

**На правах рукописи**



**Петров Сергей Александрович**

**«СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ ОГРАНИЧЕНИЯ  
РЕАЛЬНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА МАЛОГАБАРИТНЫХ  
ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ»**

Специальность: 2.2.2 – *Электронная компонентная база микро- и  
наноэлектроники, квантовых устройств.*

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в акционерном обществе «НПК «ТРИСТАН»

Научный руководитель	доктор технических наук зам. нач. НПК по научной работе АО «НПП «Исток» г. Фрязино Куприянов Павел Васильевич
Официальные оппоненты	доктор технических наук Щитов Аркадий Максимович зам. нач. отдела НФ АО НПФ «Техноякс» г. Москва  кандидат технических наук Дутышев Иван Николаевич нач. отдела ФГУП СКБ ИРЭ РАН г. Фрязино
Ведущая организация	АО «НИИ «Вектор» г. Санкт-Петербург

Защита состоится «9» декабря 2021 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета 74.1.008.01 на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина» по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, Вокзальная, д. 2а Большой конференц-зал.

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

Автореферат разослан «15» октября 2021 г.

Учетный секретарь  
диссертационного совета



И. В. Куликова

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы

Техника широкополосного приема на СВЧ имеет давнюю историю, насчитывающую уже более семидесяти лет. Главным драйвером развития этой области радиоэлектроники является необходимость улучшения тактико-технических характеристик систем и комплексов радиотехнического мониторинга и пассивной радиолокации. Их основное предназначение – обнаружение источников как импульсного, так и непрерывного излучения в СВЧ-диапазоне, идентификация и определение местоположения. Основным достоинством указанных систем, по отношению к активным радиолокаторам, является отсутствие собственного излучения. Это же обстоятельство является первопричиной многих технических проблем, возникающих при создании пассивных радиотехнических комплексов на СВЧ.

Принципиальной проблемой пассивной радиолокации является неопределенность основных параметров принимаемых сигналов: частоты, времени и направления прихода, типа и параметров модуляции и т. п. Положение усугубляется постоянным ростом требований к точности и быстродействию пассивных систем, что неизбежно выводит на первый план проблему достоверности факта обнаружения полезного сигнала. Способность радиоприемника принимать полезную информацию на фоне помех во многом определяется параметрами его приемного тракта и, в частности, динамическим диапазоном входных сигналов. Отсюда возникает необходимость совершенствования основных составных частей пассивной радиолокации, в том числе широкополосных приемных устройств (ШПУ) СВЧ.

В работе рассматриваются три элемента современных ШПУ СВЧ – входные линейные тракты (ВЛТ), широкополосные инфрадинные преобразователи (ШИП) и выходные тракты – формирователи сигнала. Критерием технического уровня всех приемо-преобразовательных трактов ШПУ СВЧ принят реальный динамический диапазон (РДД). В работе исследуются различные аспекты расширения РДД малогабаритных ШПУ СВЧ инфрадинного типа.

Таким образом тема настоящей диссертационной работы, посвященная повышению технических характеристик ШПУ СВЧ, является актуальной.

## Цель работы

Целью диссертационной работы является расширение реального динамического диапазона малогабаритных широкополосных приемных устройств СВЧ

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

1. Выработка и практическая реализация схмотехнического решения входного линейного тракта (ВЛТ) ШПУ СВЧ, позволяющего увеличить верхнюю границу линейности амплитудной характеристики (ВГЛАХ) при незначительном ухудшении чувствительности.

2. Исследование возможности уменьшения уровня побочных каналов приема (ПКП) и собственных паразитных составляющих спектра (СПС), неравномерности и нестабильности АЧХ малогабаритных широкополосных инфрадинных преобразователей СВЧ.

3. Анализ возможности расширения ДД ШПУ СВЧ по критерию подавления интермодуляционных искажений 3-го порядка, основанного на линеаризации р-і-п диодного ограничителя мощности выходного тракта, нагруженного на АЦП.

### **Методы исследования**

При решении поставленных задач использовались методы математического и компьютерного, в том числе трехмерного и нелинейного моделирования СВЧ устройств, численные методы расчета и анализа, методы теории цепей СВЧ и экспериментальные исследования макетов функциональных узлов и модулей ШПУ СВЧ. Экспериментальные исследования проводились на изготовленных макетах с помощью сертифицированного и аттестованного измерительного и технологического оборудования.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Представлен новый схемотехнический подход реализации ВЛТ, позволяющий расширить ДД ШПУ СВЧ

2. Разработан системотехнический подход к созданию малогабаритных широкополосных инфрадинных преобразователей СВЧ с расширенным ДД с применением цифровой автоматической схемы питания и управления

3. Предложена методика проектирования линеаризованных выходных трактов ШПУ СВЧ, позволяющих увеличить верхнюю границу ДД в многосигнальном режиме.

### **Практическая значимость**

На основе предложенного схемотехнического решения разработан ряд модулей ВЛТ с расширенным ДД и рабочим диапазоном частот от 200 МГц до 18 ГГц. Налажено серийное изготовление модулей, вошедших в состав поставочных образцов ШПУ СВЧ. Результаты измерений более 500 приборов показали, что предложенная конструкция обеспечила низкую неравномерность АЧХ и высокую повторяемость электрических параметров при серийном выпуске.

Налажено промышленное производство ШИП СВЧ с автоматической схемой питания и управления. Все выпущенные приборы имеют улучшенные показатели неравномерности и нестабильности АЧХ, подавления ПКП и СПС, что обеспечило высокие тактико-технические характеристики аппаратуры назначения – мобильного комплекса пассивной радиолокации.

Выработан подход к практическому применению в выходных трактах ШПУ СВЧ, нагруженных на АЦП, р-і-п-диодной структуры, обеспечивающей

повышенную линейность передаточной характеристики выходных трактов ШПУ СВЧ для улучшения многосигнального режима работы.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Расширение динамического диапазона широкополосных приемных устройств СВЧ более чем на 10 дБ обеспечивается оригинальной схемой входных линейных трактов за счет отключения избыточного усиления.

2. Автоматическая регулировка параметров питания и управления элементов широкополосного инфрадинного преобразователя СВЧ по предустановленному алгоритму дает возможность расширения реального ДД на 5–10 дБ за счет уменьшения уровней побочных каналов приема и собственных паразитных составляющих, а также неравномерности и нестабильности амплитудно-частотной характеристики.

3. Линеаризация амплитудной характеристики ограничителя мощности выходного тракта широкополосного приемного устройства СВЧ, нагруженного на АЦП, за счет выбора оптимальной толщины базового  $i$ -слоя  $p$ - $i$ - $n$  диода ведет к расширению ДД по критерию интермодуляционных искажений 3-го порядка на 10 дБ.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием известного и апробированного математического аппарата, современных пакетов САПР (HFSS, AWR, CST Studio, Altium Designer). Точность расчетов при проектировании и моделировании подтверждаются результатами макетирования и экспериментальных исследований, полученных с использованием поверенных средств измерений.

### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на ряде международных и всероссийских конференций:

- 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Россия, Севастополь, 2019 г.

- VII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2018 г.

- Научно-техническая конференция АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ электроника-2018.75 лет развития», Фрязино, 2018 г.

- VI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2017 г.

- VI Всероссийская научно-техническая конференция по обмену опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем «СВЧ-2016», Омск, 2016 г.

- IX Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 2013 г.

- Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов  
ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино, 2010 г.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликованы: 1 статья в журналах индексируемых в международных базах данных, 6 статей в журналах включенных в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ (1 без соавторов). 9 работ в трудах Международных и Всероссийских конференций, получено 4 патента на изобретения.

### **Личный вклад автора**

Статья 4 входящая в перечень ВАК написана автором лично.

Личный вклад соискателя в опубликованных в соавторстве работах состоит:

1. В постановке задачи и интерпретации результатов исследования моделирования многосигнального режима работы p-i-n-диодных ограничительных устройств выходного тракта ШПУ СВЧ [1, 2, 5]
2. В проведении практических исследований схмотехнических и параметрических способов линеаризации выходного тракта ШПУ СВЧ [5]
3. В проектировании и конструировании входных линейных модулей ШПУ СВЧ [3, 4]
4. В идее введения выходного управляемого аттенюатора в схему усилителя с отключаемыми каскадами усиления [4].
5. В разработке субмодулей приемного и передающего тракта, а также расчетах структурных схем приемо-передающего модуля 8-мм диапазона длин волн [6].
6. В подготовке и проведении экспериментальных исследований модуля ШИП СВЧ, построенного по схеме с возвратным гетеродинамированием [7]

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты диссертационной работы использованы при разработке ШПУ СВЧ в АО «НПК «ТРИСТАН».

На основе предложенных конструкторских и схмотехнических решений разработан целый ряд широкополосных приемных устройств СВЧ, усилительных, коммутационных и преобразовательных модулей с рабочим диапазоном частот от 200 МГц до 40 ГГц. Потребителю было поставлено более 500 приборов. Модули продемонстрировали высокие электрические характеристики, надежность и повторяемость параметров, что обеспечило соответствие требованиям назначения аппаратуры мобильного комплекса пассивной радиолокации «Автобаза-М».

## Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка использованных источников; содержит 52 рисунков, библиографический список из 116 наименований – всего 130 страниц.

## Краткое содержание работы

Во введении проведен анализ состояния ШПУ СВЧ в настоящее время, определены основные требования к ШПУ в современных комплексах пассивной радиолокации, обоснована актуальность темы исследования. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы. Приведены научные положения, выносимые на защиту, отмечены практическая значимость и новизна работы. Представлены сведения о публикациях, личном вкладе автора в совместных работах, структуре и объеме диссертации.

В первой главе сформулированы требования к современным ШПУ СВЧ. Устройства данного типа должны обладать комплексом общих и специфических требований, определяемых областью применения. Широкий диапазон рабочих частот и полоса пропускания, чувствительность и динамический диапазон являются требованиями, предъявляемыми большинству приемных устройств и в том числе ШПУ СВЧ. При растущей функциональной сложности аппаратуры назначения на приемное устройство СВЧ накладываются дополнительные требования к идентичности, повторяемости и стабильности электрических характеристик.

Важную роль для достоверного анализа сложной электромагнитной обстановки в реальных условиях применения играет РДД, в пределах которого отклик на выходе приемного устройства однозначно говорит о наличии на входе соответствующего полезного сигнала. Достоверность факта приема полезного сигнала особенно существенна в пассивной радиолокации, характеризующейся априорной неопределенностью параметров последнего.

В первой главе проанализирована структура ШПУ СВЧ (рис.1), рассмотрены схемотехническое построение и функционирование элементов, проанализированы критерии и факторы ограничения нижней и верхней границ РДД ШПУ СВЧ и сформулированы задачи для входного тракта, ШИП СВЧ и выходного тракта.



Рис. 1 Упрощенная схема ШПУ СВЧ

Параметры **входного линейного тракта** в значительной степени определяют как нижнюю, так и верхнюю границу ДД ШПУ СВЧ.

Коэффициент шума приемника в общем случае, с учетом последующих за ВЛТ трактов, определяется формулой Фрииса, представленной в усеченном виде:

$$F_{\text{ШПУ}} = F_{\text{ВЛТ}} + (F_{\text{ШИП}} - 1)/G_{\text{ВЛТ}} \quad (1)$$

где  $F_{\text{ВЛТ}}$  – коэффициент шума ВЛТ, ед.;  $F_{\text{ШИП}}$  – коэффициент шума ШИП СВЧ, ед.;  $G_{\text{ВЛТ}}$  – коэффициент передачи ВЛТ, ед.

Так как верхняя граница ДД  $P_{1dB}$  линейно зависит от  $G_{\text{ВЛТ}}$ , расширение РДД ШПУ СВЧ теоретически возможно при уменьшении коэффициента передачи ВЛТ.

Общий коэффициент шума приемника может несколько возрасть, но в соответствии с выражением (1) это должно быть медленнее роста верхней границы ДД. Сказанное иллюстрирует изображенный на рис. 2 график зависимостей параметров приемника от  $G_{\text{ВЛТ}}$ .

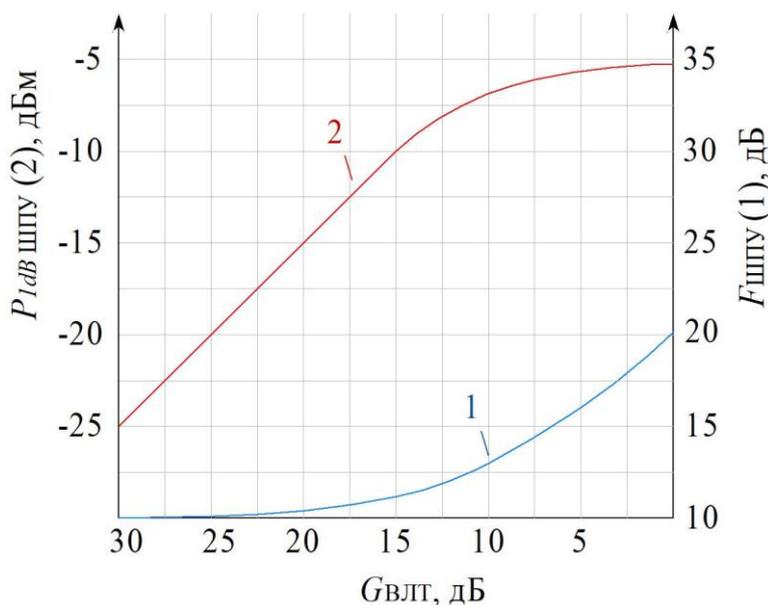


Рис. 2 Зависимость  $F_{\text{ШПУ}}$  (1) и  $P_{1dB\text{ ШПУ}}$  (2) от  $G_{\text{ВЛТ}}$  при  $F_{\text{ВЛТ}} = 10\text{ дБ}$  и  $F_{\text{ШИП}} = 20\text{ дБ}$ , где  $P_{1dB\text{ ШПУ}}$  – точка однодецибельной компрессии ШПУ СВЧ по входу

Из рис. 2 видно, что при небольших значениях уменьшения коэффициента передачи ВЛТ есть возможность расширения ДД ШПУ СВЧ за счет пропорционального увеличения ВГЛАХ по входу при незначительном ухудшении чувствительности.

Задачей исследования в части ВЛТ является разработка и реализация схемотехнического построения, позволяющего за счет исключения избыточного усиления расширить РДД ШПУ СВЧ.

От параметров ШИП СВЧ в большой степени зависят электрические характеристики всего ШПУ. Главная задача ШИП СВЧ перенос спектра входного сигнала в диапазон промежуточных частот для его дальнейшей обработки аппаратурой анализа.

Схема приемного тракта (рис. 3) типичного модуля ШИП СВЧ включает в себя входную цепь ( $f_{\text{вх}}$ ), два преобразователя, гетеродинные тракты ( $f_{\text{Гет1}}, f_{\text{Гет2}}$ ), тракт первой промежуточной частоты (ПЧ1) и выходной тракт ( $f_{\text{вых}}$ ).

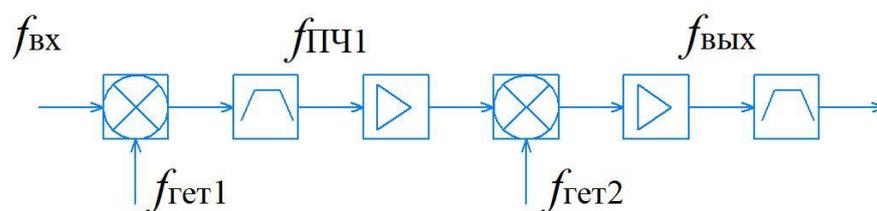


Рис. 3 Упрощенная структурная схема ШИП СВЧ

Несмотря на различия в конструкторских, технологических и схемотехнических решениях можно определить современный уровень требований к широкополосным преобразовательным устройствам. Это малогабаритные модули, которые имеют диапазон входных частот от 2 до 18 ГГц, полосу пропускания не менее 500 МГц, низкий разброс коэффициента передачи по всему диапазону рабочих частот не более 6–7 дБ, подавление ПКП и СПС не менее 60 дБ. ШИП СВЧ во всем диапазоне рабочих температур и под воздействием различных внешних воздействующих факторов должен обладать широким, не менее 50 дБ ДД.

Техническая сложность при создании такого устройства состоит в том, что оно имеет два преобразования, первое из которых реализует инфрадинный перенос вверх по оси частот в широком диапазоне частот входных сигналов. На практике это приводит к появлению проблем, связанных с возникновением ПКП и СПС, неравномерностью и нестабильностью АЧХ. По сути, эти факторы определяют границы расширения ДД ШИП СВЧ.

Неравномерность и нестабильность АЧХ, наличие ПКП и СПС уменьшают ДД ШИП СВЧ. Для настройки соответствующих характеристик в производственный цикл ШИП СВЧ включают комплексную регулировку. Однако даже с использованием устройств программируемой регулировки напряжения этот процесс был непредсказуемо длительным, итерационным и требующим высочайшей квалификации персонала.

Задачей является исследование возможности устранения вышеперечисленных факторов ограничения ДД малогабаритных широкополосных инфрадинных преобразователей СВЧ за счет применения нового принципа питания и управления.

Функциональным узлом формирования сигнала для последующей цифровой обработкой, является **выходной тракт ШПУ СВЧ**. Именно его технические характеристики в большей степени определяют верхнюю границу ДД в многосигнальном режиме работы.

Выходные каскады приемного тракта современных ШПУ СВЧ нагружаются, как правило, на высокоскоростные АЦП, находящиеся на входе аппаратуры цифровой обработки сигнала. АЦП представляют собой сложные, высокотехнологичные и крайне чувствительные к формату входного сигнала устройства. Так, например, превышение мощности входного сигнала, соответствующего верхнему разряду АЦП всего на 3–6 дБ, ведет к необратимым последствиям – устройство выгорает.

Решение проблемы с первого взгляда очевидно лежит в плоскости ограничения сигнала выходного аналогового тракта ШПУ СВЧ. В

односигнальном приближении это действительно простое и эффективное решение, позволяющее с помощью пассивного ограничителя, с требуемым уровнем  $P_{1dB}$  сигнала не допустить выхода из строя АЦП. При этом обычно точку однодецибельной компрессии  $P_{1dB}$  ограничителя совмещают с верхним разрядом АЦП. Однако более глубокое рассмотрение проблемы показывает, что ограничение сигнала основного тона приводит к росту его гармонических составляющих, т. к. ограничитель является по своей сути нелинейным элементом.

В двухсигнальном приближении амплитудные характеристики аналоговых и цифровых устройств имеют существенные различия, обусловленные различной природой возникновения нелинейных искажений. Важной особенностью цифровых устройств, к которым относится и АЦП, является то, что при квантовании сигнала его искажения с ростом амплитуды нарастают скачкообразно. АЦП не сжимают постепенно сигнал, при достижении области компрессии, а действуют как «жесткий ограничитель». При достижении определенного уровня происходит экстремальное искажение сигнала, называемое эффектом вырезки (от англ. clipping). Типичные кривые зависимости уровня полезного сигнала и продуктов нелинейных искажений от мощности входного двухтонального сигнала для АЦП и аналогового ограничителя мощности изображены на рис. 4. зеленым и красным цветами соответственно.

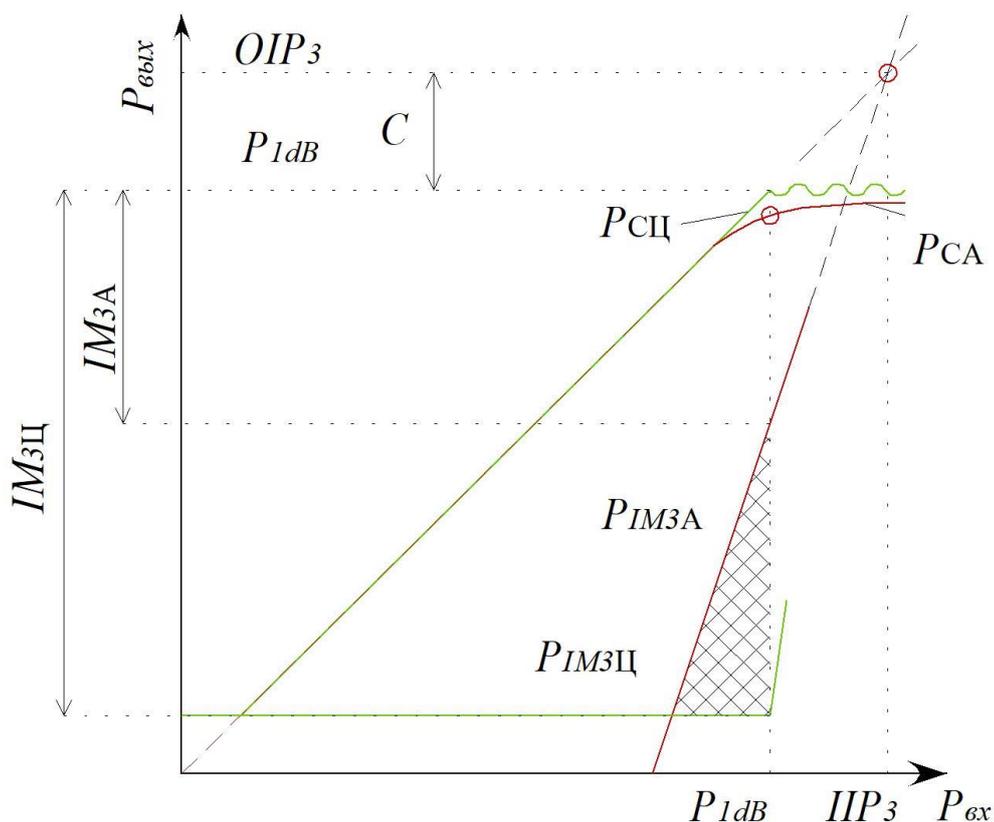


Рис. 4. Обобщенные АХ аналоговых и цифровых устройств.

По сути, представленная АХ АЦП показывает, что линия, соответствующая уровню ИМИ 3-го порядка  $P_{IM3Ц}$  во всем динамическом диапазоне АЦП, находится на практически постоянном уровне  $P_{IM3Ц}$ , близкому к

уровню младших разрядов. Особенность АЦП в том и состоит, что его двухсигнальный динамический диапазон  $IM_{3Ц}$  близок по величине к динамическому диапазону, определяемому разрядностью, и не зависит от уровня входного сигнала.

В отличие от АЦП, ограничение сигнала аналоговыми устройствами происходит плавно. Уровень ИМИ  $P_{IM3A}$  нарастает по мере отклонения от линейного закона АХ сигнала основного тона. Как показано на рисунке 4 красным цветом линия  $P_{IM3A}$  имеет крутизну втрое больше, чем линия основного тона  $P_{CA}$ . Если в области малых сигналов ИМИ аналоговых пассивных амплитудных ограничителей сигнала можно пренебречь, то при приближении к  $P_{1dB}$  с какого-то момента они начинают превалировать над ИМИ АЦП. Как правило, в точке  $P_{1dB}$  отношение  $IM_{3A}$  существенно меньше динамического диапазона АЦП, что, собственно, и приводит к ограничению РДД всего ШПУ СВЧ в целом. На рисунке это проиллюстрировано треугольником, ограниченными линиями  $P_{IM3A}$ ,  $P_{IM3Ц}$  и  $P_{1dB}$  по входу. Дальнейшее исследование имеет своей целью уменьшение площади указанного треугольника путем снижения  $P_{IM3A}$ . Другими словами АХ аналогового ограничителя должна быть линейной в пределах динамического диапазона АЦП и обеспечивать эффективное ограничение за его пределами. В литературе такая форма АХ аналогового ограничителя называется «линеаризованной». Количественно линейность аналогового ограничителя определяется параметром  $C$  равному отношению точки пересечения ИМИ 3-го порядка и точки однодецибельной компрессии:

$$C = IP_3 - P_{1dB} \quad (2)$$

Таким образом, задачей является уменьшение ИМИ аналогового выходного тракта ШПУ СВЧ вблизи  $P_{1dB}$  при заданном безопасном для АЦП уровне выходной мощности.

В заключение первой главы систематизируются основные аспекты ограничения РДД ШПУ СВЧ и конкретизируются задачи последующих исследований:

- требуется исследование возможности расширения ДД ШПУ СВЧ путем отключения избыточного усиления и выработки схемотехнического подхода к проектированию и практической реализации ВЛТ ШПУ СВЧ.

- необходима разработка способа преодоления факторов, связанных с наличием ПКП и СПС, неравномерностью и нестабильностью АЧХ, ограничивающих ДД ШИП СВЧ, путем разработки нового принципа регулирования параметров питания и управления.

- требуется исследование теоретических возможностей расширения ДД ШПУ СВЧ по критерию ИМИ, основанных на линеаризации АХ  $p-i-n$  диодного ограничителя сигнала выходного тракта.

Решения вышеперечисленных задач для входного, преобразовательного и выходного трактов последовательно представлены в следующих главах.

Во второй главе рассмотрены различные варианты построения ВЛТ. Показано, что расширение ДД ШПУ СВЧ достигается ВЛТ с отключением усилительных каскадов и введением в тракт управляемого аттенуатора.

Представлена реализация данной идеи во входном линейном модуле ШПУ СВЧ диапазона 8–18 ГГц. Модуль является составной частью ВЛТ и представляет собой широкополосный малошумящий усилитель с двумя отключаемыми входными каскадами. Структурная схема усилителя представлена на рис. 5.

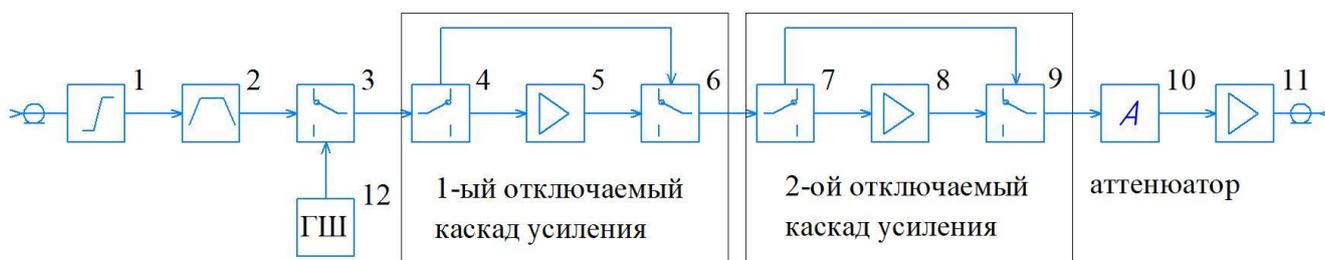


Рис. 5 Структурная схема усилительного модуля ВЛТ

Ограничитель мощности (1), расположенный на входе, обеспечивает защиту модуля от воздействия помеховых СВЧ-сигналов с мощностью до 2 Вт в непрерывном режиме и постоянного напряжения. Полосно-пропускающий фильтр (2) обеспечивает подавление внеполосных сигналов. Модуль имеет возможность подключения по входу контрольного сигнала. В данном исполнении модуля через коммутатор СВЧ (3) можно подключить широкополосный генератор шума (12).

Отключаемые каскады усиления представляют собой схему из МШУ (5 и 8) и четырех коммутаторов (4,6 и 7,9 соответственно), обеспечивающих возможность включения линий передач в обход одного или обоих каскадов усиления. Усилитель имеет три режима работы:

- 1-й, когда задействованы все три каскада;
- 2-й, когда отключен один входной каскад;
- и 3-й с отключением обоих входных каскадов.

Степень ослабления коэффициента передачи каждого из входных каскадов, обусловленная применяемой элементной базой, составила порядка 20 дБ.

Для тонкой регулировки усиления был задействован 5 битный цифровой аттенуатор СВЧ (10) с шагом ослабления 1 дБ и максимальным затуханием 31 дБ, расположенный в схеме на выходе третьего каскада. Непосредственно после аттенуатора на выходе модуля был установлен усилитель мощности (11),  $P_{1dB}$  которого более 20 дБм.

Представлены результаты измерений основных параметров модуля. На рисунке 6 показаны экспериментальные графики ДД, его верхней и нижней границы во всех трех режимах.

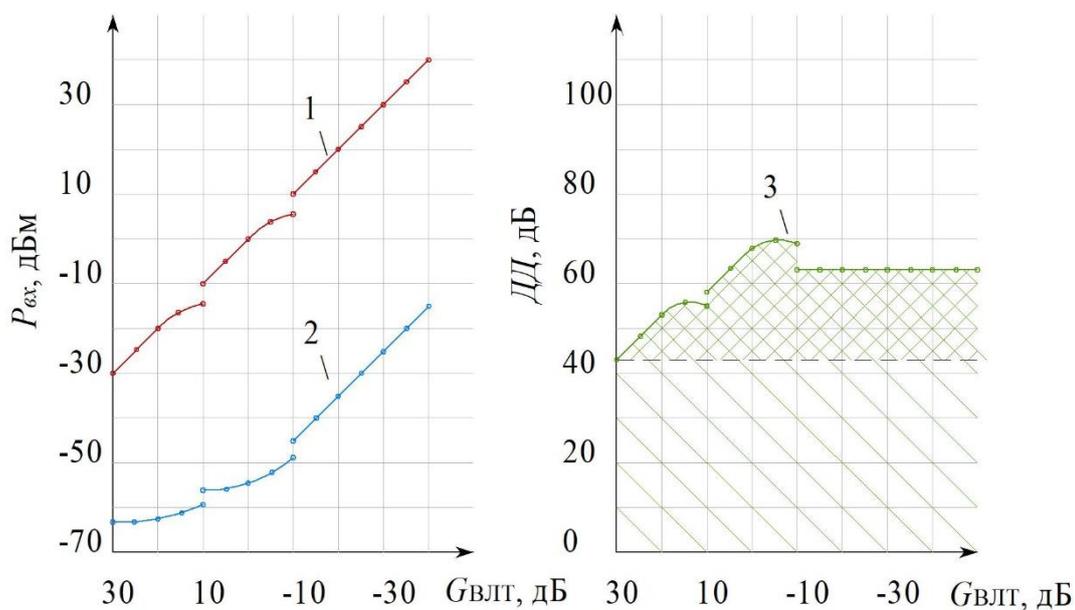


Рис. 6 График экспериментальных измерений ДД ШПУ СВЧ (3), его верхней (1) и нижней (2) границы в зависимости от значения коэффициента передачи усилительного модуля ВЛТ

Графики сняты путем последовательного увеличения ослабления аттенюатора тонкой регулировки в каждом из трех режимов работы модуля. При переходе в следующий режим аттенюатор тонкой регулировки сбрасывался в нулевое значение.

Заштрихованная область, ограниченная пунктирными линиями, соответствующая приращению ДД, иллюстрирует достигнутое расширение динамического диапазона. Места разрыва экспериментальных графиков соответствуют моментам отключения первого и второго каскадов усиления соответственно. Очевидно, что модуль с отключаемыми каскадами и выходным аттенюатором по динамическому диапазону превосходит усилитель с регулируемым аттенюатором по входу во всем диапазоне ослаблений. В частности, с отключенным первым каскадом динамический диапазон возрастает на 12 дБ, а при отключении второго каскада эта величина превышает 20 дБ.

Представленный усилительный модуль имеет полосу рабочих частот от 8 ГГц до 18 ГГц и коэффициент передачи равный 27...30 дБ. Достигнутые значения неравномерности коэффициента передачи модулей в различных режимах иллюстрирует рисунок 7. Усилитель имеет низкую неравномерность Кп как в режиме полного усиления, так и в режиме с отключенным каскадом. Разница между минимальным и максимальным значением коэффициента передачи составляет не более 3 дБ, а локальная неравномерность в любой полосе частот равной 500 МГц не превышает 1,5 дБ.

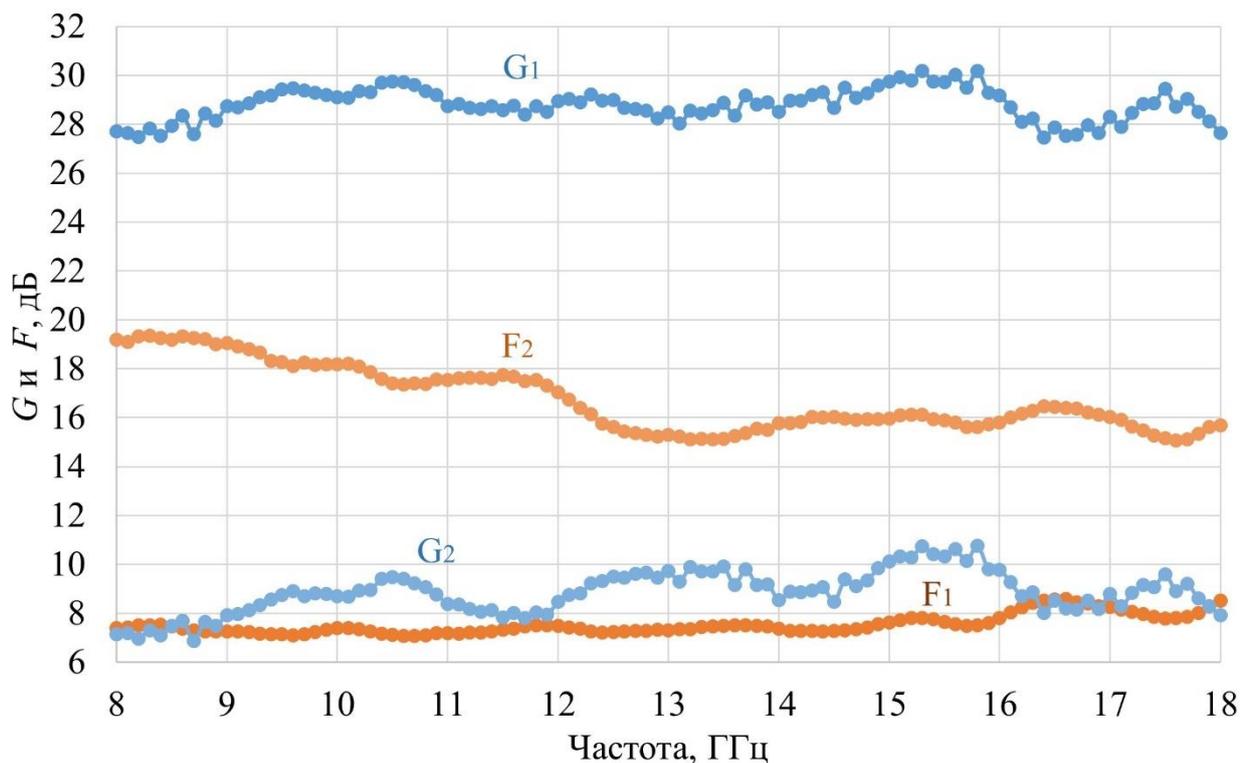


Рис. 7 Измеренные коэффициент передачи  $G$  и коэффициент шума  $F$  усилительного модуля:  $G_1$  – коэффициент передачи в 1-м режиме;  $F_1$  – коэффициент шума в 1-м режиме;  $G_2$  – коэффициент передачи во 2-м режиме;  $F_2$  – коэффициент шума во 2-м режиме

Внутреннее устройство и внешний вид продемонстрированы на рис. 8 и 9 соответственно.

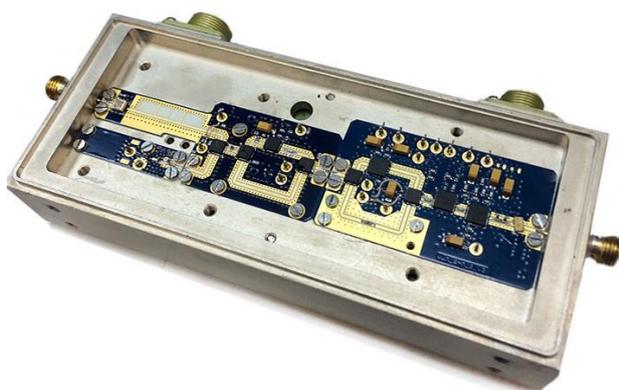


Рис. 8 Внутреннее устройство СВЧ части модуля



Рис. 9 Внешний вид модуля

По результатам исследований, приведенных в данной главе, сформулировано 1-е научное положение.

В третьей главе рассмотрен способ совершенствования системы питания и управления малогабаритных ШИП СВЧ с целью уменьшения неравномерности и нестабильности коэффициента передачи, увеличения подавления ПКП и СПС.

Уменьшение влияния внешних дестабилизирующих воздействующих факторов и улучшение перечисленных выше параметров достигнуто за счет автоматической регулировки.

Структура ШИП СВЧ представлена на рисунке 10.

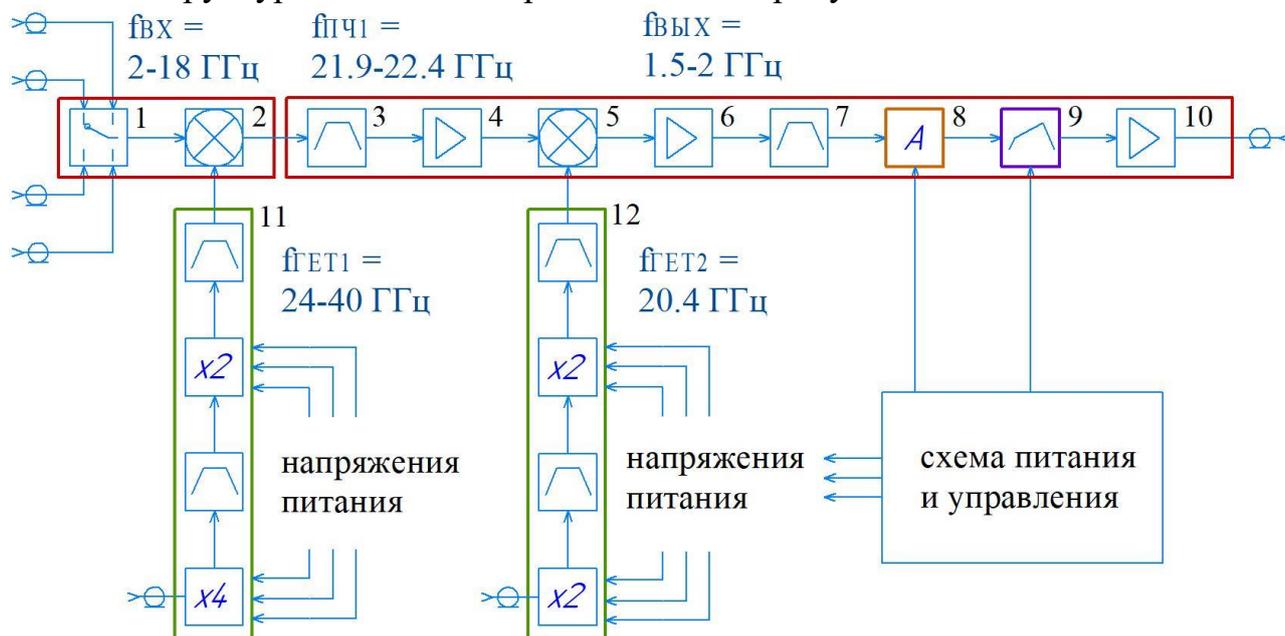


Рис. 10 Структурная схема ШИП СВЧ, где 1 – входная коммутационная цепь, 2 – первый смеситель, 3 – фильтр ПЧ1, 4 – усилитель ПЧ1, 5 – второй смеситель, 6 – предварительный усилитель выходного тракта, 7 – выходной фильтр, 8 – управляемый аттенюатор, 9 – эквалайзер СВЧ, 10 – выходной усилитель, 11 – тракт первого гетеродина, 12 – тракт второго гетеродина

Так как широкополосные элементы приемного тракта в меньшей степени влияют на форму АЧХ, ее фактически определяют элементы с частотно-избирательными свойствами. Уменьшение неравномерности АЧХ достигнуто за счет корректировки наклона ее мгновенной составляющей. Функцию активного корректора выполняет СВЧ-эквалайзер, который работает в диапазоне частот выходного тракта и обладает соответствующим быстродействием.

Помимо снижения неравномерности мгновенной АЧХ на каждой частоте настройки минимизировано отклонение среднего коэффициента передачи от номинального значения. Средний коэффициент передачи ШИП СВЧ зависит от температуры окружающей среды. Для его частотной и температурной компенсации в схему введен управляемый аттенюатор СВЧ, обладающий малым временем переключения, высокой точностью ослабления и низкой неравномерностью АЧХ.

Одновременно с уменьшением неравномерности и нестабильности коэффициента передачи увеличено подавление уровня паразитных составляющих в выходном спектре первого и второго гетеродинных трактов ШИП СВЧ. Это сделано при помощи регулировки режимов работы усилительных и умножительных элементов.

В настоящее время с помощью быстродействующих ЦАП и устройств управления стало возможным использование цифровых автоматических схем

питания и управления. Цифровые аппаратные и программные средства в сочетании с аналоговыми исполнительными устройствами позволили осуществлять автоматическую регулировку СВЧ элементов приемного и гетеродинных трактов. Упрощенная структура автоматической схемы питания и управления представлена на рисунке 11.

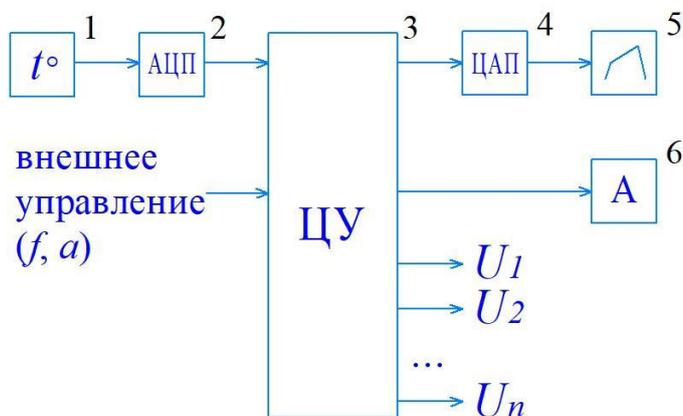


Рис. 11 Упрощенная структура автоматической схемы питания и управления ШИП СВЧ, где 1 – датчик температуры; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – цифровое управляющее устройство; 4 – цифро-аналоговый преобразователь; 5 – аналоговый корректор АЧХ; 6 – цифровой дискретный аттенуатор

Принцип работы системы заключается в регулировании характеристик СВЧ узлов и элементов по предустановленному алгоритму на основе внутренних и внешних данных. Внутренним является температура, а внешними – частота, значения добавочного ослабления коэффициента передачи, коэффициента термокомпенсации и напряжений питания. СВЧ узлами, управляемыми в процессе работы, являются дискретный аттенуатор, СВЧ эквалайзер, умножительные и усилительные элементы гетеродинных и сквозного трактов.

Внедрение принципа автоматического регулирования в модуль ШИП СВЧ, несмотря на некоторое усложнение конструкции позволило добиться улучшения ключевых СВЧ параметров. В экспериментальной части главы 3 представлены сравнительные данные измерений модуля с автоматической схемой питания и управления и без нее. На рисунке 12 изображены мгновенные АЧХ, измеренные с шагом 500 МГц в полном рабочем диапазоне частот.

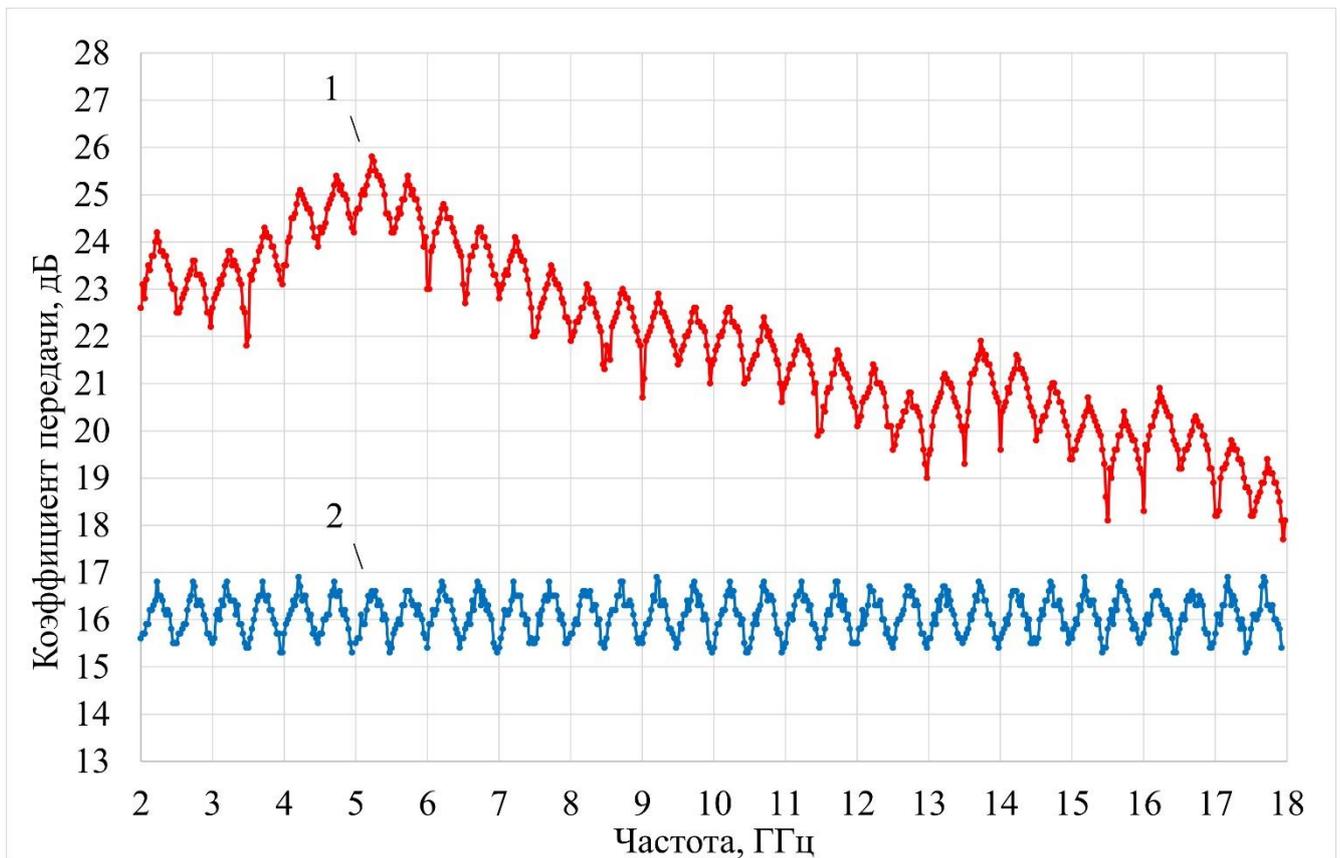


Рис. 12 Коэффициент передачи ШИП СВЧ, где 1 – коэффициент передачи без автоматической регулировки; 2 – коэффициент передачи с автоматической регулировки

В верхней части график продемонстрирована АЧХ ШИП СВЧ до внедрения автоматической регулировки. Мгновенная АЧХ в некоторых точках имеет неравномерность до 3 дБ. Значение отклонения среднего значения коэффициента передачи ( $\sigma G_{cp}$ ) в худшей точке составляет порядка 6 дБ. В целом разница между минимальным и максимальным значением коэффициента передачи во всем диапазоне рабочих частот составляет более 8 дБ. Такой разброс означает соответствующее ухудшение ДД ШИП СВЧ.

С помощью автоматической регулировки удалось уменьшить неравномерность мгновенной АЧХ ( $\Delta G_{мгн}$ ) и  $\sigma G_{cp}$ . Соответствующая АЧХ ШИП СВЧ изображена в нижней части рисунка 11. Значение  $\Delta G_{мгн}$  в среднем ниже на 1–1,5, а  $\sigma G_{cp}$  на всех частотах настройки в интервале температур не превышает 1 дБ.

На рисунке 13 представлены результаты измерений ПКП и СПС ШИП СВЧ.

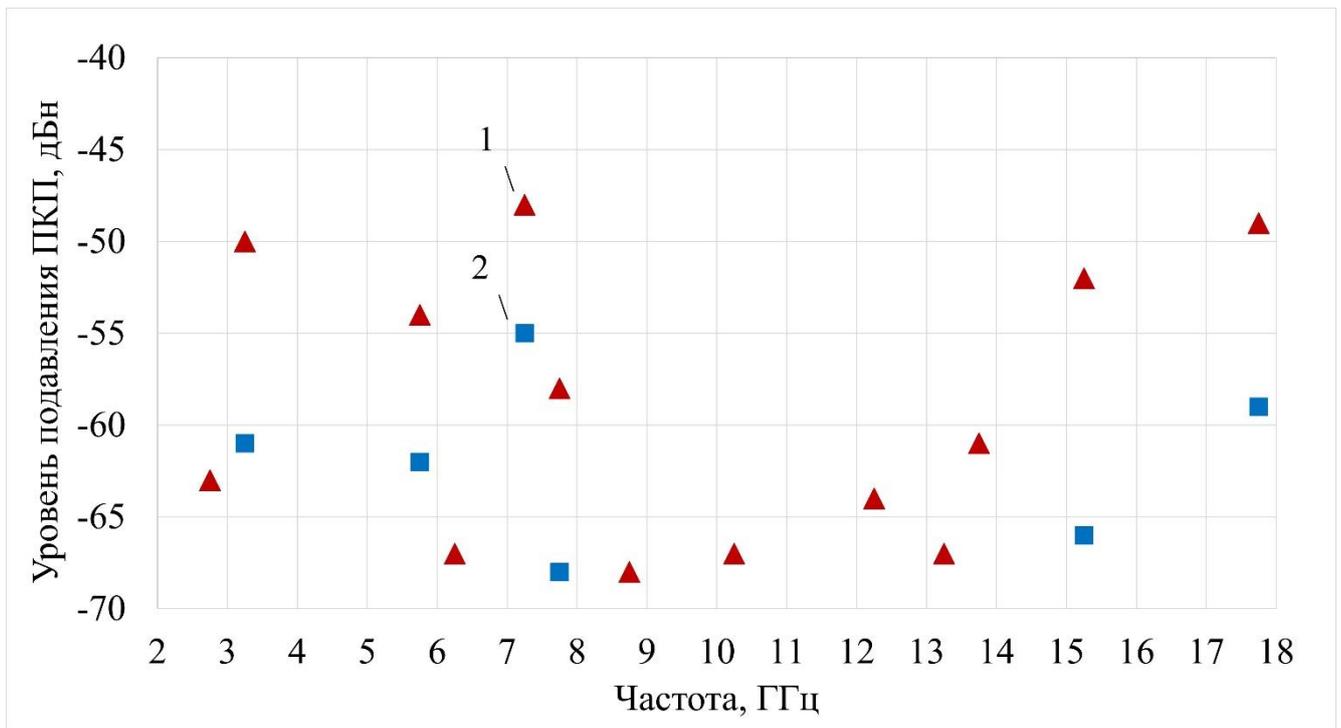


Рис. 13 Уровни подавления ПКП и СПС ШИП СВЧ: 1 – ПКП и СПС до коррекции; 2 – ПКП и СПС после коррекции

Маркерами (▲) обозначены уровни паразитных сигналов на выходе преобразователя, измеренные без использования автоматической регулировки. ПКП измерялись при сигнале с мощностью, приведенной к выходу, +10 дБм, равной значению  $P_{1dB} - 3$  дБ. Видно, что типичный уровень ПКП и СПС составляет от -60 до -55 дБм. Также в модуле присутствует ПКП с уровнем -46 дБм.

Отличие модуля с применением автоматической регулировки заключается в существенно лучшем подавлении ПКП и СПС. Измеренные значения паразитных сигналов на выходе ШИП СВЧ для этого случая также представлены на рис. 14 и обозначены соответствующими маркерами (■). Относительный уровень наибольшего ПКП не превышает минус 55 дБм. В целом это на 5–15 дБ лучше, чем для ШИП СВЧ без автоматической схемы питания и управления. Количество типичных ПКП и СПС, уровень которых составляет более -70 дБм, существенно уменьшено.

СВЧ часть и плата питания и управления продемонстрированы на рис. 14 и 15 соответственно.

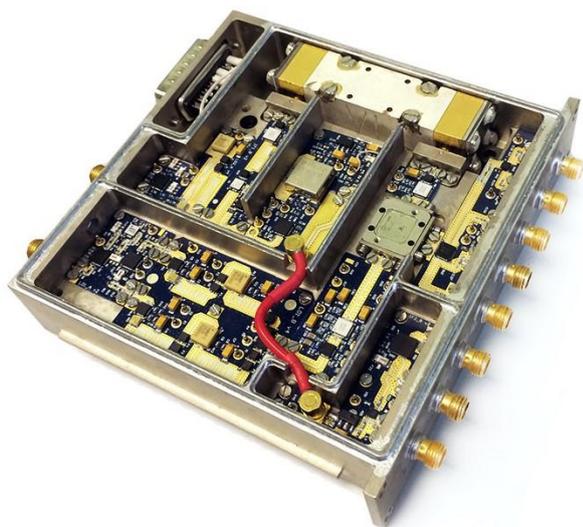


Рис. 14. Внутреннее устройство СВЧ части ШИП СВЧ

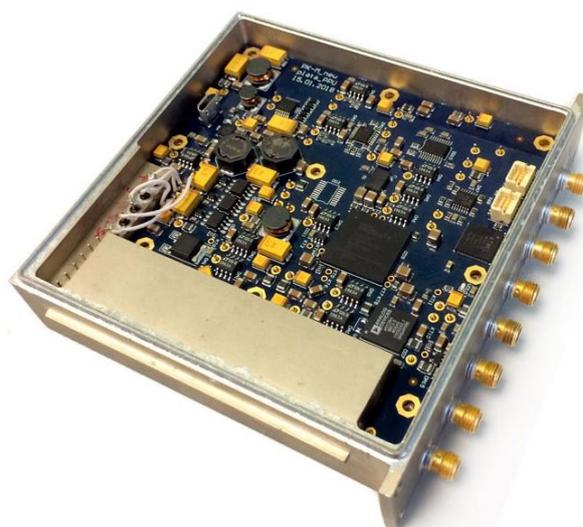


Рис. 15 Внутреннее устройство НЧ части ШИП СВЧ

Автоматическая схема питания и управления позволила уменьшить функциональную нагруженность на потребителя, повысив надежность работы аппаратуры назначения. При этом серийное производство модулей показало высокую повторяемость электрических характеристик, что делает возможным использование ШИП СВЧ в многоканальных системах, с повышенными требованиями по идентичности АЧХ. Рассмотренные подходы к проектированию позволили не только улучшить качественные и количественные показатели инфрадиных преобразователей ШПУ СВЧ, но и получить функционально законченное устройство.

Изложенные в данной главе результаты экспериментального исследования позволили сформулировать 2-е научное положение.

В четвертой главе приведено исследование возможности расширения ДД в двухсигнальном режиме работы за счет линейризации р-і-п-диодного ограничителя мощности. Расчет р-і-п-диодного ограничителя мощности с требуемым значением параметра  $C$  проведен на основе классического подхода с использованием аппроксимации его передаточной характеристики полиномом:

$$u_{out} = a_1 u_{in} + a_2 u_{in}^2 + a_3 u_{in}^3 + \dots + a_n u_{in}^n, \quad (3)$$

где  $a_n = \frac{1}{n!} \left. \frac{d^n f}{du_{in}^n} \right|_A$  - коэффициенты ряда Тейлора.

Известно, что амплитудная характеристика ограничителя, описываемая полиномом 3-го порядка, дает значение параметра  $C$  равное 9,6 дБ. При этом значение  $IM_3$  в точке  $P_{1dB}$  составляет 19 дБ, что недостаточно для большинства применений. АХ аналогового ограничителя, описываемая полиномом 5-го порядка, дает возможность увеличения  $C$  за счет увеличения отношения коэффициентов пятого и третьего порядков, определяющих уровень ИМИ. На вид передаточной характеристики существенное влияние оказывают

электрофизические свойства, характеристики и параметры р-і-п-диодов, многими из которых можно целенаправленно управлять на этапе их производства.

Аппроксимация передаточной характеристики р-і-п-диодного ограничителя мощности полиномом пятого порядка показывает, что интересующая нас величина  $C$  является функцией коэффициентов передаточной характеристики (3)  $C = f(a_1, a_3, a_5)$  и имеет вид:

$$C = \frac{5 a_5}{3 a_3} \left[ \sqrt{\frac{9}{16} \left(\frac{a_3}{a_1}\right)^2 - \frac{5 a_5}{2 a_1} \left(1 - 10^{\frac{1}{20}}\right) - \frac{3 a_3}{4 a_1}} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Видно, что увеличение  $C$  может быть достигнуто в основном за счет увеличения отношения  $a_5/a_3$ . На практике это приведет к снижению мощности интермодуляционных составляющих третьего порядка и увеличению мощности интермодуляционных составляющих пятого порядка. Для безразмерных переменных  $x = \frac{W}{L_a}$  и  $t = \omega\tau$

$$C = f(x, t) = 10 \log \left( \frac{3xt^2}{2t^2 \sqrt{\frac{1}{2t} - \frac{3\sqrt{2}x}{4t^3} \left(1 - \frac{1}{10^d}\right) - 2\sqrt{2}t^3}} \right) \quad [\text{дБ}]. \quad (5)$$

где  $L_a = \sqrt{D_a\tau}$  – длина амбиполярной диффузии;  $\tau$  – амбиполярное время жизни;  $D_a = \frac{kT}{q} \frac{2\mu_n\mu_p}{\mu_n + \mu_p}$  – коэффициент амбиполярной диффузии;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $q$  – элементарный заряд;  $\mu_n$  и  $\mu_p$  подвижности электронов и дырок соответственно;  $W$  – толщина базовой  $i$ -области;  $\omega$  – частота гармонической составляющей двухтонального сигнала с частотами  $\omega_1 = \omega$ ,  $\omega_2 = \omega + \Delta\omega$  при  $\Delta\omega \ll \omega$ .

Зависимость  $C = f(x, t)$  при  $x = 2$  и  $1/10 \leq t \leq 100$  приведена на рисунке 16.

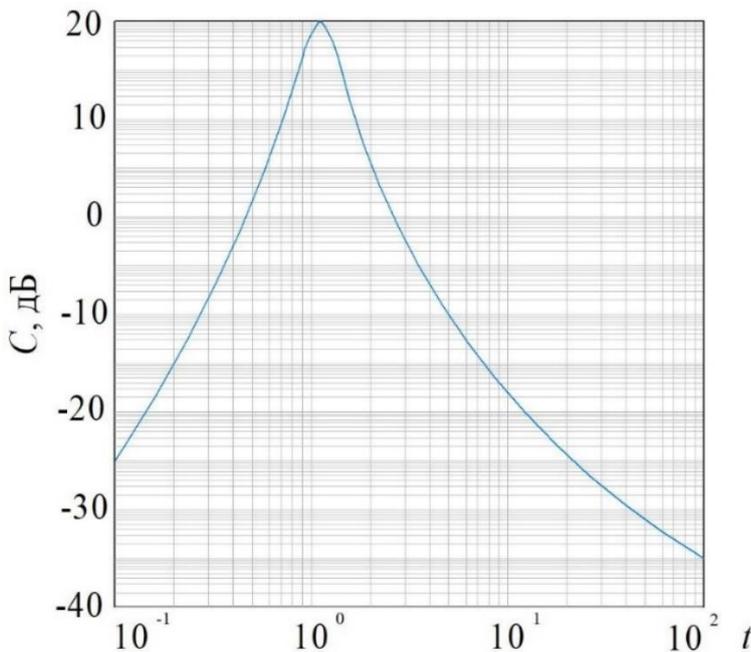


Рис. 16. Зависимость  $C = f(x, t)$  при  $x = 2$  и  $1/10 \leq t \leq 100$

Видно, что при вариации  $x$  и  $t$  в диапазонах  $0 < x \leq 2$  и  $1 \leq t \leq 100$ , величина  $C$  достигает максимального значения 19,95 дБ. Получение таких значений  $C$  возможно и на практике, о чем говорит экспериментальное исследование ограничителей мощности на основе кремниевых р-і-п-диодов «Параграф-Д» со следующими основными параметрами: толщина  $i$ -слоя 6 мкм; время

жизни носителей заряда 5 нс; пробивное обратное напряжение 80 В; емкость при нулевом смещении 0,16 пФ.

На рисунке 17 продемонстрированы экспериментальные зависимости  $P_{1dB}$  и  $P_{IM3}$  для представленного выше ограничителя на различных рабочих частотах.

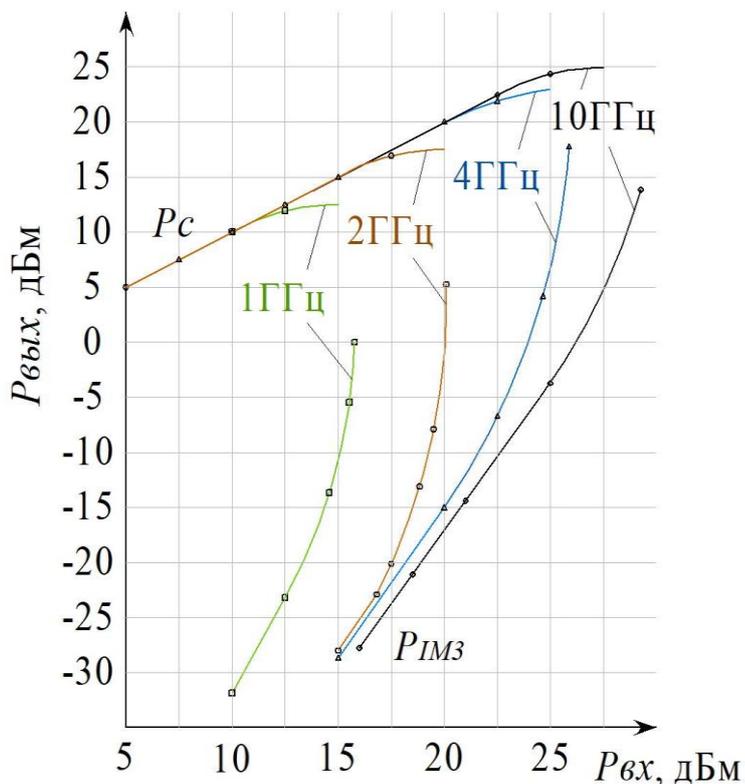


Рис. 17 Амплитудная характеристика диодов «Параграф-Д».

Маркерами (□) обозначены значения для рабочей частоты 1 ГГц, маркерами (○) для 2 ГГц, маркерами (△) для 4 ГГц и маркерами (◇) для 10 ГГц. Ограничитель имеет на частоте 2 ГГц  $P_{1dB} = 17$  дБм и  $P_{IM3} = -21$  дБм, что соответствует подавлению ИМИ  $IM_3 = 38$  дБ. Значение  $C$  в этом случае составляет 19 дБ.

На частотах 1 ГГц и 4 ГГц подавление ИМИ составляет не более 35 дБ, а на частоте 10 ГГц падает до 30 дБ с тенденцией последующего уменьшения.

Результаты измерений и проведенный теоретический анализ ограничителей СВЧ мощности на основе р-і-п-диодов с оптимизированной структурой демонстрируют возможность увеличения величины параметра  $C$  практически до теоретических значений. Оптимизация может быть проведена как для заданной частоты, так и для необходимого уровня ограничения выходной мощности.

Таким образом показан способ, основанный на оптимизации и линейризации р-і-п диодного ограничителя мощности, который позволяет увеличить верхнюю границу ДД ШПУ СВЧ в двухсигнальном приближении по критерию ИМИ на величину порядка 10 дБ.

По результатам исследований, приведенных в данной главе сформулировано 3-е научное положение.

В пятой главе представлено внедрение результатов диссертационной работы. Это более 500 приборов в составе поставленных комплексов пассивной радиолокации «Автобаза-М». В том числе входные усилители с отключаемыми каскадами 4 литеры в диапазоне 2–18 ГГц и новый ШИП СВЧ в том же диапазоне, позволивший существенно уменьшить массу и габариты приемного устройства аппаратуры назначения и упростить его конструкцию. Также отмечено расширение

ДД комплекса на 5–7 дБ при улучшении стабильности и равномерности амплитудно-частотных характеристик.

В заключении представлены основные результаты работы:

1. Определены основные требования к ШПУ СВЧ. Исследованы технические механизмы ограничения РДД приемо-преобразовательных трактов ШПУ СВЧ. Рассмотрены функционирование, принцип работы и технические требования основных частей ШПУ СВЧ: ВЛТ, ШИП СВЧ и выходного тракта ШПУ СВЧ.

2. Проведено исследование возможности увеличения ВГЛАХ ШПУ СВЧ путем отключения избыточного усиления в ВЛТ. В рамках исследования был проведен анализ моделей построения ВЛТ ШПУ СВЧ с точки зрения ограничения ДД и учетом актуальных функциональных требований. Предложено оригинальное схемотехническое решение, основанное на модели с отключаемыми каскадами и регулируемым аттенуатором. Выработан схемотехнический подход к проектированию ВЛТ, позволяющий получить малый шаг регулировки усиления и расширенный ДД. Продемонстрирована практическая реализация входного линейного модуля ШПУ СВЧ в диапазоне рабочих частот 8–18 ГГц, результаты измерений которого показали возможность расширения ДД до 10 дБ.

3. Исследованы факторы ограничения ДД ШИП СВЧ, связанные с наличием ПКП и СПС, неравномерностью и нестабильностью АЧХ. Предложен способ увеличения подавления ПКП и СПС и уменьшения неравномерности и нестабильности АЧХ малогабаритных ШИП ШПУ СВЧ. Обоснована целесообразность применения автоматических схем питания и управления в ШИП СВЧ. Выполнена практическая реализация малогабаритного преобразовательного модуля с рабочим диапазоном частот 2–18 ГГц. Экспериментальное исследование снижения неравномерности предложенного способа подтвердило возможность снижения неравномерности сквозной АЧХ до 1,5 дБ, температурной и частотной нестабильности АЧХ до значений, не превышающих 1 дБ и уровней ПКП и СПС в среднем на 10 дБ.

4. Исследованы механизмы ограничения ДД ШПУ СВЧ в двухсигнальном режиме работы. Рассмотрена методика оценки уровней ИМИ  $p-i-n$  диодов для многосигнального режима. Проведен теоретический анализ способа расширения ДД ШПУ СВЧ по критерию подавления ИМИ 3-го порядка, основанного на линеаризации  $p-i-n$  диодного ограничителя мощности выходного тракта, нагруженного на АЦП. Проведены результаты измерений  $p-i-n$  диодных ограничителей с различной максимальной выходной мощностью и на различных рабочих частотах. Подтверждена возможность реализации линеаризованного ограничителя мощности с увеличенным значением параметра  $S$ , позволяющего расширить ДД ШПУ СВЧ на 10 и более дБ.

**Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

**Статьи, опубликованные в зарубежных изданиях, включенных в систему Scopus:**

1. S. V. Gutenko, S. A. Petrov, Yu. A. Fedonin, P. V. Kupriyanov, A. V. Androsov. On the Possibility of Expanding the Dynamic Range of Broadband High-Frequency Receivers // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2018, Vol. 63, No. 3, pp. 235–236

**Список работ, опубликованных по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

2. Богданов С. А., Гудкова Н. Б., Куприянов П. В., Николаев С. В., Петров С. А. Линеаризация выходных трактов широкополосных приёмных устройств СВЧ // Электронная техника. – 2020. – Вып. 3 (546) – с.45-50

3. Богданов С. А., Куприянов П. В. Николаев С. В., Петров С. А. Моделирование многосигнального режима работы р-і-п диодных функциональных узлов СВЧ // Электронная техника. – 2019. – Вып. 3 (542) – с.55-62

4. Петров С. А. Входной малошумящий усилительный модуль с расширенным динамическим диапазоном // Электронная техника. – 2018. – Вып. 4 (539) – с.31-36

5. Богданов С. А., Николаев С. В., Куприянов П. В., Петров С. А., Исследование путей расширения динамического диапазона широкополосных приемных устройств СВЧ в многосигнальном режиме // Известия ВУЗов Росси. Радиоэлектроника. – 2018. – Вып. 3 – с.85-90

6. Андросов А. В., Куприянов П. В., Гутенко С. В., Лебедев К. В., Петров С. А., Кожин Е. С. Приемопередающий модуль цифрового радиолокатора 8-мм диапазона длин волн // Электронная техника. – 2015. – Вып. 4. – с.18-27

7. Коновалов С. А., Куприянов П. В., Петров С. А. Об эффективности компенсации частотной нестабильности опорного гетеродина мм-диапазона длин волн в широкополосных инфрадинных преобразователях // Электронная техника. – 2009. – Вып. 4. – с.18-27

**Патенты и свидетельства**

8. Куприянов П. В., Петров С. А. Входной линейный модуль широкополосного приемного устройства СВЧ с расширенным динамическим диапазоном / патент на изобретение №2715406, приоритет от 22 апреля 2019 г.

9. Куприянов З. П., Куприянов П. В., Перегонов С. А., Петров С. А. Радиолокационный прибор пространственной ориентации для слабовидящих и слепых людей // патент на изобретение №2 679 924, приоритет от 15 февраля 2018 г.

10. Андросов А. В., Власюк М. Н., Гутенко С. В., Петров С. А. СВЧ-Аттенюатор / патент на изобретение №2578729, приоритет от 29 декабря 2014 г.

11. Андросов А. В., Власюк М. Н., Гутенко С. В., Петров С. А. СВЧ Нагрузка / патент на изобретение №2580465, приоритет от 22 декабря 2014 г.

## Другие публикации по теме диссертации

12. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., Криворучко В. И., Куприянов П. В., Петров С. А. Энергетический потенциал твердотельных радиолокационных СВЧ-приемопередатчиков непрерывного режима // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – Вып. 12 (222) – с.72-79

13. Петров С. А. «Цифровые» подходы к расширению динамического диапазона широкополосных инфрадинных преобразователей СВЧ // Ural Radio Engineering Journal. 2019;3(4):356–368

14. Богданов С. А., Куприянов П. В., Петров С. А. Новые подходы к расширению динамического диапазона широкополосных приемных устройств СВЧ / соавтор, VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», ЛЭТИ, Санкт-Петербург, 2019 г. Тезисы докладов конференции.

15. Богданов С. А., Николаев С. В., Куприянов П. В., Петров С. А. Некоторые новые подходы к созданию современных широкополосных приемных устройств СВЧ / докладчик, Научно-техническая конференция АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ электроника-2018.75 лет развития», Фрязино, 2018 г. Тезисы докладов конференции.

16. Петров С. А. Входной линейный модуль широкополосного приемного устройства СВЧ / докладчик, VII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», ЛЭТИ, Санкт-Петербург 2018 г. Тезисы докладов конференции.

17. Николаев С. В., Куприянов П. В., Петров С. А., Исследование путей расширения динамического диапазона широкополосных приемных устройств СВЧ в многосигнальном режиме / докладчик, VI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», ЛЭТИ, Санкт-Петербург 2017 г. Тезисы докладов конференции.

18. Гутенко С. В., Петров С. А. Расширение динамического диапазона входных линейных трактов широкополосного приемного устройства СВЧ / докладчик, VI Всероссийская научно-техническая конференция по обмену опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем «СВЧ-2016», Омск 2016 г. Тезисы докладов конференции.

19. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., Криворучко В. И., Куприянов П. В., Петров С. А. Энергетический потенциал и «потенциал» применения твердотельных радиолокационных приемопередатчиков непрерывного режима ММВФ / соавтор, IX Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород 2013 г. Тезисы докладов конференции.

20. Некоторые аспекты расширения реального динамического диапазона комплексированных инфрадинных приемных устройств СВЧ / докладчик, Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов (12–13 октября 2010 г., ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино. Тезисы докладов конференции.