

На правах рукописи



Карасев Максим Сергеевич

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

2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники,
квантовых устройств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Фрязино – 2022

Работа выполнена в АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Научный руководитель:

Пашковский Андрей Борисович,

доктор физико-математических наук,
заместитель начальника теоретического
отдела по научной работе
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Официальные оппоненты:

Раевский Алексей Сергеевич,

доктор физико-математических наук,
профессор, Нижегородский
государственный технический
университет им. Р.Е. Алексева,
профессор кафедры
«Физика и техника оптической связи»

Нефедов Сергей Игоревич,

доктор технических наук, доцент,
Московский институт электроники и
математики им. А.Н. Тихонова, советник
АО «НИИП имени В.В. Тихомирова»,
г. Жуковский

Ведущая организация:

Защита состоится 07 апреля 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 74.1.008.01 на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина» по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а, большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НПП «Исток» им. Шокина» и на сайте <http://science.istokmw.ru/avtoreferati-dissertaciy/>

Автореферат разослан 02 февраля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.В. Куликова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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-аттенуаторов 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 сигнала 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 адаптивно-го 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 схемотехнические 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 схемотехнические 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 схемотехнические 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 АФАР 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 (КСИ).

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

Во второй главе представлена структурная схема ППМ (рисунок 1), включающего в себя два приемных канала и один передающий канал (ПРД).

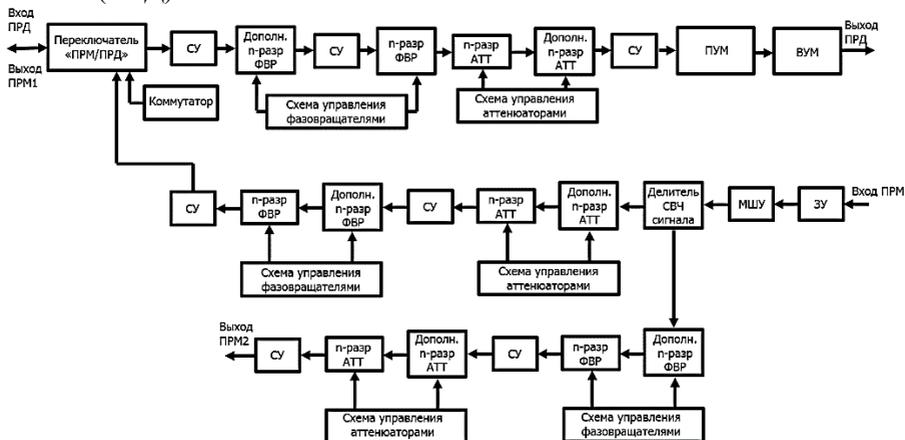


Рисунок 1 – Структурная схема модернизируемого ППМ

В представленной схеме нет контроля ЭП, а выводы о работоспособности модуля производятся на основании сигналов с выходов контроля фазовращателей и аттенуаторов. Для решения задачи обеспечения оперативного контроля ЭП каналов необходимо дополнить данную схему элементами, позволяющими получать контрольные сигналы исправности.

В качестве базовой схемы для получения КСИ, предлагается использовать разработанную схему системы контроля мощности (СКМ) (рисунок 2). Схема состоит из направленного ответвителя (НО), детекторного диода (ДД), усилителя постоянного тока (УПТ) и компаратора (КОМ).

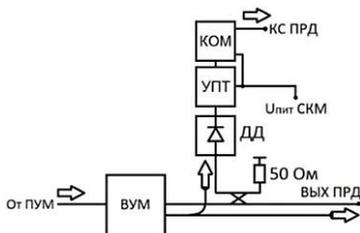


Рисунок 2 – Схема СКМ

Применим разработанную схему для оперативного контроля порогового значения выходной мощности ПРД. Для этого необходимо в штатном режиме работы ПРД отвести часть СВЧ-мощности с основной линии передачи, усилить выходное напряжение с ДД применяемым УПТ, обеспечить вывод уровня напряжения с КОМ отдельным выводом из модуля. При выполнении всех перечисленных условий на контрольном выходе «КС ПРД» (контрольный сигнал (КС) передающего канала) будет возникать логическая «1» сигнализирующая о присутствии требуемого порогового значения мощности в ПРД.

Изменяя ответвление НО и коэффициент усиления УПТ можно задать порог контроля выходной мощности в зависимости от поставленной задачи. Быстрый расчет требуемых ЭП СКМ выполняется по формулам:

$$R_{\text{осл. НО}} [\text{дБ}] = P_{\text{порог.}} [\text{дБм}] - P_{\text{вх. ДД}} [\text{дБм}] \quad (1)$$

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.

$$K_{\text{УПТ}} = U_{\text{КОМ}} [\text{В}] / U_{\text{вых. ДД}} [\text{В}] \quad (2)$$

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

В реальных системах не удастся добиться абсолютной линейности характеристики выходной мощности ПРД и входящего в состав системы контроля мощности НО и ДД, поэтому $P_{порог.}$ необходимо задавать по нижнему пределу срабатывания СКМ. Типовая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) СКМ с пороговым значением выходной мощности равным 3 Вт, приведена на рисунке 3.

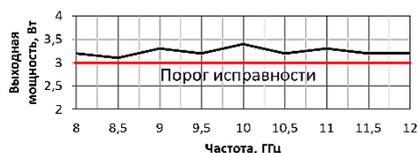


Рисунок 3 – Выходная мощность ППМ при срабатывании СКМ



Рисунок 4 – ППМ с СКМ

СКМ была реализована в составе ППМ, представленном на рисунке 4. Ключевой проблемой при измерении ЭП СКМ, было использование в составе конструкции, межплатного прижимного СВЧ-соединителя, который изображен на рисунке 5. 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 проволочных соединений при сборке. Недостатками такого соединения являются необходимость повышенной точности изготовления элементов конструкции ППМ и АФАР, а также сложность измерения ЭП ППМ в процессе производства.

Для измерения ЭП ППМ с таким типом СВЧ-соединения и межплатных прижимных СВЧ-соединителей, было разработано оригинальное контактное устройство, представленное на рисунке 6.



Рисунок 5 –
Межплатный
прижимной
СВЧ-соединитель

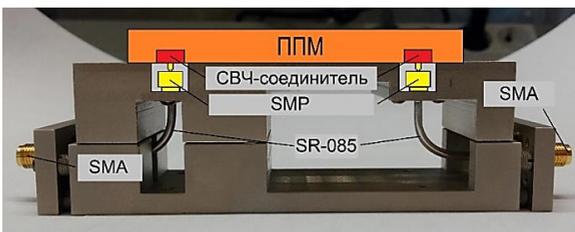


Рисунок 6 – Оригинальное контактное
устройство для контроля ЭП ППМ и меж-
платных прижимных СВЧ-соединителей

Проведенные измерения более тысячи образцов (более 15000 соединений), множество экспериментальных исследований, а также паспортизация, выполненная в процессе производства ППМ показали, что СВЧ-потери в контактном устройстве составляют $0,6 \pm \text{погрешность измерений (ПИ)}$ [дБ], а СВЧ-потери в межплатном прижимном СВЧ-соединителе составляют менее $0,2 \pm \text{ПИ}$ [дБ]. Максимальная проходная мощность разработанного контактного устройства по результатам испытаний составила $36 \pm \text{ПИ}$ [Вт]. С помощью разработанного контактного устройства была измерена АЧХ выходной мощности при срабатывании СКМ, которая представлена на рисунке 7. В соответствии с рисунком 7 можно сделать вывод, что СКМ позволяет получить подтверждение работоспособности ППМ при пороговом значении более 5 Вт.

В результате проведенной работы было получено среднее значение задержки реагирования СКМ составляющее ≈ 250 нс (рис.8).

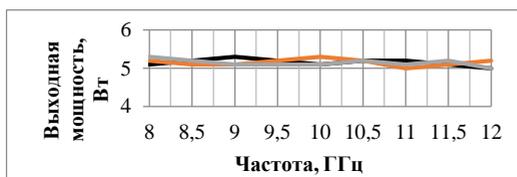


Рисунок 7 – Статистическая АЧХ вы-
ходной мощности ППМ при срабаты-
вании СКМ



Рисунок 8 – Измерение
задержки реагирования
СКМ

Полученные данные позволяют рассчитать затраты времени на оперативный контроль ЭП каналов ППМ.

В главе 2 показано, что предложенная схема СКМ позволяет при помощи специальной методики контролировать заданный пороговый уровень выходной мощности ПРД. Внедрение СКМ в состав ППМ, позволило сформировать принципы построения схем оперативного контроля и в дальнейшем оценить затраты времени на проверку каналов ППМ.

В третьей главе представлена методика оперативного контроля коэффициента усиления приемного/передающего канала с помощью положительной обратной связи (ПОС). Проверка осуществляется за счет введения СКМ на выходе каждого из каналов, дополнительных СВЧ-выключателей, линий передачи и взаимодействия входа/выхода каналов. Структурная схема ППМ с элементами оперативного контроля с помощью ПОС, изображена на рисунке 9.

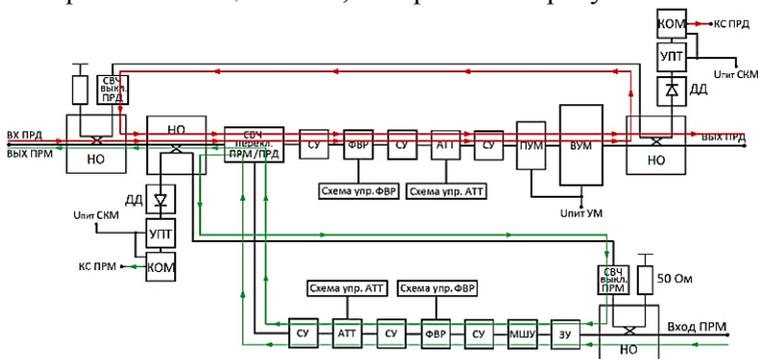


Рисунок 9 – Структурная схема ППМ с элементами оперативного контроля с помощью ПОС

При замыкании СВЧ-переключателя ПРМ/ПРД через направленный ответвитель ПРМ/ПРД, на вход ПРМ/ПРД проникает часть СВЧ-мощности, ответвленной с выходного усилителя мощности (ВУМ) для ПРД и с СВЧ-переключателя для ПРМ, через направленный ответвитель с СКМ ПРМ/ПРД. В частотной точке рабочего диапазона где коэффициент усиления канала имеет максимальное значение, возникает самовозбуждение приемного/передающего канала из-за ПОС. Направление СВЧ-сигнала при самовозбуждении приемного и передающего тракта, изображено на рисунке 9.

Ввод разрядов ослабления аттенуаторов (АТТ) расположенных в тракте, позволяет убрать самовозбуждение. Расчет по формуле (3) позволяет вычислить максимальный коэффициент усиления тракта

и определить коэффициент усиления канала с точностью до младшего разряда аттенюатора \pm ПИ.

$$K_{y \text{ ПРМ/ПРД макс.}} = |K_{п \text{ ОС}}| + \sum R_{\text{АТТ ПРМ/ПРД}} \quad (3)$$

где $K_{п \text{ ОС}}$ – коэффициент передачи ПОС; $\sum R_{\text{АТТ ПРМ/ПРД}}$ – суммарное ослабление разрядов аттенюаторов приемного/передающего тракта; $K_{y \text{ ПРМ/ПРД макс.}}$ – максимальное значение коэффициента усиления приемного/передающего тракта.

Проверка самовозбуждения канала обеспечивается СКМ, на выходе которой возникает КС (логическая «1») при самовозбуждении тракта («КС ПРМ» для приемного канала и «КС ПРД» для передающего канала). При замыкании СВЧ-выключателя, самовозбуждение тракта может не возникнуть, так как фазовые характеристики не соответствуют условию $\Delta\varphi = 0$. Для возникновения самовозбуждения, требуется вводить разряды фазовращателей канала до появления самовозбуждения. При отсутствии самовозбуждения канала при всех состояниях фазовращателей и аттенюаторов - канал является неисправным.

Для экспериментальной проверки методики оперативного контроля коэффициента усиления с помощью ПОС, был разработан стенд, структурная схема которого изображена на рисунке 10.

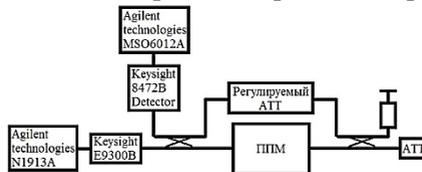


Рисунок 10 – Структурная схема стенда оперативного контроля коэффициента усиления каналов ППМ с помощью ПОС

Вход и выход модуля в составе стенда может изменяться в зависимости от проверки приемного или передающего канала.

Регулируемый аттенюатор используется для задания величины отклонения ПОС. Остальные приборы позволяют контролировать ЭП ППМ.

Экспериментальная проверка методики проводилась на примере приемного канала. Коэффициент усиления тракта модуля неизвестен. Коэффициент передачи петли обратной связи составляет -20дБ. При включении приемного канала в штатный режим работы возникает самовозбуждение (1 этап на рисунке 11).



Рисунок 11 – Амплитуда контрольного сигнала СКМ при проверке коэффициента усиления с помощью ПОС

Производится перебор разрядов ослабления аттенуаторов с шагом в 0,5 дБ. При вводе суммы разрядов ослабления в 5 дБ (разряды 1 дБ и 4 дБ) самовозбуждение канала пропадает (2 этап на рисунке 11).

Прокрутив все состояния фазовращателей и убедившись, что самовозбуждение не возникает, вычисляется максимальный коэффициент усиления приемного тракта по формуле (3).

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

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

Коэффициент усиления приемного канала составляет $24,5 < K_{у \text{ ПРМ}} \leq 25 \pm \text{ПИ} [\text{дБ}]$. Полученные результаты в процессе экспериментальных исследований, позволили сделать вывод о корректной работе методики проверки коэффициентов усиления каналов с помощью ПОС. На основе проведенных исследований был разработан алгоритм, который может быть использован для проверки коэффициента усиления в составе измерительного стенда или в составе АФАР. Методика проверки коэффициента усиления приемного канала, лежащего в диапазоне от 25 дБ до 29 дБ, изображена на рисунке 12. Время проверки коэффициента усиления, учитывая время переключения аттенуаторов, фазовращателей и получения КС с СКМ, составило менее 4 мкс. При проверке АФАР состоящей из 1000 каналов, время проверки всех каналов составит менее 4 мс (без учета задержек обработки контрольных сигналов устройством управления АФАР).

В четвертой главе представлена методика, основанная на ответвлении части мощности передатчика в приемник, позволяющая проводить проверку работоспособности приемного канала.

Для решения различных задач, ППМ должен иметь несколько вариантов проверки основных ЭП. Это позволит повысить точность получения результатов измерений и обеспечит взаимозаменяемость элементов встроенного оперативного контроля. Структурная схема с

элементами оперативного контроля работоспособности приемного канала, показана на рисунке 13.

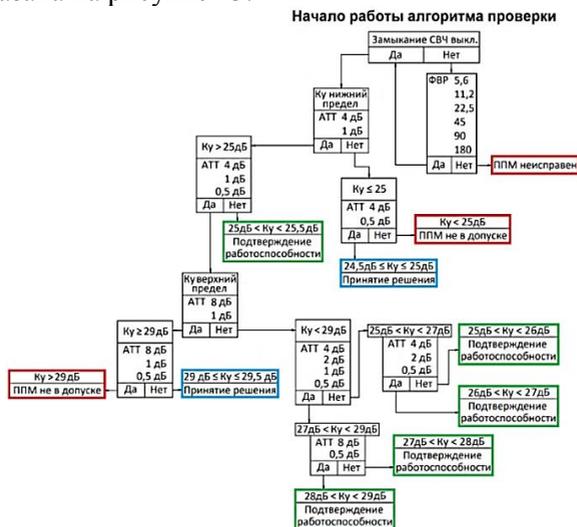


Рисунок 12 – Методика проверки коэффициента усиления приемного канала в диапазоне значений от 25 дБ до 29 дБ

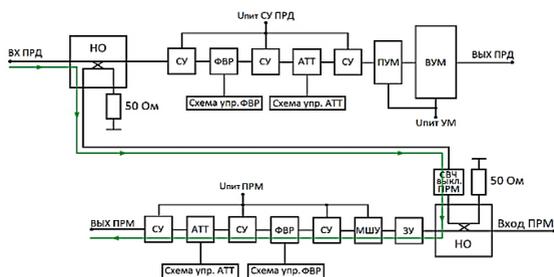


Рисунок 13 – Структурная схема с элементами оперативного контроля работоспособности приемного канала

Питание передающего канала отключено. На вход ПРД поступает мощность. 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:

$$P_{\text{вх ПРМ}} = P_{\text{вх ПРД}} - \sum R_{\text{отв НО}} - R_{\text{СВЧ выкл.}} \quad (4)$$

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

Рассматриваемая схема оперативного контроля коэффициента усиления была реализована в составе ППМ, изображенного на рисунке 13.

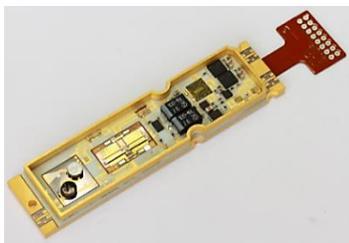


Рисунок 13 – Экспериментальный образец ППМ со схемой оперативного контроля работоспособности приемного канала

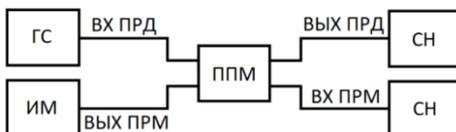


Рисунок 14 – Экспериментальный стенд проверки методики оперативного контроля работоспособности приемного канала

Для проверки разработанной методики был разработан экспериментальный стенд, изображенный на рисунке 14.

В состав схемы входят: генератор сигналов (ГС), согласованные нагрузки (СН), измеритель мощности (ИМ), измеряемый приемопередающий модуль (ППМ).

Полученные результаты сравнения коэффициента усиления, измеренного по техническим условиям на ППМ и коэффициента усиления полученного с использованием методики оперативного контроля, изображены на рисунке 15.

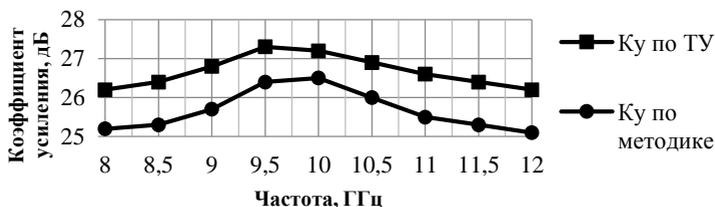


Рисунок 15 – Полученные результаты экспериментальной проверки работы оперативного контроля

Как видно из графика, характер линий коэффициентов усиления имеет схожую форму и имеет различие в АЧХ на величину $K_{y \text{ по ТУ}} = K_{y \text{ по методу}} + (1 \pm 0,2) \pm \text{ПИ}$ [дБ]. Так как при формировании ДН в АФАР используют калибровку каналов между собой для реализации требуемого амплитудного распределения, следовательно, АЧХ $K_{y \text{ по методу}}$ лежит в пределах $\pm 0,2 \pm \text{ПИ}$ [дБ] от АЧХ $K_{y \text{ по ТУ}}$. Экспериментально измеренное время проверки коэффициента усиления приемного канала в одной точке рабочего диапазона частот, составляет менее 80 нс.

В пятой главе представлена методика адаптивного изменения временных диаграмм.

Работа ППМ может быть нарушена внешними помеховыми сигналами, мешающими выполнять сканирование выбранной области пространства. При этом приемные каналы находятся в режим глубокого насыщения и считывание информации об объекте в пространстве затрудняется. Для решения задачи восстановления ППМ в штатный режим функционирования, требуется отключение питания активных элементов приемного тракта, определение параметров помехового сигнала высокого уровня мощности и корректировка длительности/скважности импульсных сигналов управления ППМ.

Описанные требования достигаются с помощью разработанной методики и схемы защиты, показанной на рисунке 16.

Схема защиты включает в свой состав СКМ с логическим элементом «2И-НЕ» и модулятором питания (МОД). В зависимости от используемой модели модулятора, логический элемент «2И-НЕ», может быть заменен на «2И».

При возникновении высокого уровня мощности на входе приемного канала, на выходе КОМ возникает логическая «1» (в соответствии с выше описанным принципом работы СКМ). Логическая «1» подается на вход микросхемы «2И-НЕ». МОД отключает питание активных элементов приемного канала. Усилители без напряжения питания вносят потери в приемный тракт, что позволяет защитить приемник обработки сигналов АФАР, находящийся после ППМ от выхода из строя.

При появлении помехового сигнала на выходе «КС» в схеме (рис. 16), ППМ должен переводиться в адаптивный импульсный режим работы. По форме приходящего импульса помехового сигнала (с вывода «КС») на устройство обработки, вычисляется его скважность и

длительность. После этого корректируются параметры импульсов управления ППМ таким образом, что при наличии помехового сигнала на входе приемных каналов активные элементы ПРМ отключены, а после окончания воздействия помехового сигнала подан собственный сигнал с ПРД. 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 «слеп».

Пример расстановки сигналов после корректировки импульсов управления ППМ, показан на рисунке 17.

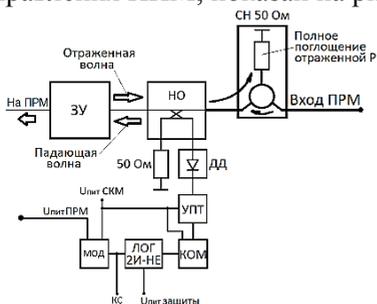


Рисунок 16 – Схема защиты ППМ от импульсных помеховых сигналов

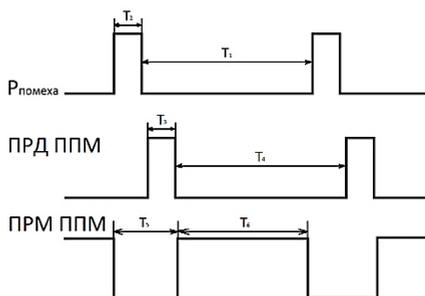


Рисунок 17 – Расстановка сигналов после адаптивного изменения временных диаграмм

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

Для проверки работы предложенной схемы и методики, был разработан экспериментальный стенд (рис.18) с использованием двух типов ППМ АФАР.

В состав стенда входят: измеритель мощности (ИМ), генератор сигналов (ГС), векторный анализатор цепей серии PNA-X, ППМ с СКМ (ППМ ПРД), показанный на рисунке 4, ППМ с программной блокировкой питания ПРМ (ППМ ПРМ), показанный на рисунке 19.

При включении ППМ ПРД в штатный режим работы на передаче, на выходе СКМ возникает КС, указывающий на то, что в линии передачи присутствует мощность выше 5 Вт (пороговое значение). ППМ ПРМ работает в режиме приема и при возникновении на управляющем контакте логической «1», питание узлов ПРМ отключается.

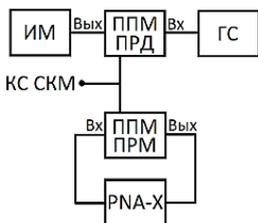


Рисунок 18 – Экспериментальный стенд проверки методики защиты ППМ от внешних импульсных помеховых сигналов



Рисунок 19 – Экспериментальный образец ППМ с программной блокировкой питания ПРМ

Проведенный эксперимент доказывает, что при возникновении на входе ПРМ высокого уровня мощности, схема, изображенная на рисунке 16, позволяет получить КС для дальнейшей корректировки длительности и скважность сигналов управления ППМ. Время получения КС на соответствующем выводе ППМ, при проведении эксперимента, составило менее 260 нс.

В шестой главе представлена разработанная общая схема ППМ с узлами оперативного контроля ЭП (рисунок 20).

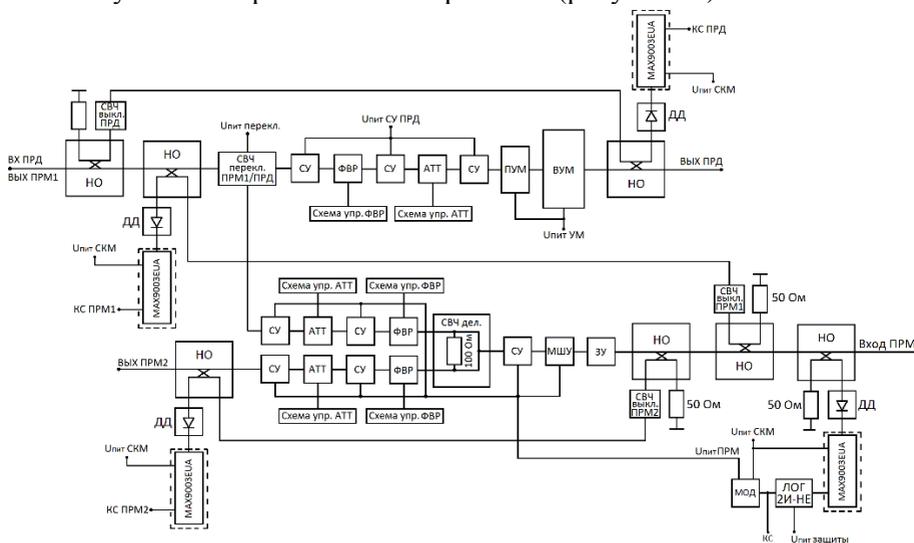


Рисунок 20 – Общая схема ППМ с узлами оперативного контроля ЭП

Схема обеспечивает устройство управления и обработки данных АФАР контрольными сигналами, с помощью которых можно проводить самокалибровку или подстройку ЭП в режиме реального времени. В главе описывается применение комбинаций КС для определения ЭП каналов ППМ по разработанным методикам при различных поставленных задачах.

В заключении сформулированы основные полученные 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, позволяющая проводить измерения ЭП 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.

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.** 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 приемопередающий 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., Адиатулин 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. Приемо-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. Приемо-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.** Приемо-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 приемо-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., Щёголев С.А. Система контроля выходной мощности приемо-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 приемо-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 приемо-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].