

На правах рукописи

ДУТЫШЕВ Иван Николаевич

УДК.621.375.029.064.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ
СИГНАЛОВ В СВЧ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ
УСТРОЙСТВАХ ПРИ УЛУЧШЕНИИ ИХ МАССОГАБАРИТНЫХ И
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**Специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро – и наноэлек-
троника, приборы на квантовых эффектах»**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

г. Фрязино 2008г.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно – производственное предприятие «Исток».

Научный руководитель:

Кандидат технических наук Перегонов Сергей Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, Жиган Игорь Платонович,

кандидат технических наук, с.н.с., Архипкин Владимир Яковлевич.

Ведущая организация ОАО «Телеком»

Защита состоится 9 декабря 2008г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д409.001.01 при ФГУП «НПП «Исток» по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а. Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП «Исток»

Автореферат разослан 6 ноября 2008г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



Погорелова Э.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для современных радиосистем связи различного назначения трудно переоценить значение приемопередающих устройств СВЧ диапазона. Масса, габариты, надёжность, энергопотребление радиосистемы, в первую очередь, во многом зависит от характеристик приёмопередающих устройств. В свою очередь, основной частью приёмопередающих устройств являются СВЧ приёмные и передающие тракты. В зависимости от особенностей назначения радиосистемы на приёмные и передающие СВЧ тракты накладываются свои требования.

Обычно, с целью экономии выходной тракт передатчика работает в режиме близком к насыщению. При таких режимах, даже и при фазовой модуляции возникает опасность появления интермодуляционных искажений (ИМИ) третьего порядка слишком высокого уровня, которые увеличивают ширину спектра сигнала, как минимум, в два раза. Это может привести к нарушениям связи в соседних каналах. Борьба с ИМИ является важной задачей при решении проблемы увеличения количества передаваемой информации на единицу ширины спектра сигнала. Кроме задачи уменьшения ИМИ существуют и другие проблемы. Следует выделить проблему электромагнитной совместимости. Она особенно актуальна для приёмных и передающих трактов станций спутниковой связи, построенных с несколькими преобразованиями частоты. Сигналы гетеродинов могут попадать в тракт сигнала приёмника, вводить оконечные каскады приемника в нелинейный режим. Это опасно тем, что может возникнуть эффект подавления слабого сигнала сильным, при этом ухудшается соотношение сигнал – шум, что, как следствие, приводит к нарушению связи. В передающем тракте наличие сигналов гетеродинов, расположенных в других стволах, будет восприниматься в соседних каналах как мешающая помеха. Большой уровень этой помехи, сравнимый с сигналом, может привести к нарушению связи в соседних каналах. Для устранения этих эффектов следует обратить особое внимание на хорошую фильтрацию сигналов в приёмном и передающем трактах. Это обстоятельство приводит к необходимости более

подробного рассмотрения вопросов проектирования фильтров. При разработке фильтров предпочтительно решение, обеспечивающее минимальную стоимость и габариты при сохранении всех требуемых характеристик.

В радиолокации в настоящее время широко применяются активные фазированные антенные решётки (АФАР). Они позволяют суммировать в пространстве мощности большого числа передающих модулей, управлять диаграммой направленности и производить сканирование пространства лучом приёмопередающей антенны. Сканирование позволяет осуществлять сопровождение движущихся объектов и определение их угловых координат. Излучатель, усилители, фильтры, фазовращатель, аттенюатор, линии передачи конструктивно объединены в одно устройство: модуль АФАР. Основными требованиями к модулям АФАР являются: обеспечение заданной выходной мощности, высокого КПД, сравнительно широкой полосы пропускания, малого разброса параметров отдельных экземпляров, стабильности работы в широком интервале изменения температуры, хорошей фильтрации внеполосных и побочных излучений. При выполнении всех перечисленных требований модуль АФАР должен иметь ряд конструктивных особенностей, определяемых общей конструкцией антенной решётки, иметь определённую конфигурацию, малую массу и габариты. Составной частью модуля АФАР является фазовращатель, необходимый для управления фазой сигнала, поэтому поиск новых решений при проектировании фазовращателя является важнейшей задачей.

В системах связи с корреляционной обработкой сигналов составной частью оптимального приёмника является согласованный фильтр, обеспечивающий на своём выходе максимальное отношение сигнал - шум. В свою очередь, все искажения сигнала происходят в передающих и приёмных трактах. Поэтому, требования на искажения сигнала в приемных и передающих трактах для оптимального приёма необходимо задавать в виде изменений корреляционной функции входного сигнала. Однако из-за отсутствия измерительной аппаратуры такой подход используется весьма редко.

Из сказанного выше следует, что проектирование СВЧ трактов радиосистем имеет свои особенности и сопряжено с рядом характерных трудностей. Электрические параметры и массогабаритные характеристики приёмных и передающих трактов определяются не только структурой радиосистемы, но и требуемой надежностью, ремонтпригодностью, серийностью, энергопотреблением, себестоимостью и допустимой компоновкой радиосистемы в целом. Требования на исключительно высокие электрические параметры, жёсткие массогабаритные характеристики и низкое энергопотребление для некоторых радиосистем часто являются противоречивыми.

Цель работы – создание СВЧ усилителей с пониженными ИМИ, создание методик расчета микрополосковых фильтров и разработка на их основе сверхмалогабаритных фильтров и фильтров со специальными параметрами, создание методов компенсации искажений сигналов на основе анализа корреляционных характеристик СВЧ устройств, создание малогабаритных фазовращателей на основе совмещения с другими элементами СВЧ устройства.

Постановка задачи – для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- получение высокой выходной мощности при низких нелинейных искажениях сигналов и малом энергопотреблении, анализ работы усилителя в нелинейном режиме, уменьшение интермодуляционных искажений путем компенсации нелинейных параметров полупроводникового элемента, а также использование устройств, компенсирующих нелинейные искажения,
- разработка новых типов фильтров, имеющих малые габариты и высокие электрические параметры, разработка методов расчета нестандартных топологий фильтров,
- оценка влияния искажений сигналов в СВЧ трактах на тактико-технические характеристики всей системы, разработка методов измерений искажений сигналов,

проведение коррекции параметров приёмных и передающих трактов с целью уменьшения искажений,

- проектирование плавных и ступенчатых фазовращателей и пути их миниатюризации, совмещение фазовращателя с другими элементами схемы.

Объектом исследования служат: СВЧ усилители мощности на полевых и биполярных транзисторах; СВЧ микрополосковые полосно-пропускающие фильтры; СВЧ тракты и их амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики; плавные и ступенчатые СВЧ фазовращатели.

Предметом исследования служат: расчет и экспериментальное обследование цепей компенсации нелинейных искажений, возникающих в усилителях, работающих в многосигнальном режиме; проектирование и расчет полосно-пропускающих фильтров со специальными параметрами и с минимальными габаритами; методы измерения и коррекции искажений сигналов приемных и передающих СВЧ трактов; проектирование и расчет плавных и ступенчатых СВЧ фазовращателей.

Научная новизна. В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Разработан метод снижения ИМИ в СВЧ усилителе на биполярном транзисторе. Установлено, что значительное влияние на ИМИ третьего порядка оказывает динамическая ёмкость коллекторного перехода.

2. Разработаны методы увеличения динамического диапазона и уменьшения ИМИ в СВЧ усилителях на полевых транзисторах путём: стабилизации тока транзистора, введения низкочастотной отрицательной обратной связи и подключения на вход усилителя компенсирующего устройства.

3. Разработан 100-ваттный усилитель с пониженными ИМИ третьего порядка и с обратной связью для защиты выходных транзисторов от пробоя напряжением ИМИ второго порядка.

4. Разработаны методики расчета малогабаритных микрополосковых фильтров на четвертьволновых шпилечных резонаторах, на полусосредоточенных элементах с емкостными и индуктивными связями.

5. Разработаны топологии сверхширокополосных фильтров и фильтров с увеличенным подавлением сигналов на заданных частотах.

6. Проведен анализ возможности реализации фильтров различных топологий в зависимости от частоты и полосы пропускания.

7. Показано, что соотношение сигнал-шум на выходе оптимального фильтра уменьшается пропорционально квадрату коэффициента взаимной корреляции входного и выходного сигналов радиотехнического устройства.

8. Показано, что измерение коэффициента взаимной корреляции по сравнению с измерением амплитудных и фазовых характеристик дает возможность значительно проще определить тактико-технические возможности реальной системы.

9. Разработан метод улучшения параметров сверхширокополосного радара, который основан на компенсации искажений взаимной корреляционной функции путем применения согласованного фильтра

10. Разработаны плавные и ступенчатые фазовращатели, совмещенные с полосно-пропускающим фильтром.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Уменьшение высокочастотных сигналов ИМИ третьего порядка в рабочей полосе частот СВЧ усилителя на полевом транзисторе может быть достигнуто подачей на затвор транзистора с его стока низкочастотных сигналов ИМИ второго порядка, образующих низкочастотную отрицательную обратную связь по этим сигналам.

2. Уменьшение габаритов полосно-пропускающего фильтра достигается укорочением длин связанных четвертьволновых резонаторов путем последовательного соединения отрезков микрополосковых линий с высоким и

низким волновым сопротивлением, образующих резонаторы и подключением входа и выхода фильтра к крайним отрезкам с высоким волновым сопротивлением.

3. Уменьшение габаритов полосно-пропускающего фильтра с режекцией сигнала на заданных частотах может быть достигнуто применением четвертьволновых короткозамкнутых шпилечных микрополосковых линий в качестве резонаторов фильтра и подключением к крайним резонаторам режектирующих отрезков линий, настроенных на заданную частоту режекции.

4. Увеличение дальности обнаружения объекта радаром со сверхкороткими видеоимпульсами может быть достигнуто выделением полезных составляющих и подавлением шумов в спектре каждого отраженного от объекта видеоимпульса синхронным накопителем группового действия.

Практическая ценность работы.

Разработаны: методы снижения ИМИ в СВЧ усилителях; усилители мощности с увеличенным динамическим диапазоном для станций спутниковой связи С, КУ, КА диапазонов; топологии, методики их расчета и синтеза СВЧ микрополосковых фильтров; малогабаритные, сверхминиатюрные, сверхширокополосные фильтры, фильтры с увеличенным подавлением сигналов на заданных частотах; метод увеличения дальности сверхширокополосного радара; радар с улучшенными характеристиками; плавные фазовращатели, совмещенные с полосно-пропускающим фильтром.

Апробация результатов работы:

Результаты работы докладывались на следующих международных и российских конференциях: «Оптические, сотовые и спутниковые сети и системы связи» 26-28 июня 1996г., г. Пушкин (Санкт-Петербург), «Физика и техническое приложение волновых процессов» КГТУ им. А.Н. Туполева сентябрь 2007г., г. Казань, «Подповерхностная радиолокация и дистанционное обнаружение людей с помощью радиолокационных средств» 2007г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, "Подповерхностная радиолокация и дистанционное обнаружение людей с помощью

радиолокационных средств" 30.01. 2008г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, «Инженерная и рудная геофизика – 2008» 25 – 30 апреля 2008г., г. Геленджик.

Публикации. По материалам работы автором опубликовано 9 печатных работ, получен один патент РФ на полезную модель и одно положительное решение о выдаче патента на полезную модель.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа выполнена на 157 страницах текста, содержит 102 рисунка, 10 таблиц и список литературы из 88 наименований.

Содержание работы.

В первой главе рассмотрены три простых и экономичных способа уменьшения ИМИ в СВЧ усилителях:

- путем компенсации динамической ёмкости коллекторного перехода биполярного транзистора.
- путем введения в усилитель низкочастотной обратной связи.
- путём подключения на вход усилителя дополнительной нелинейной корректирующей цепи.

В отличие от известных из научной литературы методов компенсации предложенные отличаются простотой реализации, надежностью и большей экономичностью. В известных методах компенсации ИМИ с прямой и обратной связью по сигналам ИМИ третьего порядка часть выходного сигнала теряется в сумматоре и ответвителе на выходе усилителя.

1. Пути уменьшения нелинейных искажений в трактах сигнала.

Существенным источником искажений в СВЧ усилителях является динамическая емкость коллекторного перехода. В работе [1] на примере усилителя на биполярном транзисторе 2Т3101 было показано, что уменьшение влияния динамической емкости может быть достигнуто за счет создания резонансного

контура в цепи коллектора путем подключения добавочной индуктивности параллельно динамической емкости.

Экспериментальные измерения показывают, что при работе полевого транзистора в режиме близком к насыщению происходит смещение рабочей точки транзистора. Этот эффект связан детектированием части входного сигнала на нелинейности затвора и приводит к образованию дополнительного напряжения смещения [2]. Метод компенсации нелинейности путём стабилизации тока транзистора состоит в следующем.

Напряжение, пропорциональное току стока, снимается с токового резистора, усиливается и подается на затвор транзистора для стабилизации его рабочей точки. В результате при изменении выходной мощности ток стока остаётся постоянным, стабилизируется режим работы транзистора.

Эффективная работа транзистора в многосигнальном режиме возможна, если в усилитель ввести стабилизацию тока работающую в динамическом режиме – низкочастотную отрицательную обратную связь [2]. Принцип ее работы заключается в следующем. Образованный в СВЧ транзисторе ИМС второго порядка снимаются со стока и в противофазе подаётся на затвор. На нелинейности затвора ИМС второго порядка с входным сигналом образуют ИМС третьего и далее порядков, которые компенсируют ИМС, образованные входным сигналом. Зависимости уровней ИМС третьего порядка от выходной мощности в усилителе с низкочастотной отрицательной обратной связью на транзисторе MGF0905 приведены на рисунке 1.

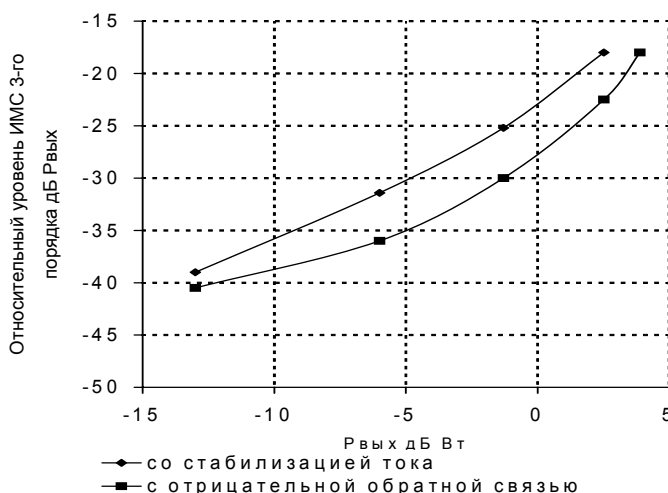


Рисунок 1 – Зависимости ИМС третьего порядка от выходной мощности в усилителях со стабилизацией тока и с низкочастотной отрицательной обратной связью.

Относительный уровень ИМС минус 28дБ для усилителя на транзисторе MGF0905 достигается при выходном сигнале 26дБмВт, а в усилителе со стабилизацией тока – при 29дБмВт.

При работе усилителя в двухсигнальном режиме возникает модуляция тока стока транзистора с частотой равной разности частот входных сигналов. Модуляция тока стока транзистора вызвана образованием ИМИ второго порядка на нелинейном затворе транзистора. Такой режим работы транзистора является опасным. (в 100-ваттном усилителе напряжение сигнала разностной частоты может достигать 10 и более вольт). Мгновенное значение напряжения на стоке транзистора может превысить допустимые нормы и вызвать его пробой. Для защиты выходных транзисторов от пробоя напряжением интермодуляционного сигнала второго порядка усилитель охвачен обратной связью. Работа обратной связи заключается в следующем. ИМС второго порядка снимаются со стоков транзисторов, детектируются и поступают на схему выделения максимального значения. Выделенное напряжение поступает на усилитель постоянного тока и далее на управление аттенюатором. При этом ограничивается выходная мощность усилителя, что предотвращает возникновение слишком большого уровня ИМС второго порядка. Разработан 100-ваттный усилитель с пониженным уровнем на 5...6 дБ ИМС третьего порядка и с обратной связью для защиты выходных транзисторов от пробоя при наличии ИМИ второго порядка, что повышает надежность работы усилителя в двухсигнальном режиме. Ниже, на рисунке 2 приведен внешний вид усилителя, на рисунке 3 график зависимости уровней ИМС третьего порядка от выходной мощности.

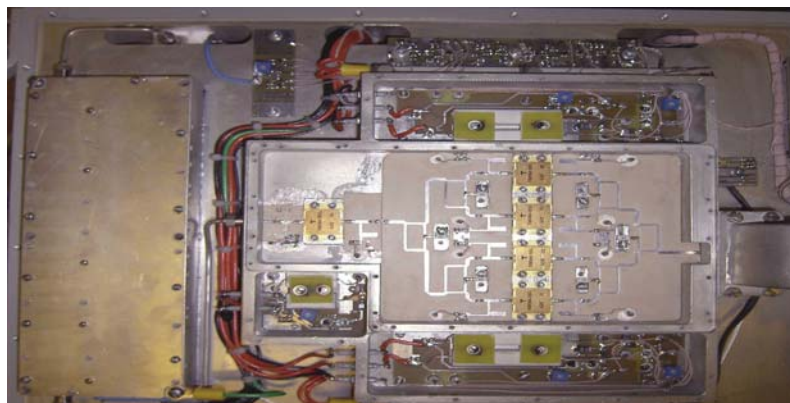


Рисунок 2 – Внешний вид 100-ваттного усилителя.

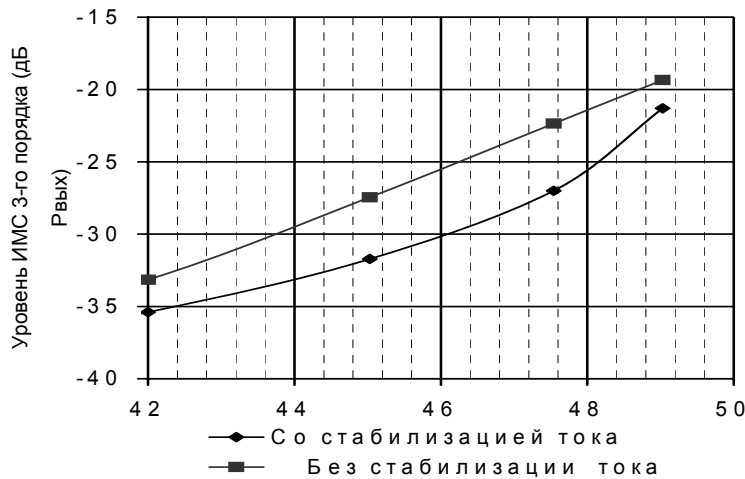


Рисунок 3 – График зависимости уровней ИМС третьего порядка от выходной мощности усилителя

При требуемом ИМИ -28 дБ для станций спутниковой связи усилитель обеспечивает выходную мощность 40...50 Вт.

2. Компенсирующий четырехполюсник.

Для компенсации нелинейных искажений, возникающих в СВЧ усилителе, рассмотрена возможность введения в усилитель дополнительного четырёхполюсника, выполняющего функцию обратного нелинейного преобразования сигнала. Автором предложен диодный преобразователь, реализующий эту функцию. Проводились экспериментальные измерения уровней ИМС двухкаскадного усилителя на транзисторах MGF0904, MGF0905, на входе которого включен диодный преобразователь. На рисунке 4 приводится зависимость уровня ИМС третьего порядка в двухкаскадном усилителе с диодным преобразователем.

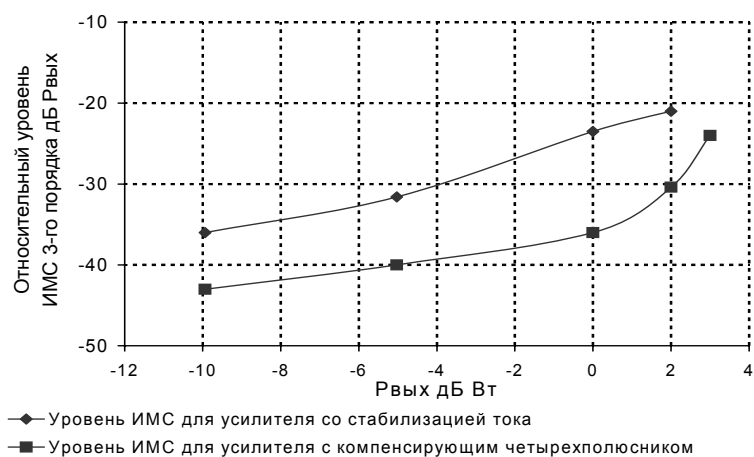


Рисунок 4 – Зависимости ИМИ третьего порядка в усилителях с диодным преобразователем и со стабилизацией тока.

3. Выводы.

В первой главе показано, что введение индуктивности в усилитель на биполярном транзисторе приводит к уменьшению нелинейного выходного сопротивления усилительного каскада на порядок, на 9 дБ уменьшается уровень ИМС третьего порядка. Разработаны три метода увеличения динамического диапазона и уменьшения ИМИ в СВЧ усилителях на полевых транзисторах: путём стабилизации тока транзистора, введением низкочастотной отрицательной обратной связи и подключением на вход усилителя устройства с обратным нелинейным преобразованием сигнала. При этом достигается уменьшение уровня ИМС на $5 \div 15$ дБ. Разработан 100-ваттный усилитель с пониженными ИМИ и защитой выходных транзисторов от пробоя.

Во второй главе разработаны новые топологии, методики расчета и синтеза фильтров: дециметрового диапазона на четвертьволновых короткозамкнутых шпилечных резонаторах и полусосредоточенных элементах с емкостными и индуктивными связями, сантиметрового диапазона, со специальными параметрами. Топологии фильтров дециметрового диапазона представлены на рисунках 5 ÷ 7.

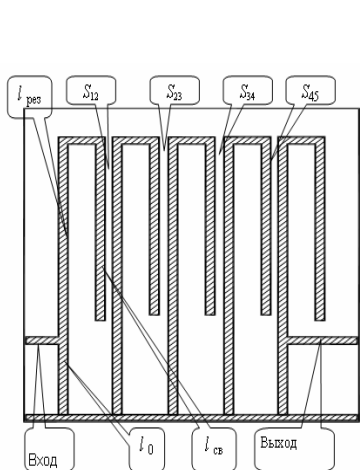


Рисунок 5 – Топология фильтра на короткозамкнутых шпилечных резонаторах.

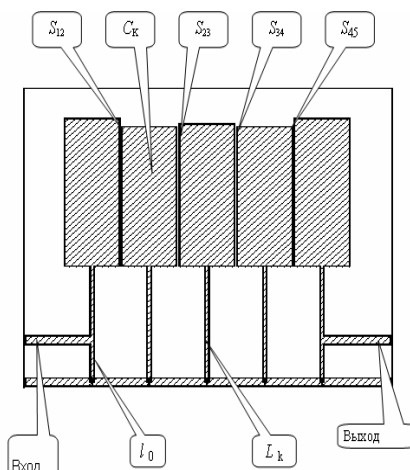


Рисунок 6 – Топология фильтра на полусосредоточенных элементах с емкостными связями.

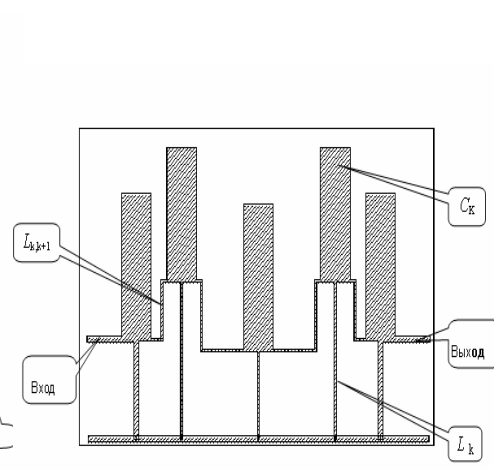


Рисунок 7 – Топология фильтра на полусосредоточенных элементах с индуктивными связями.

1. Фильтры на четвертьволновых короткозамкнутых шпилечных резонаторах и автотрансформаторным включением нагрузки.

Фильтр состоит из n резонаторов, образованных отрезками микрополосковых линий (рисунок 5). Длина каждого резонатора фильтра равна четверти длины волны

на средней частоте полосы пропускания. Один конец резонатора замкнут на землю, а другой – разомкнут.

2. Фильтры на полусосредоточенных элементах с емкостными связями и частичным включением нагрузки в контур.

Фильтр имеет n контуров (рисунок 6), состоящих из индуктивностей, образованных отрезками микрополосковых линий с высоким волновым сопротивлением, и емкостей на отрезках с низким волновым сопротивлением. Один конец индуктивности короткозамкнут, а другой соединен с емкостью.

3. Фильтры на полусосредоточенных элементах с индуктивными связями и частичным включением нагрузки в контур.

Конструктивно фильтр выполнен в виде n контуров (рисунок 7), состоящих из индуктивностей, образованных отрезками микрополосковых линий с высоким волновым сопротивлением, и емкостей на отрезках с низким волновым сопротивлением. Один конец индуктивности замкнут на землю, а другой соединен с емкостью. Связь между контурами осуществляется за счет включения между контурами последовательных индуктивностей.

Для синтеза топологий фильтров вычисляются размеры элементов фильтров по формулам, созданным автором на основе предложенных моделей с использованием экспериментальных результатов [3, 4].

4. Фильтры сантиметрового диапазона.

а) Фильтр со связями $\lambda/4$.

Топология фильтра приведена на рисунке 8. Формулы для приближенного расчета размеров элементов фильтра получены: 1 – путем перехода от схемы со встречно-направленными короткозамкнутыми трансформирующими крайними стержнями к схеме с автотрансформаторной связью, 2 – путем замены короткого замыкания на землю отрезком разомкнутой на конце микрополосковой линии. Зазоры связи между соседними резонаторами находятся из экспериментального графика.

б) Фильтр со связями $\lambda/2$.

Топология фильтра приведена на рисунке 9. Формулы для расчета фильтра со связями $\lambda/2$ аналогичны формулам для фильтра со связями $\lambda/4$. Отличие методики (так как длина области связи $\lambda/2$) заключается в расчете нормированной погонной емкости связи, которая находится из экспериментального графика.

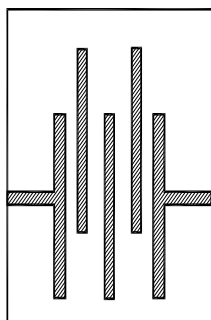


Рисунок 8 – Топологии фильтра со связями $\lambda/4$.

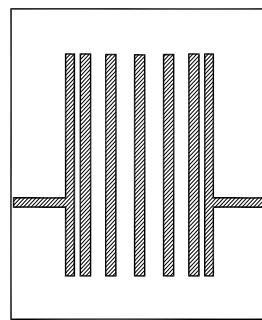


Рисунок 9 – Топологии фильтра со связями $\lambda/2$.

5. Сверхминиатюрные фильтры.

При разработке современных сверхминиатюрных радиотехнических систем предъявляются высокие требования к миниатюризации отдельных СВЧ узлов и блоков. Автором разработаны топологии, методики их расчета и приведены экспериментальные характеристики сверхминиатюрных микрополосковых фильтров [5]. Разработанные автором сверхминиатюрные фильтры отличаются от известных из научных работ аналогов меньшими габаритами (в 1,5...2 раза), а методики их расчета простотой и высокой точностью.

а) Фильтр на резонансных отрезках.

Резонаторы фильтра длиной $\lambda/4$ с одной стороны – замкнуты на землю, с другой – разомкнуты. Топология фильтра оптимальна с точки зрения использования в полной мере площади подложки. С этой целью резонаторы выполняются в виде спирали или меандра с высоким волновым сопротивлением. Включение генератора и нагрузки в фильтр осуществляется через автотрансформаторную связь, чтобы исключить трансформаторы на входе и выходе фильтра. Топология фильтра приведена на рисунке 10.

б) Фильтр на полусосредоточенных элементах.

Резонаторы фильтра состоят из индуктивностей, образованных отрезками микрополосковых линий с высоким волновым сопротивлением и емкостей на отрезках линий с низким волновым сопротивлением. Соседние резонаторы расположены встречнопараллельно относительно друг друга. Топология фильтра приведена на рисунке 11.

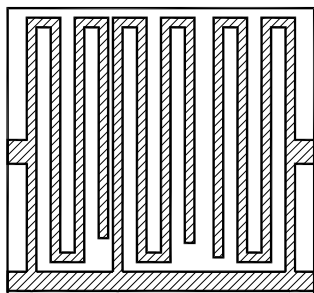


Рисунок 10 – Топология сверхминиатюрного фильтра на четвертьволновых резонаторах.

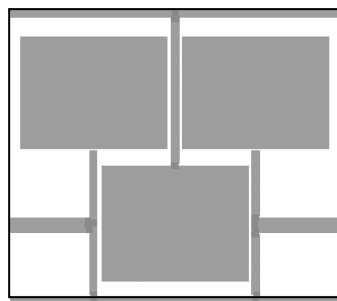


Рисунок 11 – Топология сверхминиатюрного фильтра на полусосредоточенных элементах.

В отличие от предыдущей конструкции фильтр имеет малые потери в полосе пропускания (0,5 дБ по сравнению с 2,5 дБ) и не имеет паразитной полосы пропускания третьей гармоники.

6. Фильтры со специальными параметрами.

Для некоторых малогабаритных радиотехнических систем применение фильтров со специальными параметрами может дать существенный выигрыш в габаритах СВЧ трактов. С этой целью автором разработаны: фильтры с режекцией сигналов на заданных частотах [6], которые могут применяться для подавления сигналов гетеродинов и побочных сигналов приема; сверхширокополосные фильтры (одна–четыре октавы) для сверхширокополосных радиотехнических систем [7]. По сравнению с известными аналогами (патенты научные статьи) разработанные фильтры имеют меньшие габариты (в 1,5...2 раза).

а) Фильтр с режекцией отдельных частот.

Для реализации фильтра с увеличенным подавлением сигналов на заданных частотах эквивалентная схема фильтра должна содержать, хотя бы, один режектор. В качестве режекторов используются отрезки микрополосковых линий, подключенных к первому и последнему резонаторам, длиной от точки подключения до свободного конца резонатора. Для уменьшения габаритов в фильтре

используются шпилечные резонаторы. На рисунке 12 приведена топология и АЧХ фильтра.

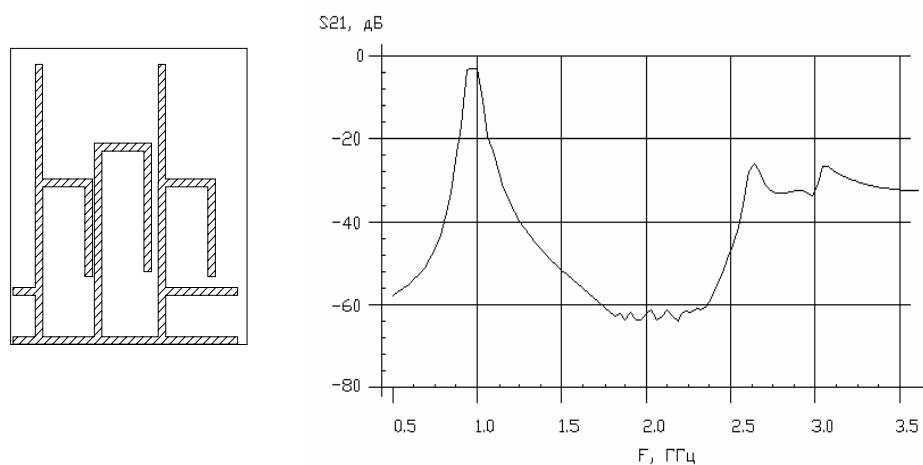


Рисунок 12 – Топология и АЧХ фильтра на четвертьволновых шпилечных резонаторах с режекцией второй и третьей гармоник.

б) Сверхширокополосные фильтры.

Фильтры с большими полосами пропускания могут быть реализованы на широкополосных резонансных элементах. В качестве широкополосных элементов применяются трансформаторы сопротивлений, делители мощности и ответвители. При каскадном соединении таких элементов автором разработаны сверхширокополосные фильтры с полосой пропускания 1...4 октавы.

7. Выводы.

Во второй главе представлены результаты разработки топологий, методик синтеза и расчета малогабаритных микрополосковых фильтров: на четвертьволновых короткозамкнутых шпилечных резонаторах, на полусосредоточенных элементах с емкостными и индуктивными связями, на полуволновых резонаторах с длиной связи $\lambda/4$, на полуволновых резонаторах с длиной связи $\lambda/2$, со специальными параметрами.

В третьей главе рассматриваются вопросы о физическом смысле корреляционных характеристик, преимуществах и недостатках их применения для анализа цепей, требованиях к СВЧ трактам системы с корреляционной обработкой сигналов, разработке методов измерения корреляционных характеристик СВЧ

устройств, а также об исследовании возможности и методов компенсации искажений сигналов на основе анализа коэффициента взаимной корреляции входного и выходного сигналов СВЧ устройства.

1. Влияние искажений сигналов в приемо-передающих трактах на тактико-технические параметры системы.

СВЧ тракты приемных и передающих каналов должны выполнять определенные функции (модуляцию, демодуляцию, преобразование на другую частоту, фильтрацию, изменение амплитуды и фазы сигнала и т. д.), необходимые для нормальной работы всего устройства в целом. Кроме необходимых изменений параметров сигналов реальные СВЧ устройства вносят паразитные изменения, связанные с неидеальностью их работы. В диссертации для характеристики устройства используется коэффициент взаимной корреляции. Показано, что если устройство «А» характеризуется коэффициентом взаимной корреляции входного и выходного сигналов, то отношение сигнал-шум на его выходе уменьшится пропорционально квадрату коэффициента взаимной корреляции [9].

2. Установка для измерений коэффициента взаимной корреляции сигналов передающего и приемного тракта планетного радара.

При разработке радара для поверхностного и подповерхностного зондирования спутника Марса – Фобоса возникает вопрос об измерении тактико-технических параметров радара. Для более точных представлений о структуре подповерхностных слоев коэффициент шума приемного канала должен быть весьма низким. Амплитудные и фазовые характеристики приемного и передающего каналов не дают возможности достаточно просто оценить влияние каналов на отношение сигнал-шум на выходе. С этой целью автором разработан метод измерения коэффициента взаимной корреляции входного и выходного сигналов, основанный на сравнении сигнала, проходящего через приемопередающий тракт радара, включая антенны с сигналом, проходящим через согласованный фильтр. Коэффициент взаимной корреляции K_{xy} и автокорреляционная функция R_{xx} приемопередающего тракта бортового радара показаны на рисунке 13.

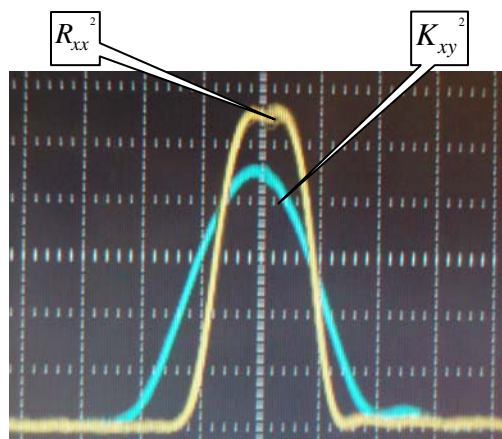


Рисунок 13– Коэффициент взаимной корреляции и автокорреляционная функция приемопередающего тракта бортового радара.

Квадрат коэффициента взаимной корреляции при $t = 0$ составляет 0,82, что уменьшает отношение сигнал-шум на выходе приемного канала на 0,86 дБ. Разработанный метод измерения коэффициента взаимной корреляции дает возможность определить адекватные требования на параметры приемопередающего тракта.

3. Улучшение параметров сверхширокополосного радара путем применения оптимального фильтра.

В трактах передачи и приема сверхширокополосного радара возникают искажения видеоимпульса, видеоимпульс приобретает осциллирующий вид, что сильно ухудшает технические характеристики радара. Осциллирующий характер видеоимпульса получается за счет искажения АЧХ в приемной и передающей антенне. Если рассматривать искаженный видеоимпульс, полученный на выходе приёмника, как пачку положительных и отрицательных импульсов, то возможно применение согласованного фильтра для пачки импульсов, что приводит к улучшению тактико-технических параметров радара. В радаре «Герад-5» в качестве согласованного фильтра применен синхронный накопитель группового действия.

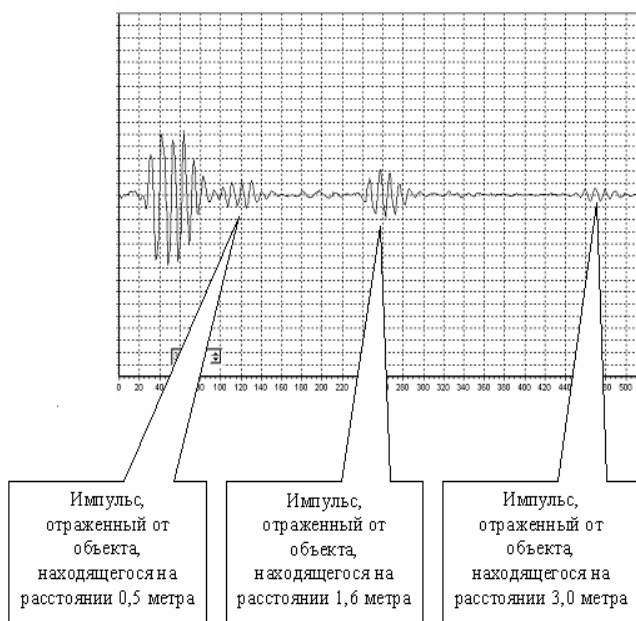


Рисунок 14 – Импульсы на выходе приемника.

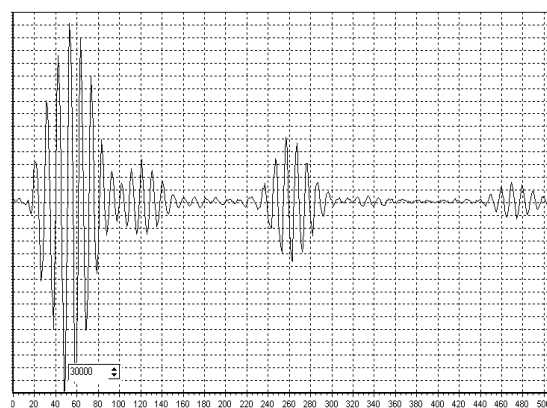


Рисунок 15 – Импульсы на выходе синхронного накопителя.

Вид видеоимпульса на выходе приемника приведен на рисунке 14, а на рисунке 15 – импульсы на выходе синхронного накопителя [10]. Применение синхронного накопителя в радаре «Герад-5» позволяет уменьшить габариты антенн по сравнению с радаром «Герад-3» в 1,5...2 раза при сохранении дальности обнаружения объекта.

4. Выводы.

В третьей главе показано, что отношение сигнал-шум на выходе оптимального фильтра уменьшится пропорционально квадрату коэффициента взаимной корреляции. Измерение коэффициента корреляции дает возможность точно определить тактико-технические возможности реальной системы. Автором разработан метод измерения искажений коэффициента взаимной корреляции приемопередающего тракта, включая антенны бортового радара, применяемого для локации спутника Марса – Фобоса. Автором разработан метод улучшения параметров сверхширокополосного радара, который основан на применении согласованного фильтра для каждого отраженного видеоимпульса.

В четвертой главе решаются вопросы уменьшения габаритов фазовращателей путем уменьшения габаритов квадратурного моста, совмещения фазовращателя с другими элементами приемопередающего модуля.

1. Совмещение двух разрядов фазовращателя на одном квадратурном мосте.

Для уменьшения габаритов фазовращателя (в 1,5 – 2 раза) совмещены два разряда фазовращателя на одном квадратурном мосте. Принципиальная схема двухразрядного фазовращателя показана на рисунке 16.

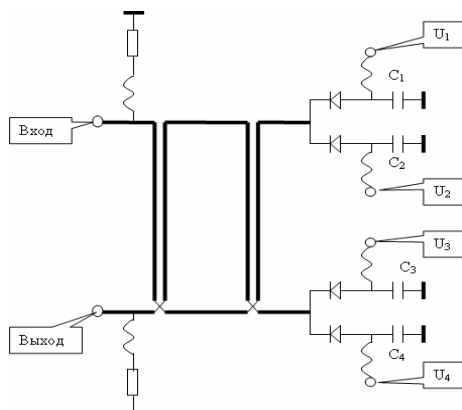


Рисунок 16 – Принципиальная схема двухразрядного фазовращателя.

2. Известно, что при перестройке полосно-пропускающего фильтра по частоте происходит изменение фазы. На этой основе построен фазовращатель, совмещенный с фильтром. В результате уменьшены габариты фазовращателя и фильтра в блоке адаптивной диаграммо образующей системы (АДОС) ~ в 1,5 раза. Фотографии экспериментальных образцов фазовращателей, совмещенных с полосно-пропускающими фильтрами, показаны на рисунке 17.

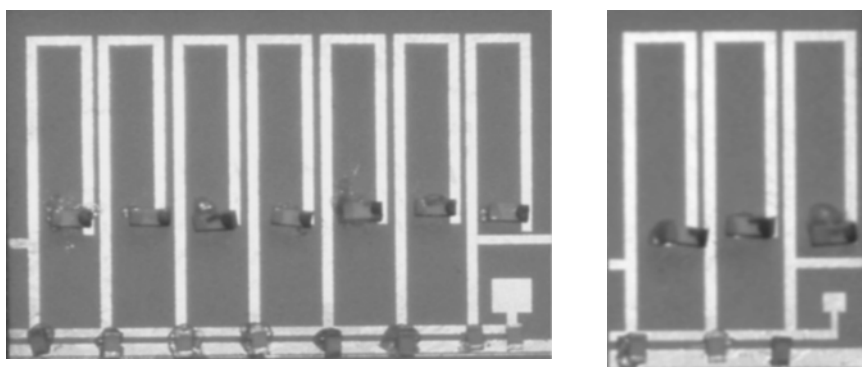


Рисунок 17 – Фотографии фазовращателей.
1 – Фазовращатель на 180° на основе семизвенного фильтра.
2 – Фазовращатель на 45° на основе трехзвенного фильтра.

Заключение

В результате проведенной работы были получены следующие основные результаты:

1. Разработаны новые способы уменьшения ИМИ в мощных СВЧ усилителях.
2. Разработан метод защиты выходных транзисторов усилителя при перегрузке входным сигналом, основанный на ограничении выходного сигнала в зависимости от уровня ИМС второго порядка на выходе усилителя при работе его в двухсигнальном режиме.
3. Созданы новые топологии, методики расчета и синтеза малогабаритных микрополосковых фильтров и фильтров со специальными параметрами (с полосой 1...4 октавы, с режекцией второй и третьей гармоник).
4. Предложен метод улучшения параметров сверхширокополосного радара путем применения согласованного фильтра на основе дискретной линии задержки.
5. Предложен метод оценки искажений коэффициента взаимной корреляции, который применен в радаре поверхностного и подповерхностного зондирования спутника Марса – Фобоса и в станции пассивной локации.
6. Разработаны методы уменьшения габаритов фазовращателя путем уменьшения габаритов квадратурного моста и совмещения функции изменения фазы сигнала с фильтрацией сигнала.

С использованием разработанных методик были созданы:

- усилители мощности с пониженными ИМИ С – диапазона на выходную мощность от 8 до 100 Вт, КУ – диапазона – на выходную мощность 4 и 8 Вт, КА – диапазона – на выходную мощность 2 Вт;
- малогабаритные микрополосковые фильтры дециметрового диапазона, габариты которых меньше (более чем в два раза) по сравнению с известными аналогами;
- микрополосковые фильтры с режекцией второй и третьей гармоник;
- сверхширокополосные фильтры с полосой пропускания 1...4 октавы;
- радар подповерхностного зондирования земли с улучшенными тактико-техническими характеристиками;
- фазовращатель для макетного образца модуля АФАР L – диапазона;

- фазовращатель, совмещенный с полосно-пропускающим фильтром для блока АДОС.

Публикации по теме диссертации

1. И.Н. Дутышев, В.И. Левитин, К.И. Рабинович Транзисторный СВЧ усилитель с малым уровнем нелинейных искажений. Электронная техника, Серия «Электроника СВЧ», выпуск 5 (389), 1986.
2. И.Н. Дутышев. 100-Ваттный усилитель мощности с уменьшенным уровнем интермодуляционных искажений и защитой выходных транзисторов от пробоя при работе в двухсигнальном режиме. Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника, выпуск 4 (492), 2007.
3. И.Н. Дутышев. Проектирование и расчет фильтров на четвертьволновых короткозамкнутых шпилечных резонаторах. Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника, выпуск 5 (493), 2007.
4. И.Н. Дутышев, В.И. Левитин Полосовые фильтры дециметрового диапазона на гибридных интегральных микросхемах. Электронная техника, Серия «Электроника СВЧ», выпуск 2 (326), 1981.
5. И.Н. Дутышев. Сверхминиатюрные СВЧ фильтры. Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника, выпуск 2 (496), 2008.
6. И.Н. Дутышев. СВЧ фильтр с режекцией отдельных частот Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника, выпуск 2 (496), 2008.
7. И.Н. Дутышев. Сверхширокополосные фильтры. СВЧ Электронная техника, серия 1, СВЧ-техника, выпуск 2 (496), 2008.
8. В.И. Левитин, К.И. Рабинович, И.Н. Дутышев и др. Приемо-передающая аппаратура для наземных станций спутниковой связи. Сборник тезисов VII Научно-технической конференции, «Оптические, сотовые и спутниковые сети и системы связи», г. Пушкин (Санкт-Петербург), 26-28 июня 1996.
9. И.Н. Дутышев. Оптимальный способ определения качества канала связи на основе измерения коэффициента взаимной корреляции входного и выходного

сигналов. Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», Казань 2007 г. стр. 316-317.

10. Дутышев И.Н., Бажанов А.С., Дутышев В.И., Кричевский В.И., Местэртон А.П. «Радиолокатор подповерхностного зондирования», патент на полезную модель от 26. 02. 2008, № 2008107454(008081).
11. Дутышев И.Н. Микрополосковый сверхвысокочастотный полосно-пропускающий фильтр, положительное решение о выдаче патента на полезную модель от 16.06.2008, № 2008124372/22(029560).