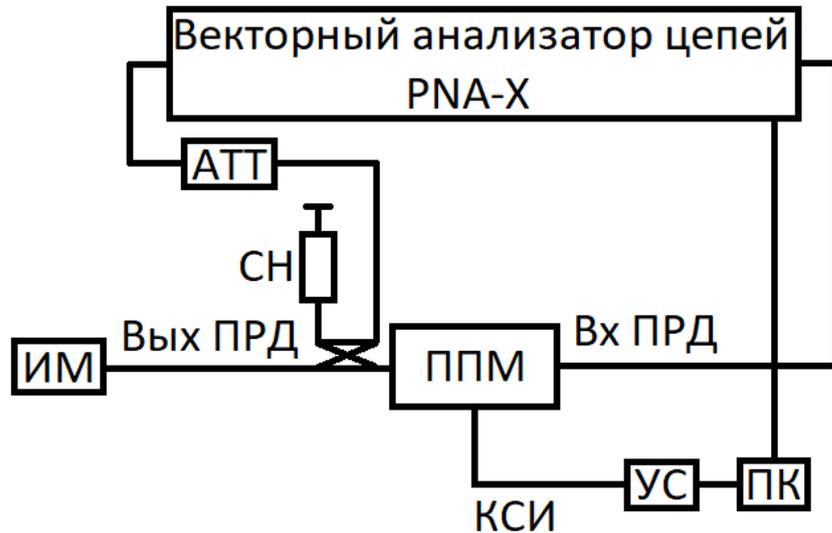


Рис. 92. Измерительный стенд для проверки электрических параметров передающего канала и системы контроля мощности

В состав структурной схемы измерительного стенда входят:

- векторный анализатор цепей PNA-X (диапазон частот выбирается в соответствии с требованиями к ППМ);
- приемо-передающий модуль с узлами оперативного контроля электрических параметров (ППМ);
- регулируемый аттенюатор (АТТ);
- согласованная нагрузка (СН);
- измеритель мощности (ИМ);
- устройство сопряжения и обработки полученных данных с ППМ (УС);
- персональный компьютер (ПК).

Разработанная схема стенда позволяет проанализировать и получить информацию о срабатывании СКМ при различных уровнях входной мощности в диапазоне рабочих частот и определить величину максимальной выходной мощности передающего канала при штатном режиме работы.

Время проверки и тестирования передающего канала будет зависеть от количества заданных значений входной мощности передающего канала и частотных точек.

Временные задержки, возникающие при тестировании, были измерены и внесены в таблицу 8.

Таблица 8 – Временные задержки при измерениях работы передающего канала и системы контроля выходной мощности

$\tau_{\text{Рвх 1 точка, НС}}$	$200 \pm \text{ПИ}$
$\tau_{\text{перекл. F, НС}}$	$300 \pm \text{ПИ}$
$\tau_{\text{СКМ, НС}}$	$250 \pm \text{ПИ}$

В соответствии с таблицей 8, можно провести расчет временных задержек для данного примера, по формуле:

$$\tau_{\text{общ.изм.стенд}} = (\tau_{\text{Рвх 1 точка}} \times 15) + (\tau_{\text{перекл. F}} \times 5) + (\tau_{\text{СКМ}} \times 5) \quad (15)$$

В данном примере максимальное время проверки передающего канала в составе измерительного стенда составляет 5,75 мкс. В реальных условиях полученного минимального времени проверки не удастся добиться, так как устройство сопряжения и персональный компьютер вносят задержки, связанные с обработкой полученных КСИ, что приводит к увеличению затрат времени до 1000 раз (\approx до 6 с).

6.2.1.2. Методика измерения порога мощности в составе активной фазированной антенной решетки при помощи системы контроля мощности

Принцип проверки основных электрических параметров с помощью системы контроля мощности в составе активной фазированной антенной решетки описан в главе 2, п. 2.3.

Затраты времени на проверку электрических параметров в составе АФАР также включают в себя время переключения рабочих частотных точек и время срабатывания системы контроля мощности на каждой выбранной частоте. Выполнять пошаговую проверку СКМ при изменении входной мощности в составе АФАР не имеет смысла, так как мощность на входе передающего канала в соответствии с ТЗ неизменна.

Поэтому при пяти рабочих точках (к примеру 8 ГГц, 9 ГГц, 10 ГГц, 11 ГГц, 12 ГГц) время проверки передающего канала будет рассчитываться по формуле:

$$\tau_{\text{общ АФАР}} = (\tau_{\text{перекл. F}} \times 5) + (\tau_{\text{СКМ}} \times 5) \quad (16)$$

Проверка передающего канала приемо-передающего модуля в составе АФАР, в данном примере, будет составлять 2,75 мкс. Как было сказано выше, в реальных условиях полученного времени проверки добиться не удастся. Устройство управления и вычислительные устройства АФАР производят обработку полученных КСИ со своими временными задержками. Поэтому общие затраты времени на проверку и получение КСИ должно быть определено с учетом дополнительных задержек, возникающих в АФАР.

6.2.2. Контроль электрических параметров передающего канала с помощью узла проверки коэффициента усиления положительной обратной связью в составе приемо-передающего модуля

6.2.2.1. Методика измерения электрических параметров передающего канала в составе измерительного стенда при помощи узла проверки коэффициента усиления положительной обратной связью

Подробное описание методики оперативного контроля электрических параметров положительной обратной связью представлено в главе 3, п. 3.1.

Для корректной работы узла оперативного контроля электрических параметров передающего канала положительной обратной связью необходимо провести предварительные измерения максимального значения коэффициента усиления в частотном диапазоне работы модуля. Это требуется для определения наиболее близкого значения коэффициента усиления в составе АФАР, что позволяет подтвердить работоспособность передающего канала. Измеренные экспериментальные значения должны быть прописаны в паспорте на изделие в строке «справочные данные». Это позволит снизить затраты времени на отладку оперативного контроля в составе АФАР.

Для определения максимального коэффициента усиления передающего канала необходимо провести подобные измерения, описанные в главе 6, п.6.2.1.

Сначала определяется граница перехода усилительного тракта передающего канала из линейного режима в режим насыщения. Для этого входную мощность, подаваемую на передающий канал, повышают от -15 дБм до 5 дБм, с шагом в 1 дБм. При этом контролируют значения выходной мощности с измерителя мощности, входящего в состав измерительного стенда. В момент, когда входная мощность повысилась на 1 дБ, а выходная мощность изменилась на значение менее 0,5 дБ, необходимо записать входную и выходную мощность в единицах [дБм]. После это требуется произвести вычисление коэффициента усиления передающего СВЧ-тракта по формуле:

$$K_{у\text{ ПРД}} [\text{дБ}] (f_n) = P_{\text{вых}} [\text{дБм}] (f_n) - P_{\text{вх}} [\text{дБм}] (f_n) \quad (17)$$

При помощи формулы (17) можно вычислить максимальное значение коэффициента усиления передающего тракта на заданной частоте.

Проведя измерения N-количества частотных точек внутри рабочего диапазона частот, определяют максимальное значение коэффициента усиления в одной определенной частотной точке. Данная точка является «эталоном». Эталон включает в себя максимальный коэффициент усиления на определенной частоте. На этой частоте в дальнейшем будет производится контроль коэффициента усиления передающего канала положительной обратной связью в составе АФАР.

6.2.2.2. Методика измерения коэффициента усиления с помощью положительной обратной связи по эталону

Методика измерения коэффициента усиления с помощью положительной обратной связи по эталону будет рассмотрена на примере экспериментальных исследований передающего канала приемо-передающего модуля, изображенного на рисунке 20.

При повышении мощности от -15 дБм до 5 дБм на частоте 10 ГГц (середины X-диапазона для наглядности), в момент подачи мощности 0 дБм на вход ПРД, выходная мощность составляет 40 дБм. При входной мощности ПРД равной 1 дБм, мощность на выходе составляет 40,5 дБм. Произведя расчет по формуле (17), получим величину коэффициента усиления передающего канала составляющую 40 дБ.

При измерениях на других частотных точках внутри рабочего диапазона частот коэффициент усиления составил менее 40 дБ. В соответствии с этим, эталоном является точка с частотой 10 ГГц. Так как в составе модуля суммарное ослабление аттенюаторов составляет 31,5 дБ, коэффициент передачи положительной обратной связи следует рассчитать на значение от 20 дБ до 30 дБ. Такое ответвление позволит работать с малым значением разрядов аттенюаторов, что предотвратит дополнительные наводки на линии передачи, связанные с уменьшением развязки между каналами внутри приемо-передающего модуля. При проектировании цепи положительной обратной связи с коэффициентов передачи -30 дБ и замыкании СВЧ-выключателя ПРД требуется ввести разряды 8 дБ и 2 дБ, чтобы проверить нижний порог коэффициента усиления. При вводе разрядов 8 дБ, 2 дБ и 0,5 дБ, самовозбуждение тракта исчезнет и КСИ с СКМ будет сигнализировать о том, что коэффициент усиления передающего канала составляет от 40 дБ до 40,5 дБ.

Измерение коэффициента усиления передающего канала на измерительном стенде при использовании программного обеспечения, позволяющего проводить подбор коэффициента усиления передающего канала, составит менее 3 мкс на каждую частотную точку рабочего диапазона. Измерения необходимо проводить с наибольшим количеством частотных точек для точного определения «эталона».

Предварительное определение «эталона» позволяет максимально снизить затраты времени на оперативный контроль в составе АФАР и повысить точность измерений выходной мощности передающего канала.

6.2.2.3. Методика измерения электрических параметров передающего канала в составе активной фазированной антенной решетки при помощи положительной обратной связи

После нахождения «эталона» в процессе проверки приемо-передающего модуля перед установкой в состав АФАР в паспорте на изделие указаны его частота и максимальный коэффициент усиления. Также могут быть заранее определены и дополнительные «эталоны» для проверки коэффициента усиления в определенном диапазоне частот.

После установки приемно-передающего модуля в подрешетку антенную в систему управления вносятся электрические параметры «эталонов». ППМ включают в штатный режим работы и с помощью специального программного обеспечения (в соответствии с п.3.1.3 главы 3) производят контроль коэффициента усиления передающего канала, но уже в более узком диапазоне разрядов аттенуаторов. Это позволяет снизить время проверки коэффициента усиления передающего канала до значения менее 2 мкс (без учета задержек, возникающих в устройстве обработки сигналов управления АФАР).

6.3. Оценка времени проверки приемного канала

В приемных каналах приемно-передающего модуля встроены системы контроля мощности, которые входят в узлы контроля коэффициента усиления положительной обратной связью. Узлы выделены на рисунке 93.

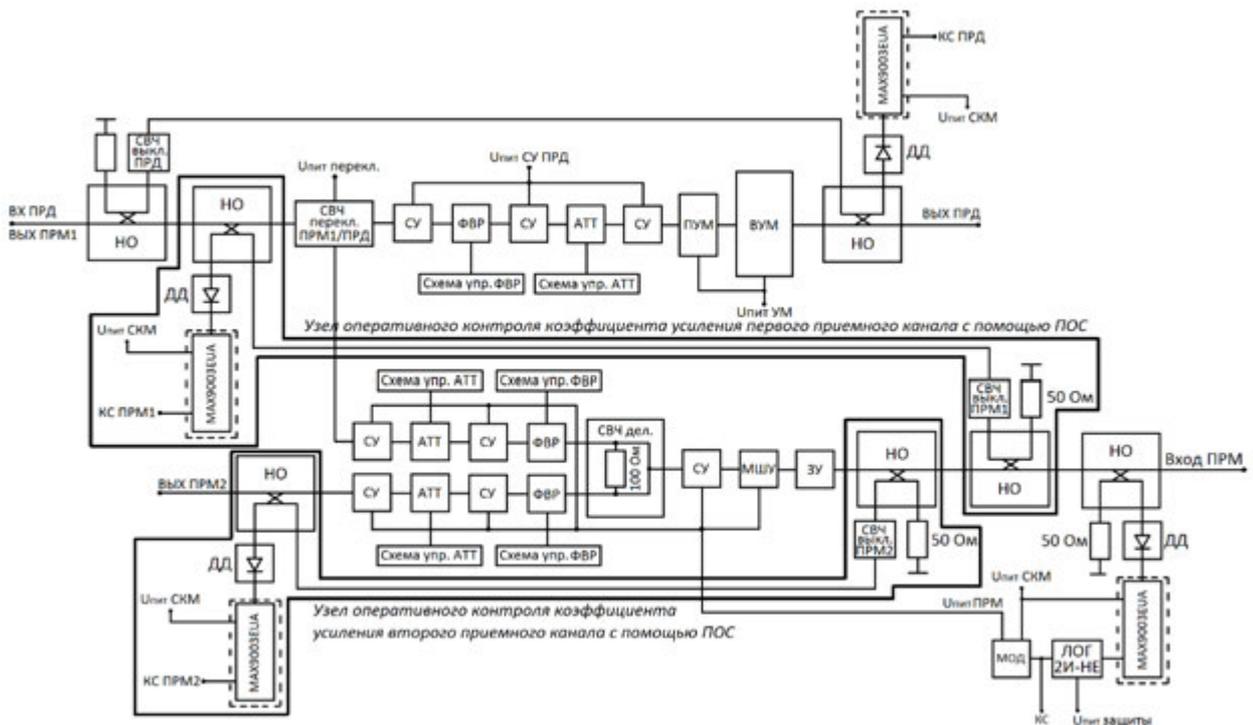


Рис. 93. Структурная схема приемно-передающего модуля с узлами оперативного контроля электрических параметров приемного канала положительной обратной СВЯЗЬЮ

На первом этапе оперативного контроля основные электрические параметры проверяются в составе измерительного стенда (при производстве приемно-передаю-

щего модуля). На втором этапе – в составе подрешетки антенной АФАР. Предварительная проверка на измерительном стенде в процессе производства приемо-передающего модуля позволяет добиться значительного снижения затрат времени на проведение проверки электрических параметров в составе АФАР.

6.3.1. Контроль электрических параметров приемного канала с помощью узла проверки коэффициента усиления положительной обратной связью в составе приемо-передающего модуля

6.3.1.1. Методика измерения электрических параметров приемного канала в составе измерительного стенда при помощи узла проверки коэффициента усиления положительной обратной связи

Подробное описание методики контроля коэффициента усиления на измерительном стенде в процессе изготовления приемо-передающего модуля было представлено в главе 3, п.3.2.1.

В процессе измерений коэффициента усиления приемного канала с помощью положительной обратной связи контролируются и вычисляются «эталон» (подробно в п.6.2.2.1). По характеристикам «эталона» производится контроль коэффициента усиления с точностью до младшего разряда аттенюатора в СВЧ-тракте.

При штатной работе приемный канал находится в линейном режиме, поэтому вычисление «эталона» занимает меньше времени, чем в передающем канале.

При проверке канала не следует повышать входную мощность выше типового значения равного -30 дБм (1 мкВт).

Для быстрого вычисления максимального коэффициента усиления внутри рабочего диапазона частот следует использовать векторный анализатор цепей и специальное программное обеспечение, позволяющее проводить все операции контроля в автоматическом режиме.

После вычисления электрических параметров «эталона», данные записываются в паспорт на приемо-передающий модуль, что в дальнейшем позволяет снизить затраты времени на проведение проверки коэффициента усиления с помощью положительной обратной связи в составе АФАР.

6.3.1.2. Методика измерения электрических параметров приемного канала в составе активной фазированной антенной решетки при помощи узла проверки коэффициента усиления положительной обратной связи

После установки ППМ в состав АФАР необходимо перенести электрические параметры «эталона» из паспорта ППМ в специальное программное обеспечение с базой данных для проведения контроля коэффициента усиления в автоматическом режиме. Также могут быть заранее определены и дополнительные эталонные точки для проверки коэффициента усиления в другом диапазоне частот. После этого ППМ включают в штатный режим работы и с помощью специального программного обеспечения (в соответствии с п.3.1.3 главы 3) производят проверку коэффициента усиления приемного канала в более узком диапазоне разрядов аттенюаторов. Это позволяет снизить время проверки коэффициента усиления приемного канала до значения менее 2 мкс (без учета задержек, возникающих в устройстве обработки сигналов управления АФАР).

6.3.2. Контроль электрических параметров приемного канала с помощью узла проверки коэффициента усиления используя собственный входной сигнал передатчика

С помощью рассматриваемого узла оперативного контроля, установленного в составе приемо-передающего модуля, можно провести измерение коэффициента усиления приемного канала за время менее 80 нс (без учета задержек обработки полученных данных на устройстве управления АФАР). Точность получения значений коэффициента усиления определяется большим количеством статистических измерений и вводом алгоритма корректировки в получаемые характеристики АЧХ.

6.3.1.1. Методика измерения электрических параметров приемного канала с помощью узла проверки коэффициента усиления используя собственный входной сигнал передатчика в составе измерительного стенда

Методика проверки коэффициента усиления приемного канала с помощью собственного входного сигнала передатчика описана в главе 4, п. 4.1.2.

Перед установкой в подрешетку антенную АФАР партии приемо-передающих модулей, выполненных по единой технологии, необходимо провести статистические измерения коэффициентов усиления в составе аттестованного измерительного стенда. После проведения таких измерений значения коэффициентов усиления для каждого приемо-передающего модуля должны быть сопоставлены со значениями коэффициентов усиления, полученных с помощью узла оперативного контроля. На основе статистического анализа вычисляется расхождение истинных коэффициентов усиления и полученных при помощи встроенного узла. Расхождение (поправочный коэффициент) вводится в устройство калибровки и управления, что позволяет при проверке каналов АФАР реализовать наиболее близкие значения коэффициентов усиления.

6.3.1.2. Методика измерения электрических параметров приемного канала с помощью узла проверки коэффициента усиления используя собственный входной сигнал передатчика в составе активной фазированной антенной решетки

В рассматриваемой схеме (рис. 90) контроль коэффициента усиления при помощи собственного входного сигнала передатчика проводится по второму приемному каналу, так как первый приемный канал имеет общий вход/выход с передающим каналом.

Приемо-передающий модуль устанавливается в подрешетку антенную АФАР. Вводится поправочный коэффициент из паспорта ППМ в устройство калибровки и управления. С помощью специального программного обеспечения измеряется коэффициент усиления при помощи узла оперативного контроля в составе АФАР. Поправочный коэффициент суммируется с полученной характеристикой. Точность измерения коэффициента усиления при помощи разработанного узла оперативного контроля составляет $\pm 0,2$ дБ \pm ПИ.

6.4. Оценка работы защиты приемника

Использование узла защиты приемника обработки сигналов АФАР, как было описано ранее, позволяет отключить питание активных элементов приемного канала и произвести уточнение временных диаграмм работы приемо-передающего

модуля в составе АФАР (для корректной работы в импульсном режиме прием-передача).

Перед использованием алгоритмов корректировки в составе АФАР, необходимо провести статистические измерения узла защиты приемника обработки сигналов и получить значения задержек реагирования и восстановления штатного режима работы приемного канала. Это необходимо для исключения наложения включения передающего и приемного каналов, что может привести к нестабильной работе ППМ в составе АФАР. Поэтому после проведения большого количества статистических измерений к наихудшему значению реагирования и восстановления необходимо добавить дополнительные 5-10%.

6.4.1. Методика измерения основных характеристик узла защиты приемника обработки сигналов АФАР в составе измерительного стенда

Принцип работы узла защиты приемника обработки сигналов описан в главе 5, п.5.3.1. Для измерения задержек реагирования и восстановления в составе измерительного стенда требуется специальное программное обеспечение, а также ряд типовых приборов, позволяющих произвести замер длительностей импульсных сигналов.

При измерении реагирования узла защиты приемника обработки сигналов АФАР контролируется сигнал высокой мощности и спад уровня напряжения на выходе модулятора питания приемного канала ППМ. Производится вычисление разницы между установлением сигнала высокой мощности и спадом уровня питания с выхода модулятора. Полученные данные записываются в паспорт на приемопередающий модуль.

При измерении восстановления узла защиты приемника обработки сигналов АФАР контролируется спад сигнала высокой мощности и установление уровня напряжения на выходе модулятора питания приемного канала ППМ. Производится вычисление разницы между спадом сигнала высокой мощности и установлением напряжения питания с выхода модулятора. Полученные данные также записываются в паспорт на приемопередающий модуль.

Для адаптивного изменения временных диаграмм в режиме реального времени измеряются задержки реагирования и восстановления уровня контрольного сигнала после микросхемы «2И-НЕ», а также время восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия на вход импульса высокой мощности (п.5.6). Данные записываются в паспорта для приемо-передающих модулей.

6.4.2. Применение электрических параметров, полученных с помощью узла защиты приемника обработки сигналов в составе АФАР

Для адаптивного изменения временных диаграмм работы ППМ в составе АФАР требуются электрические параметры, измеренные в п.6.4.1.

На рисунке 94 представлена временная диаграмма работы приемного канала АФАР в режиме помехи на входе. Для наглядности, задержки реагирования и восстановления узла защиты приемника обработки сигналов АФАР приняты за 0.

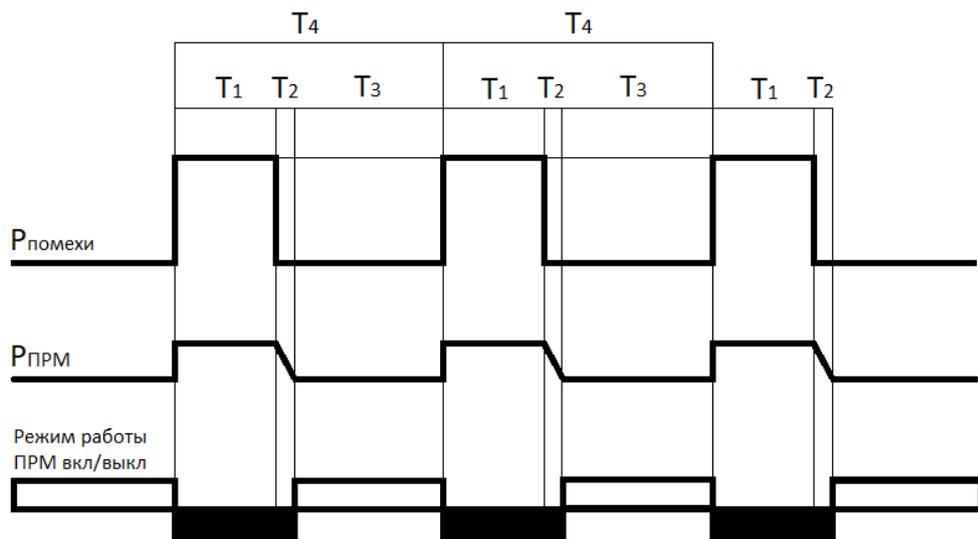


Рис. 94. Временная диаграмма работы приемного канала АФАР в режиме помехи на входе

Длительность и скважность проходящего сигнала неизвестны. Так как задержки реагирования и восстановления узла защиты приемника обработки сигналов приняты за 0, при возникновении сигнала высокого уровня мощности на входе приемного канала, питание активных элементов отключается (без задержки) и приемник находится в нерабочем состоянии (интервал T_1+T_2). Интервалом T_2 является время восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия импульса высокой мощности на входе (п.5.6). После пропадания импульса

помехового сигнала приемник возвращается (без задержки) в штатный режим работы (интервал T_3). На контрольном выходе узла защиты приемника обработки сигналов АФАР (КС после микросхемы «2И-НЕ») возникает временная характеристика импульсов работы приемного канала, на которой изображены длительности T_1 , T_2 и T_3 . В соответствии с измеренным значением времени восстановления коэффициента передачи (методика измерения представлен в п.5.5) появляется возможность вычислить скважность и длительность импульса помехового сигнала по формуле:

$$T_1 = T_4 - (T_2 + T_3) \quad (18)$$

Определив длительность импульса помехового сигнала T_1 и скважность T_4 , изменение производится в соответствии с п.5.5.

В реальном узле защиты приемника обработки сигналов АФАР, задержка реагирования и восстановления никогда не будет являться нулевой. Поэтому в алгоритм определения длительности и скважности сигналов необходимо добавить задержку реагирования равную 285 нс и восстановления 300 нс. Данные величины должны быть измерены и учтены для каждого приемного канала АФАР. Минимальные неточности в сигналах управления могут привести к сбоям работы системы и дальнейшему выходу из строя приемного или передающего канала. В лучшем случае задержки реагирования и восстановления штатного режима работы приемного канала должны быть равными и стремиться к нулю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы были получены следующие основные результаты:

1. Разработано и внедрено в производство ППМ оригинальное контактное устройство оперативного контроля, позволяющее с потерями не более $0,6 \pm \text{ПИ}$ [дБ] проводить измерения электрических параметров модулей АФАР и прижимных СВЧ-соединителей при максимальной мощности до 36 Вт.

2. Предложена и успешно апробирована в составе измерительной установки методика оперативного контроля коэффициента усиления каналов ППМ с помощью положительной обратной связи, позволившая проводить измерения электрических параметров ППМ за время менее 4 мкс, снижая тем самым трудоемкость при больших объемах производства.

3. Предложена и успешно апробирована в составе многофункционального ППМ методика, основанная на ответвлении части мощности передатчика в приемник, позволившая проводить измерение коэффициента усиления приемного канала с точностью $\pm 0,2 \pm \text{ПИ}$ [дБ] за время менее 80 нс.

4. Предложена и успешно апробирована в составе измерительной установки методика адаптивного изменения временных диаграмм, позволившая за время менее 260 нс проводить корректировку сигналов управления с целью восстановления штатного функционирования.

5. Предложена схема ППМ с узлами оперативного контроля, позволяющая с помощью разработанных методик и алгоритмов применения комбинаций КС, автоматически изменять режимы работы ППМ в зависимости от поставленных задач в боевом режиме.

6. Разработанные схемотехнические решения по результатам проведенных исследований могут быть использованы в составе АФАР X-диапазона частот, для выполнения с высоким быстродействием калибровки ЭП каналов, отключения отказавших или неисправных каналов для их исключения при формировании ДН, а также обеспечения помехозащищенности каналов от внешних помеховых сигналов за счет введения адаптивного изменения временных диаграмм.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АФАР - активная фазированная антенная решетка

ППМ - приемо-передающий модуль

РЛС - радиолокационная станция

СВЧ - сверхвысокочастотный

ПРМ - приемный канал

ПРД - передающий канал

АЦП - аналого-цифровой преобразователь

КПД - коэффициент полезного действия

ОКР - опытно-конструкторская работа

НО - направленный ответвитель

ДД - детекторный диод

УПТ - усилитель постоянного тока

КОМ - компаратор

КУ - коэффициент усиления

СКМ - система контроля мощности

ВУМ - выходной усилитель мощности

ПОС - положительная обратная связь

КС - контрольный сигнал

КСИ - контрольный сигнал исправности

ФАР - фазированная антенная решетка

ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь

ЗУ - защитное устройство

МШУ - малошумящий усилитель

СУ - согласующий усилитель

ФВР - фазовращатель

АТТ - аттенюатор

ПУМ - предварительный усилитель мощности

ДН - диаграмма направленности

K_y - коэффициент усиления

- $P_{\text{вх}}$ - входная мощность
- $P_{\text{вых}}$ - выходная мощность
- $K_{\text{ш}}$ - коэффициент шума
- АД - амплитудный детектор
- ВВХ - вольт-ваттная характеристика
- СН - согласованная нагрузка
- КД - конструкторская документация
- ТД - технологическая документация
- МИС СВЧ - монолитно-интегральная схема сверхвысокой частоты
- ВВФ - внешние воздействующие факторы
- ЛТСС - Low Temperature Cofired Ceramic (низкотемпературная совместно обжигаемая керамика)
- НЧ - низкочастотный
- ЛП - линия передачи
- УПР - управление
- ПК - персональный компьютер
- КЗ - короткое замыкание
- ООС - отрицательная обратная связь
- ОС - обратная связь
- НО ПРД - направленный ответвитель передающего канала
- НО ПРМ - направленный ответвитель приемного канала
- ПО - программное обеспечение
- МОД - модулятор
- КТР - коэффициент термического расширения
- МФ МИС - многофункциональная монолитно-интегральная схема
- ВЧ - высокочастотный
- ПКСМ - поверхностное контактное соединение модуля
- ИМ - измеритель мощности
- ГС - генератор сигналов
- ПИ - погрешность измерений

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Я.Д. Ширман Теоретические основы радиолокации // ЁЁ Медиа. - 2012. – 560 с.
2. Воскресенский Д.И. Активные фазированные антенные решетки / Д.И. Воскресенский, А.И. Канащенкова // Радиотехника. - 2004. – 488 с.
3. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки 2-е издание / При поддержке «НИИП им. В.В. Тихомирова пер. с англ. под ред. А.И. Синани. – М.: Техносфера. - 2012. – 560 с.
4. Скобелев С.П. Фазированные антенные решетки с секторными парциальными диаграммами направленности. – М.: Физматлит. - 2010. – 320 с.
5. Гостюхин В.Л. Активные фазированные антенные решетки / В.Л. Гостюхин, В.Н. Трусов, А.В. Гостюхин // Радиотехника. - 2011. - 304 с.
6. Подрешетка антенная / Меньшиков А.А. // Патент РФ на изобретение №138546.
7. Карасев М.С. Многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР нового поколения / М.С. Карасев, А.Г. Далингер, С.В. Шацкий, В.А. Жерновенков, Е.А. Синькова, С.А. Щеголев // Сборник трудов VII Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». - 2018. - С. 239-242.
8. Приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки СВЧ-диапазона / Далингер А.Г., Шацкий С.В., Иовдальский В.А., Карасев М.С. // Патент РФ на изобретение №2713079.
9. Карасев М.С. Перспективный многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР X-диапазона и методика измерения его параметров / М.С. Карасев, А.Г. Далингер, С.В. Шацкий // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» г. Санкт-Петербург. - 2017. - С. 355-359.
10. Алькевич Ю.С. Система функционального контроля субмодуля аттенюатор-фазовращатель приемо-передающего модуля X-диапазона / Ю.С. Алькевич, Р.А. Богданов, О.С. Мальцев, Н.М. Наумович, А.А. Павлючик, В.Т. Ревин, В.А. // «Метрология и приборостроение». - 2016. - N 4 (75). - С.6-10.

11. Елесин В.В. Оптимизация параметров СВЧ переключателей для монолитных фазовращателей и аттенюаторов / В.В. Елесин, Г.Н. Назарова // «Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы». - 2010. - N 1 (224). - С.7-11.
12. Васильев Я.О. Усилители мощности для АФАР X-диапазона в ГИС-исполнении / Я.О. Васильев, Л.В. Манченко, В.А. Пчелин, В.Б. Трегубов // «Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника». - 2007. - N 4 (492). - С.13-16.
13. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых устройств / ДМК Пресс. - 2018. - 636 с.
14. Пчелин В.А. Создание мощных СВЧ усилителей на полевых транзисторах на разработанных экспериментально – расчетных методик: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.27.01 / Пчелин Виктор Андреевич. - Фрязино, 2007. - 24 с.
15. Королев А.Н. Мощные корпусированные внутрисогласованные транзисторы S-, C-, X- и Ku диапазонов длин волн / А.Н. Королев, А.В. Климова, В.А. Красник, Л.В. Ляпин, В.М. Малыщик, Л.В. Манченко, В.А. Пчелин, В.Н. Рыбкин, В.Б. Трегубов // «Радиотехника». - 2007. - N 3. - С.53-56.
16. Малахов Р.Ю. Антенные решетки современных радиоэлектронных систем / Р.Ю. Малахов. - М.: Доброе слово. - 2015. - 208 с.
17. Лопатенко Э.В. Формирование диаграммы направленности АФАР с двумя независимо управляемыми лучами и низким уровнем боковых лепестков / Э.В. Лопатенко, А.А. Марусич // «Вопросы радиоэлектроники» том 1. - 2005. - N 1. - С.144-158.
18. Гостюхин В.Л. Средняя диаграмма направленности активных фазированных антенных решеток по мощности при случайных отказах активных модулей / В.Л. Гостюхин, В.Н. Трусов, А.В. Гостюхин // «Антенны». - 2006. - N 9(112). - С.24-26.
19. Сергеев В.А. Диагностика качества субмодулей выходных усилителей мощности приемно-передающих модулей АФАР по локальным перегревам / В.А. Сергеев, А.А. Куликов, Р.Г. Тарасов, М.М. Лагун // «Радиоэлектронная техника». - 2016. - N 1(9). - С.189-191.

20. Коломейцев В.А. Тепловой режим выходного усилителя мощности приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки / В.А. Коломейцев, А.В. Езопов, А.Э. Семенов // «Антенны». - 2012. - N 8(183). - С.15-19.

21. Коломейцев В.А. Разработка метода контроля температуры выходного усилителя мощности приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки / В.А. Коломейцев, А.В. Езопов // «Вестник Саратовского Государственного Технического Университета» том 1. - 2011. - N 1(52). - С.150-154.

22. Тарасов Р.Г. Измерительный комплекс для контроля характеристик submodule выходных усилителей мощности приемопередающих модулей АФАР X-диапазона / Р.Г. Тарасов, В.А. Сергеев // «Радиотехника». - 2018. - N 6. - С.98-102.

23. Кушим О.П. Модель возникновения собственных шумов во входных устройствах приемных систем / О.П. Кушим, Р.І. Безносюк, Д.С. Громовой, А.С. Мельничук // «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». - 2014. - N 2(47). - С.145-147.

24. Феимов А.А. Устройство регулирования мощности шума приемного тракта РЛС, основанное на принципе адаптивной фильтрации / А.А. Феимов, А.Б. Климин // «Антенны». - 2013. - N 1(188). - С.87-89.

25. Лемешков Н. Измерение коэффициента шума с использованием генераторов шума с постоянным запоминающим устройством и автоматическим управлением / Н. Лемешков, К. Румянцев // «Компоненты и технологии». - 2020. - N 3(224). - С.127-136.

26. Исаков И.И. Коэффициент шума приемного устройства и методы его измерения / И.И. Исаков, А.О. Евдокимов // Материалы конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». - 2019. - С.186-188.

27. Усилительные каскады переменного и постоянного тока на биполярных транзисторах [Электронный ресурс] // Конспект лекций «Института Космических и Информационных технологий». - 2014. - Л. 6. - Режим доступа: http://ikit.edu.sfu-kras.ru/files/2/L_6.pdf

28. Авласенок А.В. Совместные плотности вероятности огибающих и фаз смеси сигнала и шума в приемном тракте обзорной моноимпульсной РЛС / А.В. Авласенок, С.А. Вашкевич, С.Н. Деркач // «Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника» том 48. - 2005. - N 5. - С.67-72.

29. Васильченко О.В. Анализ методов снижения корреляционных шумов в приемном тракте радиолокационной станции / О.В. Васильченко, А.В. Абраменков // Материалы конференции «Энергетика, информатика, инновации». - 2018. - С.242-251.

30. Белоус А.И. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. / А.И. Белоус, М.К. Мерданов, С.В. Шведов // Техническая энциклопедия. - М.: Техносфера. - 2016. - 1415с.

31. Гармаш С.А. Современные твердотельные СВЧ-модули, новые разработки компании «Микроволновые системы» / С.А. Гармаш, А.В. Кищинский, Е.С. Маркинов и др. // «Наука, технология, бизнес». - 2014. - N 6. - С.82-89.

32. Andrey S. Zagorodny Modeling and application of microwave detector diodes / Andrey S. Zagorodny, Aleksey V. Drozdov, Nikolay N. Voronin и др. // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2013 14th International Conference of Young Specialists on. - 2013.

33. Linli Xie A W-band detector with high tangential signal sensitivity and voltage sensitivity / Linli Xie, Yonghong Zhang, Yong Fan, Conghai Xu, Yuanbo Jiao // Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2010 International Conference on. - 2010.

34. Бутков В.П. Сверхширокополосный детектор / В.П. Бутков, А.Н. Зикий, П.Н. Зламан // Electrical and data processing facilities and systems. - 2014. - N 2. - v.10. - С.111-116.

35. Воробьев С.В. Выбор элементной базы для систем вторичного электропитания приемно-передающих модулей АФАР / С.В. Воробьев // «Компоненты». - 2014. - N 10. - С.36-40.

36. Бардин В.М. Устройства приема и обработки сигналов. Детектирование радиосигналов / В.М. Бардин, А.В. Брагин // Мордовский университет. Методические указания. - 2012. - 20 с.

37. Зверев Е.Г. Повышение линейности прецизионного амплитудного детектора / Е.Г. Зверев, Е.В. Васильев // «Информационные технологии». - 2019. - С.90-95.

38. Ильин А.Г. Огибающая узкополосных шумов на выходе амплитудного детектора / А.Г. Ильин, Г.И. Ильин, В.С. Юнусова // Материалы конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». - 2018. - С.38-39.

39. Константинова Я.Б. Сравнительные характеристики амплитудных детекторов на диодах, транзисторах и интегральных микросхемах / Я.Б. Константинова, Б.А. Богосов // «Актуальные вопросы технических наук: теоретические и практические аспекты». - 2017. - С.57-69.

39. Загородний А. Детекторы мощности сигналов СВЧ компании «Микран» / А. Загородний, А. Черепанов // СВЧ-электроника. - 2016. - N 1. - С.28-32.

40. Карасев М.С., Далингер А. Г., Шацкий С.В., Жерновенков В.А. Перспективный многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР X-диапазона / М.С. Карасев, А.Г. Далингер, С.В. Шацкий, В.А. Жерновенков // Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника». - 2017. - N 1(532). - С.45-48.

41. Кравченко А.И. Сверхширокополосная согласованная нагрузка / А.И. Кравченко, Г.Г. Гошин // Материалы конференции «Электронные средства и системы управления. Материалы докладов международной научно-практической конференции». - 2017. - С.127-129.

42. Усанов Д.А. Согласованные нагрузки СВЧ-диапазона на основе нанометровых металлических пленок и диэлектрических слоев с воздушным включением / Д.А. Усанов, В.П. Мещанов, А.В. Скрипаль, Н.Ф. Попова, Д.В. Пономарев // Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крымико'15)». - 2015. - С.515-516.

43. Останков А.В. Микрополосковые направленные ответвители УВЧ и СВЧ диапазонов / А.В. Останков, Н.Н. Щетинин // «Радиостроение». - 2017. - N 5. - С.1-37.
44. Мунина И.В. Разработка и исследование направленных ответвителей СВЧ с расширенными функциональными возможностями, выполненных с применением многослойной технологий: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.12.07 / Мунина Ирина Владимировна. - Санкт-Петербург, 2015. - 22 с.
45. Коротаев В.М. Исследование направленных ответвителей СВЧ в условиях экстремального изменения параметров нагрузок, возникающих в результате отказов активных элементов и разрывов цепей / В.М. Коротаев, В.И. Туев // Материалы конференции «Актуальные проблемы радиофизики». - 2019. - С.182-184.
46. Карасев М.С. Многофункциональный приемо-передающий модуль X-диапазона частот / М.С. Карасев, А.Г. Далингер, С.В. Шацкий, С.А. Щеголев, А.В. Адиатулин // Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника». - 2019. - N 3(542). - С.51-54.
47. Ефимов А.Г. Выбор элементной базы для приемо-передающего модуля АФАР X-диапазона / А.Г. Ефимов, В.П. Тимошенко, А.И. Хлыбов, Д.В. Родионов // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». - 2018. - С.253-257.
48. Далингер А.Г. Конструкция приемо-передающего модуля АФАР СВЧ-диапазона / А.Г. Далингер, В.А. Иовдальский, С.В. Шацкий, В.И. Новоселец // Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника». - 2016. - N 1(528). - С.95-104.
49. Карасев М.С. Перспективный многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР X-диапазона и методика измерения его параметров / М.С. Карасев, А.Г. Далингер, С.В. Шацкий // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». - 2017. - С.355-360.
50. Груздов В.В. Сложные функциональные блоки СВЧ РЭА / В.В. Груздов // Технологии. Прикладные проблемы информационных технологий. - 2016. - N 3. - С.46-53.

51. Лавренко Ю.Е. Устройства СВЧ / Ю.Е. Лавренко, С.В. Грачев. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2014. - 92 с.
52. Петров И.А. Многоканальные переключатели СВЧ диапазона на повышенные уровни переключаемой мощности / И.А. Петров // Труды МАИ. - 2015. - N 83. - С.21., УДК 621.372.832
53. Усанов Д.А. Микрополосковый P-I-N-диодный СВЧ-выключатель / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, М.Ю. Куликов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. - 2011. - N 4. - С.51-54.
54. Соловьев Ю.Л. Методы и средства контроля СВЧ-параметров диодов / Ю.Л. Соловьев, А.В. Филиппов // Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крымико'19)». - 2019. - С.148.
55. Карушкин Н.Ф. Полупроводниковые компоненты и устройства электронной техники в коротковолновой части СВЧ-диапазона / Н.Ф. Карушкин, И.А. Обухов, Е.А. Смирнова // Нано- и микросистемная техника, том 21. - 2019. - N 3. - С. 165-177.
56. Тюфякин Д.А. Сверхширокополосные детекторы проходящей мощности / Д.А. Тюфякин, А.С. Загородний, В.Г. Нечаев // Материалы конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». - 2018. - С.306-310.
57. Кочевасов В. Твердотельные СВЧ-переключатели / В. Кочевасов, А. Кирпиченков // Электроника, наука, технология, бизнес. - 2017. - N 10(171). - С.92-97.
58. Алыбин В.Г. Компактный СВЧ делитель мощности с развязкой между входами / В.Г. Алыбин, С.А. Зарапин, С.А. Яхутин, С.В. Авраменко // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. Том 5. - 2018. - N 2. - С.34-39.
59. Воробьевский Е.М. Проектирование многоканальных СВЧ-делителей мощности на основе схем-прототипов / Е.М. Воробьевский // Радиотехника. - 2019. - N 10(16). - С.55-59.
60. Андриюшина В.Ю. Построение согласованных делителей мощности сверхвысокочастотных сигналов / В.Ю. Андриюшина, В.М. Темнов // Радиотехника. - 2017. - N 1. - С.170-176.

61. Кумачева С.А. Новый класс технической керамики - LTCC и особенности его получения / С.А. Кумачева, П.М. Плетнев, Ю.К. Непочатов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. - 2016. - N 1(36). - С.16-20.
62. Плетнев П.М. Низкотемпературно обжигаемая керамика для технологии LTCC (аналитический обзор) / П.М. Плетнев, С.А. Кумачева // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. - 2016. - N 2(37). - С.28-35.
63. Петренко А.И. LTCC-модуль / А.И. Петренко, В.А. Аржанов // Наука, образование, бизнес. - 2015. - С.273-276.
64. Мичурина А.А. Усилители постоянного тока с преобразованием сигнала / А.А. Мичурина // Достижения науки и образования. - 2016. - N 12(13). - С.21-23.
65. Ткачук В.В. Динамический КМОП-компаратор / В.В. Ткачук, Д.В. Морозов // Материалы конференции «Неделя науки СПбПУ». - 2019. - С.52-54.
66. Дворников О.В. Интегральная микросхема универсального компаратора / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Н.Н. Прокопенко // Приборы и техника эксперимента. - 2015. - N 4. - С.43-47.
67. Пищенко М.Г. Разработка компактных направленных ответвителей диапазона 4-12 ГГц / М.Г. Пищенко, Д.Г. Пищенко, М.Б. Мануилов // Материалы конференции «26-я международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крымико'16)». - 2016. - С.1285-1290.
68. Асмолов Г.И. Усилительные схемы в системах транспортной телематики. Учебное пособие / Г.И. Асмолов, В.М. Рожков, О.П. Лобов. - М.: Московский автомобильно-дорожный Государственный Технический Университет, 2015. - 87 с.
69. Спиридонов Е.Г. Автоматизация измерений коэффициента усиления операционного усилителя / Е.Г. Спиридонов, Д.С. Кутищев, М.П. Коцарь, Д.С. Спиридонов, М.А. Веников // Материалы конференции «Актуальные проблемы науки и образования на современном этапе». - 2017. - С.139-143.
70. Доценко В.В. Исследования, методы проектирования, разработка технологий электронной компонентной базы, радиолокационной и измерительной аппара-

туры СВЧ на пути перехода к цифровому производству / В.В. Доценко, Н.Д. Малушин // Материалы конференции «Электронные средства и системы управления». - 2017. - N 1-2. - С.221-229.

71. Гежа Д.С. Электродинамическое моделирование приемных зондов СВЧ-распределительной системы оптического типа многолучевой АФАР / Д.С. Гежа, А.С. Годин, К.Н. Климов // Антенны. - 2015. - N 3(214). - С.48-53.

72. Карасев М.С. Конструктивные особенности ППМ «Аббат-И» с применением поверхностного контактного соединителя для передачи СВЧ энергии и НЧ сигналов управления и электропитания / М.С. Карасев, В.А. Жерновенков // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. - 2016. - N 3(530). - С.71-80.

73. Карасев М.С. Методика измерений параметров перспективных ППМ АФАР с применением поверхностного контактного соединителя / М.С. Карасев // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. - 2016. - N 4(531). - С.37-44.

74. Карасев М.С. Многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР нового поколения / М.С. Карасев, А.Г. Далингер, С.В. Шацкий, В.А. Жерновенков, Е.А. Синькова, С.А. Щеголев // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – 2018. - С.239-242.

75. Бабич О.Ю. Учет влияния активных преднамеренных помех при моделировании радиолокационной станции с активной фазированной антенной решеткой / О.Ю. Бабич // Материалы конференции «XLV студенческая международная научно-практическая конференция». - 2018. - С.418-422.

76. Дмитриев Л.С. Применение современных транзисторов СВЧ в широкополосных активных модулях активных фазированных антенных решеток / Л.С. Дмитриев, Т.О. Мысливцев, Д.В. Найшулер, В.И. Невзоров, В.Ф. Павский // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. - 2016. - N 654. - С.128-135.

77. Никуйко С.А. Разработка активной фазированной антенной решетки современных РЛС с применением технологии воздушного охлаждения на базе аддитивных технологий / С.А. Никуйко // Сборник тезисов XLV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». - 2019. - С.497-498.

78. Генов А.А. Микрополосковый излучающий модуль приемо-передающей активной фазированной антенной решетки X-диапазона / А.А. Генов, В.В. Осипов, А.В. Гурковский, Д.Н. Величко // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. Том 10. - 2018. - N 1. - С.31-34.

79. Смирнов А.П. Расчет поправочных коэффициентов для уменьшения погрешности измерения коэффициента усиления СВЧ измерительных антенн в промежуточной зоне / А.П. Смирнов, И.М. Малай, А.В. Титаренко // «Измерительная техника». - 2010. - N 9. - С.61-64.

80. Шитиков А.М. Сравнение методов обработки сигнала при калибровке цифровых приемных ФАР / А.М. Шитиков // Радиотехника. Том 83. - 2019. - N 4. - С.40-46.

81. Богданов А.В. Метод измерения абсолютного коэффициента усиления антенных систем Кв диапазона / А.В. Богданов, В.Д. Пашкевич // Материалы конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (Апино 2019)». - 2019. - С.43-49.

82. Шестаков Е.Н. Основные методы измерения коэффициента усиления антенн / Е.Н. Шестаков, В.И. Гриц, И.Я. Шестаков, Д.О. Малышев // Материалы конференции «Актуальные проблемы авиации и космонавтики». - 2019. - С.500-502.

83. Добычина Е.М. Измерение коэффициента усиления антенн методом отражения / Е.М. Добычина, М.В. Снастин, Р.Ю. Малахов // Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крымико'15)». - 2015. - С.449-450.

84. Жуков С.А. Повышение точности системы управления коэффициентом усиления передающего устройства РЛС на основе восстановления параметров усиленного сигнала / С.А. Жуков, И.Г. Садиков, Е.С. Солотин // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. Том 7. - 2017. - N 2. - С.214-217.

85. Сидоров А.А. Приемник прямого усиления с повышенным коэффициентом передачи детектора / А.А. Сидоров, А.П. Коваленко // Ученые записки Брянского Государственного Университета. - 2016. - N 1. - С.62-63.

86. Кутузов В.М. Многополюсный режим автоколебаний в РЛС с положительной обратной связью / В.М. Кутузов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. - 2015. - N 1. - С.28-32.

87. Акимов А.А. Амплитудные и пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в схеме с положительной обратной связью / А.А. Акимов, В.В. Ивахник, В.И. Никонов // Материалы конференции «VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике». - 2017. - С.177-178.

88. Савченко М.П. Цепь отрицательной обратной связи по шумам для автогенератора с варикапами / М.П. Савченко, О.В. Старовойтова // Вестник Балтийского Федерального Университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. - 2016. - N 2. - С.66-69.

89. Березовский С.В. СВЧ-приемный модуль для бортовой аппаратуры / С.В. Березовский, Н.А. Михайлов, А.В. Штык, М.Б. Орехов // Вестник воздушно-космической обороны. - 2018. - N 1(17). - С.44-47.

90. П.А. Тушнов Технологические аспекты модульного принципа построения СВЧ-трактов ППМ АФАР / П.А. Тушнов, В.С. Бердыев, М.М. Митрофанов // Радиотехника. - 2017. - N 10. - С.44-55.

91. Богданов Р.А. СВЧ-тракта приемо-передающего модуля АФАР для космического радиолокатора X-диапазона / Р.А. Богданов, О.С. Мальцев, Д.В. Соколовский, А.А. Павлючик // Материалы конференции «Инженерия для освоения космоса». - 2018. - С.61-63.

92. Рысева А.С. Переходы между линиями передач СВЧ, реализуемые в приемо-передающем модуле / А.С. Рысева, И.А. Ярчак // Материалы конференции «XVII Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь - перспективные технологии». - 2019. - С.74-79.

93. Карасев М.С. Приемо-передающий модуль X-диапазона с внутренней проверкой электрических параметров приемного и передающего каналов / М.С. Карасев // Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника». - 2020. - N 2(545)

94. Карасев М.С. Приемо-передающий модуль АФАР X-диапазона с внутренней калибровкой приемника и функцией проверки приемного и передающего каналов / М.С. Карасев, А.Г. Далингер, С.В. Шацкий, С.А. Щеголев, А.В. Адиатулин // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». - 2019. - С.156-158.

95. Maksim Karasev X-band transceiver module with a function of internal verification of receiving and transmitting channels / Maksim Karasev, Alexander Dalinger, Sergei Shatsky, Sergei Shchyogolev, Andrey Adiatulin, Dmitriy Zavyalov and Sergei Barskov // ITM Web of conference 30. 01009. -2019.

96. Карасев М.С. Оперативный контроль электрических параметров приемо-передающих модулей X-диапазона частот // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 3(550).

97. Савелькаев С.В. Обзор методов измерения S-параметров транзисторов СВЧ и их сравнительный анализ / С.В. Савелькаев // Успехи современной радиоэлектроники. - 2018. - N 9. - С.3-14.

98. Литовченко В.А. Обзор методов измерения S-параметров транзисторов СВЧ в режиме большого сигнала / В.А. Литовченко, Н.В. Заржецкая // Вестник СГУГИТ. Том 24. - 2019. - N 4. - С.306-327.

99. Артюхин В.В. Устройства приема СВЧ сигналов / В.В. Артюхин, А.М. Достярова, А.А. Куликов, Р.Т. Сафин // Учебное пособие для студентов специальностей «5В071900 - Радиотехника, электроника, и телекоммуникации», «6М071900 - Радиотехника, электроника и телекоммуникации». - 2015. - 462 с.

100. Ким В.И. Калибровка АФАР при помощи выносной антенны контрольного сигнала / В.И. Ким // Материалы конференции «XV Молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь - перспективные технологии». - 2017. - С.80-83

101. Шишов Ю.А. Методика калибровки крупноапертурной приемной активной фазированной антенной решетки / Ю.А. Шишов, Д.В. Губанов, М.Г. Вахлов, В.М. Балашов // Вопросы радиоэлектроники. - 2019. - N 10. - С.37-44.

102. Шишов Ю.А. Калибровка приемных модулей крупноапертурных активных фазированных антенных решеток РЛС / Ю.А. Шишов, М.Г. Вахлов // Радиотехника. - 2017. - N 2. - С.85-92.

103. Ступин Д.Д. Исследования и испытания передающих комплексов АФАР для обеспечения тактико - технических характеристик РЛС / Д.Д. Ступин, А.Ю. Перлов, А.В. Маврин // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2018. - N 3(197). - С.143-155.

104. Барняков А.М. Сверхвысокочастотный коаксиальный выключатель / А.М. Барняков, А.Е. Левичев, С.Л. Самойлов, Ю.Д. Черноусов, И.В. Шеболаев // Приборы и техника эксперимента. - 2015. - N 3. - С.79-84.

105. Хохлов А.В. Системы управления СВЧ-выключателями в дифференциально-коммутационных радиополяриметрах / А.В. Хохлов // Вестник Саратовского Государственного Технического Университета. Том 4. - 2014. - N 1(77). - С.66-76.

106. Троицкий Б.С. Измерение коэффициента шума устройств, содержащих нелинейные каскады / Б.С. Троицкий // Современные информационные и электронные технологии. Том 1. - 2014. - N 15. - С.215-216.

107. Козлова Т.А. Расчет коэффициента шума радиоприемного устройства СВЧ-диапазона / Т.А. Козлова, М.И. Бастракова // Материалы конференции «Инженерные кадры - будущее инновационной России». - 2015. - С.63-65.

108. Козлова Т.А. Методика расчета коэффициента шума СВЧ приемника / Т.А. Козлова, М.И. Бастракова // Материалы конференции «Научному прогрессу - творчество молодых». - 2016. - N 3. - С.22-24.

109. Хлусов В.А. Коэффициент шума активной антенной решетки / В.А. Хлусов, В.В. Доценко // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Том 20. - 2017. - N 4. - С.7-10.

110. Щербинин А.В. Разработка метода измерения коэффициента шума для многоканальных систем (АФАР) / А.В. Щербинин // Материалы конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». - 2017. - С.93.

111. Сабиров Т.Р. Результаты разработки новой конструкции элемента АФАР / Т.Р. Сабиров // Известия высших учебных заведений. Физика. Том 55. - 2012. - N 8-2. - С.69-70.

112. Персичкин А.А. Измерение отношения сигнал/шум смеси гармонического сигнала и узкополосного шума / А.А. Персичкин, А.А. Шпилевой // Вестник Балтийского Федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. - 2012. - N 10. - С.126-130.

113. Егоров В.В. Оценка отношения сигнал/шум при использовании сигналов с фазовой модуляцией / В.В. Егоров, М.С. Смаль // Телекоммуникации. - 2013. - N 5. - С.29-34.

114. Патюков В.Г. Оценка отношения сигнал/шум на основе фазовых флуктуаций сигнала / В.Г. Патюков, Е.В. Патюков, А.А. Силантьев // Журнал радиоэлектроники. - 2013. - N 4. - С.1.

115. Глинченко А.С. Повышение достоверности спектральных измерений параметров сигналов при малых отношениях сигнал-шум / А.С. Глинченко, А.М. Алешечкин, В.А. Комаров // Метрология. - 2015. - N 3. - С.46-57.

116. Лемешко Н. Измерения коэффициента шума с использованием генераторов шума с постоянным запоминающим устройством и автоматическим управлением / Н. Лемешко, К. Румянцев // Компоненты и технологии. - 2020. - N 3(224). - С.127-136.

117. Тимошенков В.П. Исследование устройства управления для СВЧ ППМ X-диапазона / В.П. Тимошенков, А.И. Хлыбов, Д.В. Родионов, Е.Ю. Котляров, А.Г. Ефимов // Материалы конференции «Инновационные подходы к решению технико-экономических проблем». - 2019. - С.117-132.

118. Петров А.С. Анализ особенностей многолучевого диаграммообразования в аналого-цифровых активных фазированных антенных решетках / А.С. Петров,

Р.Ю. Малахов, В.Д. Тепляков // Радиотехника и электроника. Том 64. - 2019. - N 4. - С.340-349.

119. Шкуркин М.С. Метод уменьшения погрешности измерений характеристик направленности антенн на основе фильтрации амплитудно-фазового распределения / М.С. Шкуркин // Измерительная техника. - 2012. - N 2. - С.53-55.

120. Мазин А.В. Система автоматизированного учета амплитудно-фазового распределения поля и коррекции диаграммы направленности / А.В. Мазин, П.В. Николаев // Вопросы радиоэлектроники. Том 1. - 2012. - N 3. - С.70-83.

121. Габриэльян Д.Д. Синтез амплитудно-фазового распределения токов на отражающей поверхности по заданной диаграмме направленности / Д.Д. Габриэльян, Н.И. Бобков, Н.Г. Пархоменко // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2012. - N 11 (136). - С.15-25.

122. Балагуровский В.А. Исследование работы коммутационного метода измерения амплитудно-фазового распределения антенной решетки с взаимодействующими элементами / В.А. Балагуровский, А.С. Кондратьев, А.О. Маничев, Н.П. Полищук // Радиотехника. - 2013. - N 4. - С.70-81.

123. Фролов И.И. Оценивание амплитудно-фазового распределения при непрерывном сканировании антенной решетки / И.И. Фролов // Вестник Рязанского Государственного радиотехнического университета. - 2013. - N 46-2. - С.109-111.

124. Мищенко С.Е. Оптимизация энергетических характеристик антенной решетки с учетом флуктуаций амплитудно-фазового распределения и отказов отдельных элементов / С.Е. Мищенко, Н.В. Шацкий // Журнал радиоэлектроники. - 2014. - N 1. - С.5.

125. Величко М.А. Метод формирования амплитудно-фазового распределения из непрерывного фазомодулированного излучения / М.А. Величко // Материалы конференции «Теоретические и прикладные вопросы образования и науки. - 2014. - С.31-32.

126. Тяпкин В.Н. Управление амплитудно-фазовым распределением адаптивной фазированной антенной решетки / В.Н. Тяпкин, Д.Д. Дмитриев, Е.Н. Гарин, А.В. Соколовский // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2013. - N 4. - С.66-71.

127. Топильский В.Б. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей. Учебное пособие / В.Б. Топильский. - М.: Рекламно-издательский центр «Техносфера», 2014. - 288 с.
128. Абидова Г.Ш. Разработка аналого-цифрового преобразователя следящего типа / Г.Ш. Абидова, О.О. Зарипов // Современные тенденции развития науки и технологий. - 2016. - N 3-2. - С.115-117.
129. Хрисанов Н.Н. Повышение быстродействия многоканального аналого-цифрового преобразователя / Н.Н. Хрисанов, П.В. Иванов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии. - 2016. - С.408-411.
130. Хрисанов Н.Н. О повышении быстродействия аналого-цифровых преобразователей / Н.Н. Хрисанов // Материалы конференции «Перспективные информационные технологии». - 2016. - С.163-166.
131. Батов П.Л. Система управления АФАР: алгоритм вычисления и формирования амплитудно-фазового распределения / П.Л. Батов, Н.В. Дрожжина // Успехи современной радиоэлектроники. - 2015. - N 3. - 45-49.
132. Габриэльян Д.Д. Коррекция амплитудно-фазового распределения раскрываемой антенной решетки / Д.Д. Габриэльян, Д.С. Федоров, А.Л. Шлаферов, В.О. Петин, Ю.В. Кузнецов // Материалы конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». - 2017. - С.470-475.
133. Николаев В.А. Новая приемная антенна для загоризонтной РЛС поверхностной волны / В.А. Николаев, О.А. Бакурова // Успехи современной радиоэлектроники. - 2012. - N 2. - С.64-69.
134. Белоусов А.А. Исследование возможных способов реализации сверхширокополосных ограничителей мощности диапазона СВЧ / А.А. Белоусов, А.А. Дубровская, Е.В. Тихонов // Материалы конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». - 2014. - С.61-70.
135. Плешивцев В.И. Особенности построения диапазонных СВЧ-приемников МРЛС с ФАР и АФАР / В.И. Плешивцев // Вестник воздушно-космической обороны. - 2014. - N 1(1). - С.75-81.

136. Семенова А.А. Защитное устройство на GaAs для работы в X-диапазоне частот / А.А. Семенова, М.Н. Петров // Вестник Новгородского Государственного Университета им. Ярослава Мудрого. - 2019. - N 4(116). - С.49-52.

137. Селезнев Б.И. Защита СВЧ малошумящего усилителя от статического электричества и входной СВЧ мощности / Б.И. Селезнев, А.М. Осипов, С.В. Платонов // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. - 2012. - N 1-2. - С.153-156.

138. Темнов А.М. Анализ монолитных интегральных схем СВЧ для приемопередающих 2D- и 3D-модулей АФАР X-диапазона / А.М. Темнов // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. - 2014. - N 1(520). - С.45-53.

139. Кондукторов А.А. Расширение динамического диапазона малошумящего усилителя X-диапазона / А.А. Кондукторов, А.И. Кирпиченков // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. - 2015. - N 4(160). - С.35-38.

140. Осипов А.М. Малошумящий усилитель с выключателем / А.М. Осипов, Э.Ю. Козловский, Б.И. Селезнев // Вестник Новгородского Государственного Университета им. Ярослава Мудрого. - 2016. - N 4(95). - С.76-79.

141. Назарова Г.Н. Методика оптимизации параметров монолитных малошумящих усилителей в САПР / Г.Н. Назарова, В.В. Елесин, Д.И. Сотсков // Безопасность информационных технологий. Том 23. - 2016. - N 3. - С.53-59.

142. Вендик О.Г. Развитие малошумящих усилителей СВЧ / О.Г. Вендик // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Том 1. - 2017. - С.241-245.

143. Осадчий Е.Н. Методика проектирования малошумящего усилителя СВЧ входного модуля / Е.Н. Осадчий, В.Г. Барашян, И.Р. Донченко // Научный альманах. - 2017. - N 4-3(30). - С.131-134.

144. Дорошевич А.В. Оценка перспективности различных вариантов ограничителей мощности СВЧ-сигнала / А.В. Дорошевич, В.Д. Шашурин // Научные технологии. Том 18. - 2017. - N 8. - С.30-33.

145. Татаренко А.С. Магнитоэлектрические СВЧ вентили аттенюаторы / А.С. Татаренко, Д.В. Снисаренко, М.И. Бичурин, М.А. Хаванова // Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крымико'17)». - 2017. - С.785-791.

146. Егоров Н. Циркуляторы и вентили ВЧ и СВЧ-диапазона - решения компании DITOM MICROWAVE / Н. Егоров // Электроника: наука, технология, бизнес. - 2013. - N 2(124). - С.94-97.

147. Лаврентьева Д.В. Моделирование магнитоэлектрических управляемых невзаимных СВЧ устройств / Д.В. Лаврентьева, А.С. Татаренко // Вестник Новгородского Государственного Университета им. Ярослава Мудрого. - 2016. - N 4(95). - С.69-72.

148. Семенов М.Г. Современные тенденции развития полосковых ферритовых развязывающих приборов S- и X-диапазонов / М.Г. Семенов, Л.К. Першина, В.А. Подуваев, А.С. Семенов // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. - 2017. - N 1(532). - С.6-17.

149. Семенов М.Е. Комплект ферритовых полосковых вентилях и циркуляторов высокого уровня мощности P-, L-, S-, C- и X-диапазонов / М.Е. Семенов, Н.Д. Урсуляк, Л.К. Першина, А.Е. Налогин, В.В. Федоров, Н.В. Серов, Н.В. Бовть // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. - 2013. - N 3(518). - С.245-249.

150. Копылова О.С. Ферритовые устройства СВЧ / О.С. Копылова, В.В. Кравченко // Материалы конференции «Научные достижения и открытия 2018». - 2018. - С.29-31.

151. Копылова О.С. Применение ферритов в сверхвысокочастотных устройствах / О.С. Копылова, Н.В. Урядов // Материалы конференции «Лучшая научно-исследовательская работа 2018». - 2018. - С.41-44.

152. Пономарев Н.Н. Разработка конструкции ферритового вентиля / Н.Н. Пономарев // Материал конференции «Молодежь и наука». - 2015. - С.142-142а.

153. Гращенко Д.В. Изучение зависимости теплопроводимости металломатричного композиционного материала AlSiC от параметров пористости / Д.В. Гращенко, Б.В. Щетанов, А.В. Дерев, К.Н. Нищев, В.В. Елисеев, В.В. Березовский //

Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2012. - N 12. - С.18.

154. Kablov E.N. AlSiC-based metal matrix composites for power electronic devices / E.N. Kablov, D.V. Grashchenkov, B.V. Shchetanov, A.A. Shavnev, A.N. Nyafkin, L.A. Emikh, S.M. Vdovin, K.N. Nishchev, V.V. Chibirkin, V.V. Eliseev // Composites: mechanics, computations, applications. - 2013. - 1. - P.65-74.

155. Nishchev K.N. Studying the microstructure of AlSiC metal matrix composite material by scanning electron microscopy / K.N. Nishchev, M.I. Novopoltsev, V.P. Mishkin, Shchetanov B.V. // Bulletin of the Russian academy of sciences: Physics. - 2013. - N 8. - P.981-985.

156. Sevostyanov N.V. The uniform metallization of the AlSiC metal matrix composite material surface / N.V. Sevostyanov, K.N. Nishchev, M.I. Novopoltsev // Journal of surface engineered materials and advanced technology. - 2014. - N 4. - P.237-241.

157. Grishanin A. MMC AlSiC as alternative for molybdenum in power press-pack semiconductor design. Investigations of electric conductivity properties of AlSiC. / A. Grishanin, V. Martynenko, V. Eliseev, A. Samoylov, K. Nishchev, M. Novopoltsev // Materials of conference «PCIM Europe 2017 - International exhibition and conference for power electronics, intelligent motion, renewable energy and energy management». - 2017. - 799-868.

158. Grishanin A. Application of MMC AlSiC thermocompensators in power press-pack diodes and thyristors / A. Grishanin, V. Martynenko, V. Eliseev, M. Malygin, A. Samoylov, A. Plotnikov, K. Nishchev, M. Novopoltsev // Materials of conference «PCIM Europe conference proceedings». - 2018. - 1384-1387.

159. Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Щеголев С.А., Адиатулин А.В. Приемно-передающий субмодуль X-диапазона частот // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» г. Санкт-Петербург. – 2020. – С.23-26.

160. Карасев М.С. Приемно-передающий субмодуль с гибкой печатной платой для подачи питания и управления // Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь – 2020. – №1-2. – С.29-30.

161. Карасев, М.С. Приемо-передающий субмодуль X-диапазона частот // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3(546) – С. 40-44.

162. Иовдальский В.А., Далингер А.Г., Соколов И.А., Карасев М.С. Приемо-передающие модули АФАР СВЧ-диапазона. Учебное пособие. – Москва. Изд. КУРС, 2022. – 200с.

163. Карасев М.С. Методика измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного-канала модуля АФАР после воздействия на вход СВЧ импульса высокой мощности / М.С. Карасев, А.Г. Далингер, В.А. Жерновенков, С.А. Щеголев, А.В. Адиатулин // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. - 2018. - N 4(539). - С.15-18.

164. Карасев М.С., Далингер А.Г., Адиатулин А.В., Щёголев С.А. Система контроля выходной мощности приемо-передающего модуля X-диапазона частот // Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь – 2021.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК

1. Карасев, М.С., Жерновенков В.А. Конструктивные особенности ППМ «Аббат-И» с применением поверхностного контактного соединителя для передачи СВЧ энергии и НЧ сигналов управления и электропитания // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 3(530). – С. 71-80.
2. **Карасев, М.С.** Методика измерений параметров перспективных ППМ АФАР с применением поверхностного контактного соединителя // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 4(531). – С. 37-44.
3. Карасев, М.С., Жерновенков В.А., Далингер А.Г., Шацкий С.В. Перспективный многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР X-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 1(532). – С. 45-48.
4. Карасев, М.С., Жерновенков В.А., Далингер А.Г., Щеголев С.А., Адиатулин А.В. Методика измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного-канала модуля АФАР после воздействия на вход СВЧ импульса высокой мощности // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 4(539). – С. 15-18.
5. Карасев, М.С., Далингер А.Г., Щеголев С.А., Адиатулин А.В. Многофункциональный приемо-передающий модуль X-диапазона частот // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 3(542). – С. 51-54.
6. **Карасев, М.С.** Приемо-передающий модуль X-диапазона с внутренней проверкой электрических параметров приемного и передающего каналов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 2(545). – С. 6-11.
7. **Карасев, М.С.** Приемо-передающий субмодуль X-диапазона частот // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3(546) – С. 40-44.
8. **Карасев М.С.** Оперативный контроль электрических параметров приемо-передающих модулей X-диапазона частот // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 3(550).

Публикации по теме диссертации в журналах, индексируемых в международных базах данных

9. Maksim Karasev, Alexander Dalinger, Sergei Shatsky, Sergei Shchyogolev, Andrey Adiatulin, Dmitriy Zavyalov and Sergei Barskov X-band transceiver module with a function of internal verification of receiving and transmitting channels // ITM Web of conference 30. 01009 – 2019

Патенты и свидетельства

10. Приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки СВЧ-диапазона / Далингер А.Г., Шацкий С.В., Иовдальский В.А., Карасев М.С. // Патент РФ на изобретение №2713079.

11. Приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки СВЧ-диапазона / Далингер А.Г., Шацкий С.В., Иовдальский В.А., Карасев М.С. // Патент РФ на изобретение №2730042.

Другие публикации по теме диссертации

12. Карасев М.С., Шацкий С.В., Далингер А.Г. Перспективный многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР X-диапазона и методика измерения его параметров // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» г. Санкт-Петербург. – 2017. –С. 355-359.

13. Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Жерновенков В.А., Синькова Е.А., Щеголев С.А. Многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР нового поколения // Сборник трудов VII Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» г. Санкт-Петербург. – 2018. – С.239-242

14. Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Щеголев С.А., Адиятулин А.В. Приемо-передающий модуль АФАР X-диапазона с внутренней калибровкой приемника и функцией проверки приемного и передающего каналов // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» г. Санкт-Петербург. – 2019. – С.156-158.

15. Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Щеголев С.А., Адиатулин А.В. Приемно-передающий submodule X-диапазона частот // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» г. Санкт-Петербург. – 2020. – С.23-26.
16. Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Щеголев С.А., Адиатулин А.В., Завьялов Д.К., Иовдальский В.А. Приемно-передающий модуль АФАР X-диапазона с функцией внутренней проверки приемного и передающего каналов // Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь – 2020. – №1-1. – С.37-38.
17. **Карасев М.С.** Приемно-передающий submodule с гибкой печатной платой для подачи питания и управления // Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь – 2020. – №1-2. – С.29-30.
18. Карасев М.С., Далингер А.Г., Адиатулин А.В., Щеголев С.А., Олейник А.В. Оперативный контроль электрических параметров приемно-передающих модулей X-диапазона частот // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» г. Санкт-Петербург. – 2021.
19. Карасев М.С., Далингер А.Г., Адиатулин А.В., Щеголев С.А. Система контроля выходной мощности приемно-передающего модуля X-диапазона частот // Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь – 2021.
20. Щеголев С.А., Карасев М.С., Далингер А.Г., Адиатулин А.В., Путилин А.П., Астахов А.Д. Автоматизация измерений СВЧ электрических параметров современных приемно-передающих модулей X-диапазона частот // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» г. Санкт-Петербург. – 2021.
21. Щеголев С.А., Карасев М.С., Далингер А.Г., Жерновенков В.А., Адиатулин А.В., Путилин А.П., Астахов А.Д. Автоматизация измерений СВЧ электрических параметров современных приемно-передающих модулей X-диапазона частот // Материалы конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь – 2021.

Учебные пособия

22. Иовдальский В.А., Далингер А.Г., Соколов И.А., Карасев М.С. Приемопередающие модули АФАР СВЧ-диапазона. Учебное пособие. – Москва. Изд. КУРС, 2022. – 200с.

Личный вклад.

Статьи 2, 5, 6, 7, 8, 17 написаны автором лично.

Личный вклад соискателя в опубликованных в соавторстве работах состоит:

1. В проведении теоретических исследований о возможности контроля электрических параметров приемо-передающих модулей АФАР [9-16, 18, 19, 22].
2. В проектировании и конструировании перспективных приемо-передающих модулей для образцов военной техники [1, 3, 9-16, 18, 19, 22].
3. В разработке топологий приемного и передающего тракта, а также расчетов структурных схем приемо-передающих модулей [1, 3, 9-16, 18, 19, 22].
4. В выдвижении идеи применения оперативного контроля основных электрических характеристик приемо-передающих модулей для АФАР X-диапазона частот [4, 9, 10, 13-16, 18, 19, 22].
5. В проведении экспериментальных исследований применения оперативного контроля в составе приемо-передающих модулей АФАР X-диапазона частот [1, 3, 4, 9-16, 18-22].