

На правах рукописи



МАЛАХОВ РОМАН ЮРЬЕВИЧ

МОДУЛЬ БОРТОВОЙ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2015

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Добычина Елена Михайловна**,
кандидат технических наук, доцент,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
доцент кафедры «Радиофизика, антенны
и микроволновая техника»

Официальные оппоненты: **Кулешов Валентин Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва, профессор кафедры
формирования колебаний и сигналов

Романюк Виталий Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский университет
«МИЭТ», доцент кафедры микроэлектронных
радиотехнических устройств и систем (МРТУС)

Ведущая организация: **АО «Концерн радиостроения «Вега»**

Защита диссертации состоится «26» мая 2015 года в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертационной работой можно ознакомиться на сайте www.mai.ru и в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, д.т.н.



М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Современные бортовые радиоэлектронные системы (РЭС) находятся в быстро меняющейся радиотехнической обстановке, поэтому их функциональные возможности должны обеспечивать гибкое изменение характеристик в зависимости от режима работы.

Задача комплексирования функций, выполняемых антенной системой, возникает при разработке бортовых многофункциональных радиолокационных систем (РЛС), осуществляющих обнаружение, сопровождение и идентификацию объектов, а также при совмещении функций РЛС и системы радиопротиводействия в одной антенне.

Применение активных фазированных антенных решеток (АФАР) в многофункциональных бортовых РЭС выдвигает ряд технических и научных проблем: обеспечение высокого уровня излучаемой мощности с ограниченной апертуры АФАР; построение надежных полупроводниковых приемопередающих модулей (ППМ) на активных элементах с высокими КПД и коэффициентом усиления по мощности и стабильной фазовой характеристикой в широкой полосе частот, минимально возможным уровнем внеполосного излучения; разработка методов проектирования с учетом минимизации массы, габаритов, стоимости.

Существенное изменение входных сопротивлений излучателей при сканировании и смене режима работы АФАР обуславливает изменение характеристик активных элементов модуля и может нарушить их устойчивость. Это обстоятельство надо учитывать при проектировании выходных мощных каскадов передающей части ППМ.

Необходимо отметить наиболее важные проблемы построения различного класса бортовых многофункциональных радиосистем:

- создание новых схем построения АФАР на основе перспективной полупроводниковой цифровой элементной базы, обеспечивающих возможность совмещения ряда функций в одной антенной системе;

- разработка оптимальных методов управления частотой, амплитудой и фазой сигналов в АФАР;

- оптимизация характеристик АФАР, создаваемых на специализированной цифровой элементной базе;

- увеличение излучаемой мощности и КПД при расширении полосы рабочих частот, уменьшение массы, габаритов, стоимости ППМ.

Многофункциональность РЭС достигается переходом на цифровое диаграммообразование (ЦДО), при котором решетка становится цифровой (ЦАР). Использование ЦДО позволяет повысить помехозащищенность РЭС, её динамический диапазон, скорость управления амплитудно-фазовым распределением (АФР).

В настоящее время в мире ведутся активные работы по исследованию структуры приёмопередающего модуля цифровой антенной решетки, а также его составных элементов – аналого-цифровых преобразователей (АЦП), цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) и других. В основном они касаются антенных решеток в составе наземных систем связи, где ЦАР используются наиболее широко, и затрагивают вопросы формирования и обработки сигнала. При этом проблемам, возникающим в СВЧ части модуля не уделяется должного внимания.

Вопрос выбора структуры модуля для многоэлементных бортовых ЦАР является мало проработанным и требует дополнительного анализа. Использование ЦДО в этом случае сдерживается не только сложностью цифрового управления и синхронизации, но также и большой потребляемой мощностью модуля, что является недопустимым для бортовых РЭС.

Основными потребителями энергии в ЦАР, как и в АФАР, являются единый СВЧ возбудитель и активные приборы, входящие в состав модулей. Существенные потери мощности в системе распределения опорного СВЧ сигнала приводят к возрастанию энергопотребления возбудителя, особенно в случае реализации многолучевой ДН. Управляемые фазовращатели и аттенюаторы в передающем тракте и АЦП в приёмном тракте модулей дополнительно уве-

личивают уровень потребляемой мощности и амплитудно-фазовые ошибки при формировании ДН ЦАР, что является недопустимым для бортовых РЭС. Существенное влияние на энергопотребление РЭС оказывает окончательный усилитель мощности в составе передающего тракта модуля ЦАР. Достижение высокого КПД усилителя возможно только при наличии точной нелинейной модели транзисторов, входящих в его состав.

Определение оптимальной структуры как цифровой, так и СВЧ частей модуля бортовой ЦАР, при которой возможно уменьшение энергопотребления многофункциональной РЭС является актуальной задачей.

Степень разработанности темы

Известны работы, посвященные вопросам построения цифровых антенных решеток и их составных элементов таких авторов, как Воскресенский Д.И., Иммореев И.Я., Слока В.К., Евстропов Г.А., Слюсар В.И. Основное их внимание направлено на проблемы разработки приёмных ЦАР, в первую очередь наземного базирования.

Вопросы моделирования активных приборов рассматривались в трудах Неймана М.С., Шахгильдяна В.В., Челнокова О.А., Кулешова В.Н., Романюка В.А., Алексеева О.В., Ангелова И.

Известны работы зарубежных авторов - Гупта Д., Муханов О., Магил Е., по разработке ППМ, в состав которых входят прямые цифровые синтезаторы сетки частот (ССЧ). Однако уровень фазовых шумов и побочных составляющих в таких модулях являются недопустимыми для использования в доплеровской радиолокации.

Целью работы является разработка принципов построения и схемотехнической реализации приемопередающего модуля для бортовой цифровой антенной решетки многофункциональной радиоэлектронной системы, а также разработка моделей и путей создания новых устройств, позволяющих снизить энергопотребление, массу и размеры модуля за счет использования высокоэффективных технологий и методов моделирования.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо было решить следующие задачи:

1. Выбрать принцип построения и схемотехническую реализацию приемопередающего модуля для цифровой антенной решетки бортовой многофункциональной радиоэлектронной системы, работающей в условиях ограниченного энергопотребления, имеющей минимальные массу и размеры.
2. Провести оценку энергетических характеристик ЦАР на основе рассматриваемой структуры модуля и сравнение их с АФАР традиционной архитектуры.
3. Выбрать метод нелинейного моделирования процессов в мощных многосекционных псевдоморфных СВЧ транзисторах, позволяющий интерпретировать результаты их экспериментальных исследований.
4. Создать нелинейную модель транзистора, позволяющую находить его оптимальный режим для достижения высокого КПД и требуемого усиления в широкой полосе рабочих частот.
5. Провести экспериментальные исследования мощных СВЧ усилителей на псевдоморфных транзисторах для подтверждения возможности использования их в составе передающего тракта модуля ЦАР.

Методы исследования

В диссертационной работе используются: метод гармонического баланса для описания нелинейных электрических цепей, теория функций комплексного переменного, элементы линейного программирования, теория статистического анализа, матричные методы решения систем линейных алгебраических уравнений, теория матричного описания антенн и устройств СВЧ, электродинамическое моделирование СВЧ устройств методом моментов.

Научная новизна

1. Предложена схемотехническая реализация приемопередающего модуля цифровой антенной решетки, позволяющая снизить энергопотребление

бортовой многофункциональной радиоэлектронной системы за счет использования в каждом модуле синтезатора сетки частот с цифровым кольцом ФАПЧ.

2. Развита методика нелинейного моделирования процессов в мощных много-секционных псевдоморфных СВЧ транзисторах на основе результатов их экспериментальных исследований.
3. Предложена нелинейная модель транзистора, в которой учтена зависимость режима от совокупности параметров, влияющих на его основные энергетические характеристики.
4. Разработана методика определения элементов эквивалентной электрической схемы мощного СВЧ транзистора, позволяющая увеличить точность определения его параметров по сравнению с существующими методиками.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Схемотехническая реализация модуля цифровой антенной решетки, обеспечивающая снижение энергопотребления бортовой РЭС на 3 – 5 % в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц за счет использования в качестве СВЧ возбуждителя синтезатора сетки частот с цифровым кольцом ФАПЧ.
2. Нелинейная модель мощного СВЧ транзистора на тестовой плате на основе параллельных резонансных контуров, обеспечивающая более высокую точность моделирования транзистора в широкой полосе частот и позволяющая за счет этого повысить КПД усилителей мощности на 3 – 5 %, а уровень выходной мощности на 8 – 10 %.
3. Алгоритм и методика его использования для определения параметров мощных СВЧ транзисторов на основе результатов их экспериментальных исследований, позволяющие реализовать предложенную модель.

Практическая значимость результатов работы

Полученные в процессе работы над диссертацией результаты могут стать основой для разработки бортовых ЦАР многофункциональных РЭС, обеспечивающих более высокие энергетические характеристики.

Предложенный в работе алгоритм определения параметров мощных СВЧ транзисторов и нелинейная модель могут послужить основой для разработки СВЧ усилителей мощности, обладающих повышенным КПД и уровнем выходной мощности в широком диапазоне рабочих частот. Проведена разработка и экспериментальные исследования макетов мощных СВЧ усилителей, подтверждающие повышение КПД и выходной мощности за счет использования предложенного метода моделирования транзистора на тестовой плате.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы при решении задач измерений и моделирования ряда новых отечественных и зарубежных мощных СВЧ GaAs и GaN транзисторов, а также в разработке гибридно-интегральных GaN усилителей мощности сантиметрового диапазона длин волн.

Научные результаты диссертационной работы были использованы на предприятии ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» и в НЦ СРМ МАИ при разработке многофункциональной бортовой радиолокационной системы.

Представленные в диссертационной работе научные и практические результаты внедрены в учебный процесс на кафедре «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» МАИ. Они использованы при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Передающие модули СВЧ и оптического диапазона», а также вошли в 2015 году в состав учебного пособия «Антенные решетки современных радиоэлектронных систем» (авторский 1 п.л.).

Акты о внедрении представлены в приложении.

Достоверность полученных результатов обуславливается корректностью исходных положений, приближений и преобразований, использованием

широко известного и апробированного математического аппарата, компьютерных программ, а также экспериментальными исследованиями и разработками.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Международных научно-практических конференциях:

- 10-ой и 11-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», г. Москва, 2011 г., 2012 г.
- 9-ой Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций», г. Севастополь, 2012 г., 2013 г.
- 23-ой и 24-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2013 г., 2014 г.
- 15th, 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Cartagena, Spain, 2013 / Graz, Austria, 2014.
- The 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS-2014), St Petersburg, 2014.

Всероссийских научно-технических конференциях:

- Научно-практической конференции студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2011», г. Москва, 2011;
- Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2012», г. Москва, 2012;
- I Всероссийской микроволновой конференции, г. Москва, 2013;
- III межвузовской студенческой конференции «Научная сессия – современная радиоэлектроника», г. Москва, 2014;

Публикации

Результаты исследований, проведённых в процессе выполнения диссертационной работы, опубликованы в 18 печатных трудах, из них 6 научных статей в журналах из перечня ВАК, 11 тезисов докладов и одно учебное пособие.

Личный вклад

Все представленные в диссертации результаты исследований и экспериментальные данные получены лично автором либо при его непосредственном участии.

Структура и объём работы

Диссертационная работа изложена на 156 машинописных листах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых сокращений, списка литературы и приложения. Иллюстративный материал представлен в виде 97 рисунков и 20 таблиц. Список литературы включает 96 наименования. Акты о внедрении приведены в приложении к диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых сокращений и списка литературы.

В Главе 1. Анализ требований к составным элементам приёмопередающего модуля цифровой антенной решетки проведён обзор структур ППМ антенных решеток, а также их составных элементов. Анализ показал, что, несмотря на большое разнообразие фирм-разработчиков, структура ППМ обычно остается неизменной, за исключением ППМ на принципе SDR (software-defined radio), которые в настоящее время не используются в бортовых многоэлементных ЦАР. Полупроводниковые СВЧ фазовращатели и аттенюаторы ограничивают возможный частотный диапазон ППМ и уменьшают КПД модуля. Потери компенсируются введением дополнительных усилительных каскадов, приводящих к увеличению габаритных размеров и массы изделия.

Увеличение КПД модуля можно осуществить при использовании квадратурного модулятора (КМ) в качестве устройства управления амплитудно-фазовым распределением на передачу в ЦАР. Разрядность и полоса входного СВЧ сигнала современных коммерчески доступных АЦП позволяет обеспечить

преобразование непосредственно на несущей частоте в приёмных трактах модулей ЦАР вплоть до 20 ГГц, что увеличивает динамический диапазон РЭС.

Проведённый анализ показал, что реализация бортовой ЦАР невозможна при использовании ППМ с традиционной архитектурой, а выбор и обоснование структуры модуля ЦАР, позволяющего улучшить энергетические и электрические характеристики многофункциональных РЭС является актуальной задачей.

Для снижения энергопотребления бортовой РЭС в **Главе 2. Приёмопередающий модуль цифровой антенной решетки** предложена структура ЦАР, в которой отсутствует система распределения СВЧ сигнала. СВЧ возбудитель входит в состав каждого модуля ЦАР, а распределительная система становится полностью цифровой (рисунок 1).

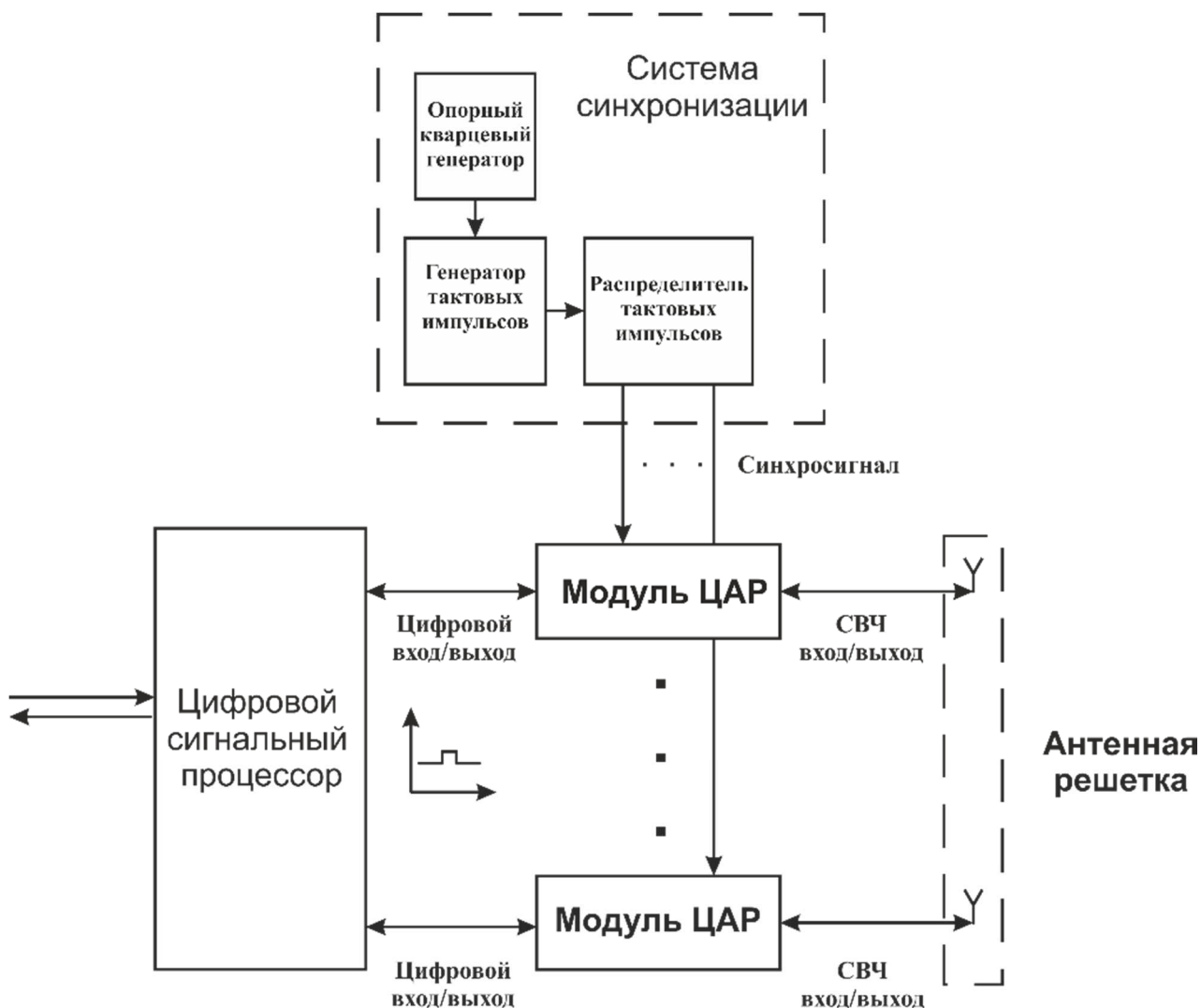


Рисунок 1 – Предлагаемая структура ЦАР

Для обеспечения малого уровня фазовых шумов в качестве возбудителя в модуле ЦАР предложено использовать ССЧ с цифровым кольцом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Когерентность модулей реализуется общим в ЦАР генератором тактовых импульсов (ГТИ), стабильность которого определяется опорным кварцевым генератором (ОКГ). Схема предлагаемого модуля ЦАР показана на рисунке 2.

В качестве устройства управления фазой и амплитудой выходного СВЧ сигнала в модуле ЦАР предложено использовать КМ, синфазный и квадратурный каналы которого формируются с помощью ЦАП. Для обеспечения высокого динамического диапазона преобразование СВЧ сигнала в цифровую форму в приёмном тракте модуля ЦАР осуществляется непосредственно на несущей частоте.

В главе 2 была осуществлена оценка энергетических характеристик ЦАР на основе рассматриваемой структуры модуля, позволившая провести сравнение с АФАР традиционной архитектуры (цифровой приёмный тракт, фазовращатель и аттенюатор в передающем тракте). В качестве основного критерия было выбрано отношение потребляемых мощностей антенных решеток $dP_{\text{ПОТР}} = \frac{P_{\text{ПОТР АФАР}}}{P_{\text{ПОТР ЦАР}}}$. Исходными данными для расчета служили требуемая выходная мощность модуля $P_{\text{ВЫХ}}$ и количество элементов в антенной решетке N . Сравнение проводилось с АФАР, использующей коаксиальную (от 1 до 18 ГГц) и волноводную (от 10 до 40 ГГц) систему распределения СВЧ сигнала (рисунок 3). КПД и коэффициент усиления УМ, а также уровень потребляемой мощности ССЧ, АЦП и ЦАП имели при сравнении частотные зависимости, полученные на основании обзора, проведённого в главе 1. Количество УМ в ППМ рассчитывалось исходя из требуемой выходной мощности ППМ, мощности возбудителя, потерь в согласующих цепях.

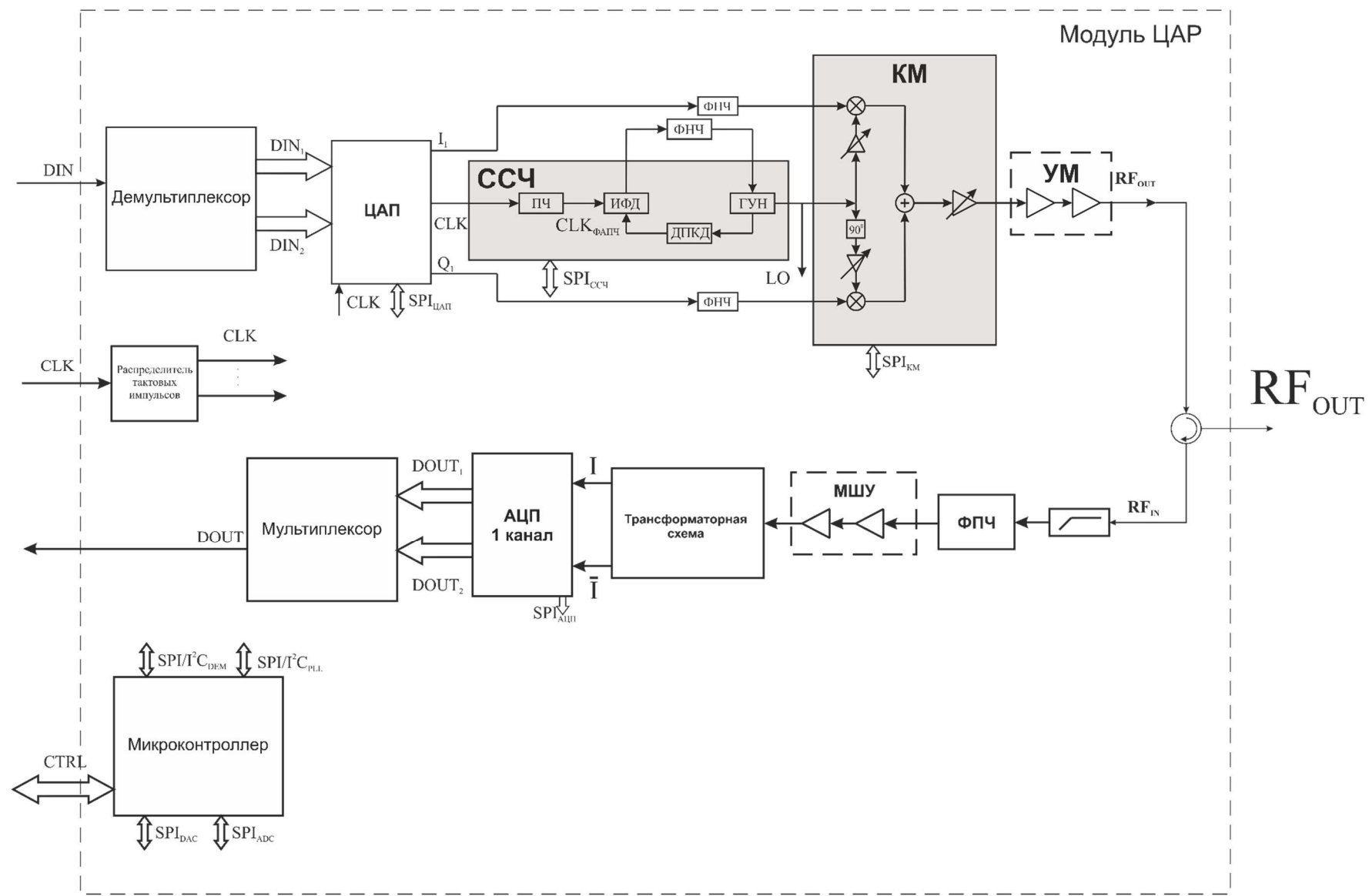
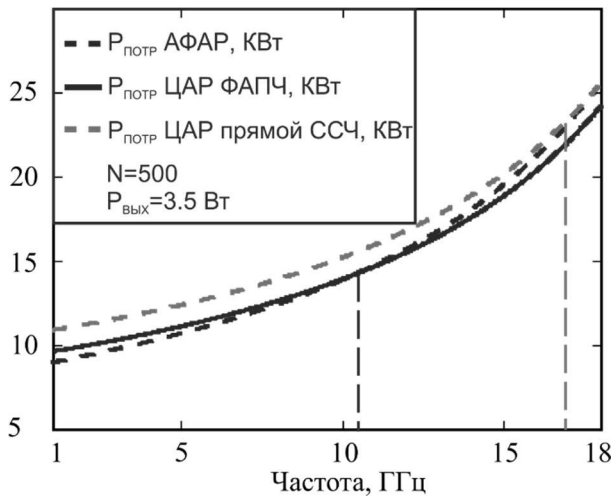
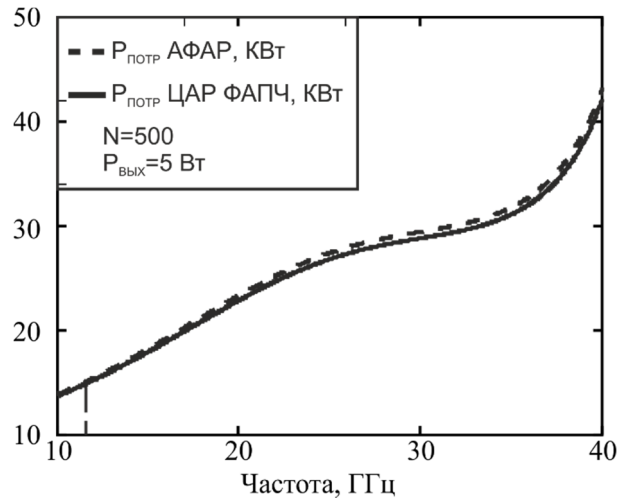


Рисунок 2 – Схема модуля ЦАР



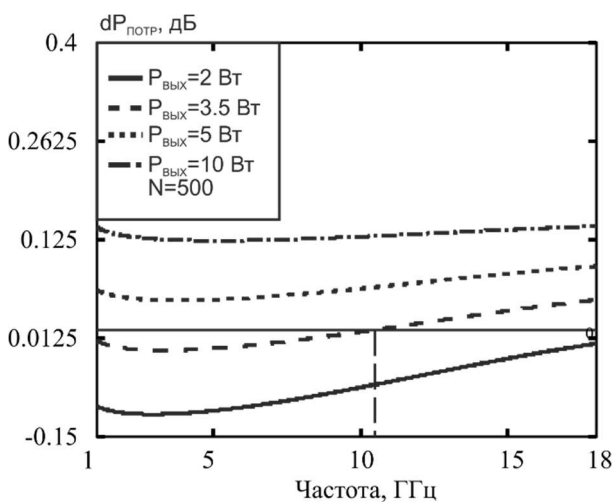
(а)



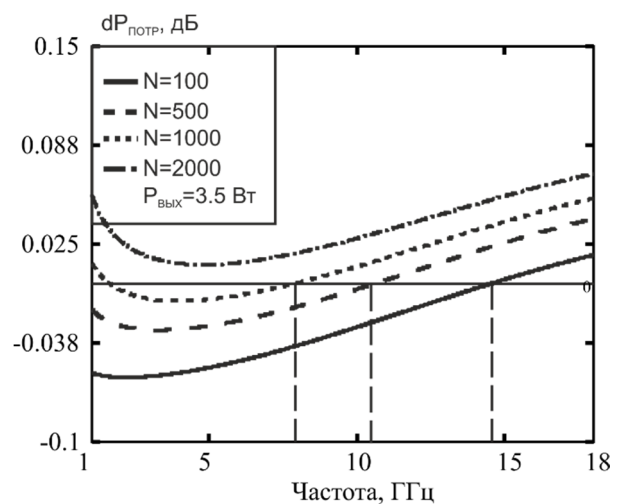
(б)

Рисунок 3 – Частотные зависимости потребляемых мощностей предложенной ЦАР и АФАР при (а) – коаксиальной и (б) волноводной разводке

За счет уменьшения КПД усилителей мощности (УМ) и возрастания потерь в СВЧ распределительной системе при увеличении частоты несущего колебания, наблюдаются области, в которых предложенная ЦАР оказывается энергетически выгоднее АФАР и наоборот. Например, при $P_{\text{ВЫХ}} = 3,5$ Вт и $N=500$ предложенная структура модуля обеспечивает снижение энергопотребления ЦАР, начиная с 10,5 ГГц (рисунок 4).



(а)



(б)

Рисунок 4 – Отношение потребляемых мощностей антенных решеток (а) – для разных выходных мощностей ППМ, (б) – для различного количества элементов сравниваемых решеток

Показано, что предложенная структура модуля обеспечивает снижение энергопотребления бортовой ЦАР на 0,1 – 0,2 дБ (3 – 5 %) в диапазоне частот 1 – 18 ГГц, по сравнению с АФАР, использующей коаксиальную разводку и на 0,05 – 0,1 дБ (2 – 3 %) в диапазоне частот 10 – 40 ГГц по сравнению с АФАР, использующей волноводную разводку. Определено, что увеличение количества излучателей решеток и выходной мощности ППМ приводит к дальнейшему снижению энергопотребления бортовой РЭС, использующей ЦАР.

Существенный вклад в энергопотребление бортовых РЭС вносит окончательный УМ передающего тракта модуля ЦАР, вопросам повышения КПД которого посвящена **Глава 3. Усилитель мощности в составе приёмопередающего модуля цифровой антенной решетки**. Обеспечение высокого КПД и требуемого уровня выходной мощности в широкой полосе рабочих частот возможно только при наличии точных нелинейных моделей транзисторов, входящих в состав УМ.

Одним из недостатков существующих моделей мощных СВЧ транзисторов является использование оптимизационных методов, что может привести к некорректному определению параметров эквивалентной электрической схемы в широкой полосе частот. В главе 3 предложен алгоритм определения параметров мощных СВЧ транзисторов, не требующий использования оптимизационных методов, а также нелинейная модель, необходимая для его реализации.

Для однозначного определения элементов эквивалентной электрической схемы была разработана нелинейная модель транзистора на тестовой плате (ТПП), а затем определены параметры модели транзистора (рисунок 5).

Элементы матрицы Z-параметров ТПП, в зависимости от частоты носят резонансный характер, определяемый резонансными свойствами линий передач в топологии тестовой платы (ТП). Базовым элементом электрической схемы ТПП является последовательный резонансный контур с потерями. Именно такая структура отражает реальное поведение транзистора в составе тестовой платы.

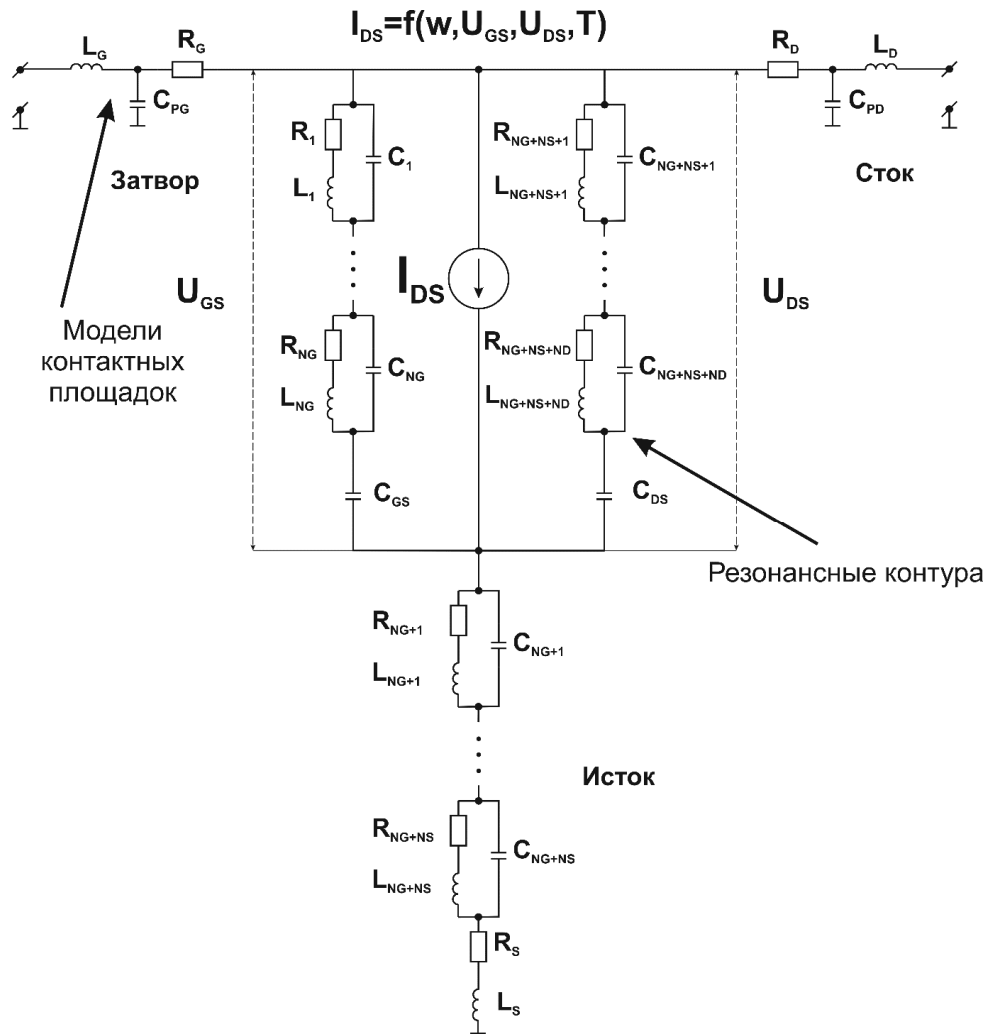


Рисунок 5 – Эквивалентная электрическая схема транзистора на тестовой плате

Для исключения процесса оптимизации предложено зависимость всех элементов резонансных контуров от напряжений смещения и питания представить полиномиальными функциями. Тогда номиналы элементов резонансных контуров запишем как:

$$\begin{aligned}
 R_i(U_{DS}, U_{GS}) &= (RG_i \cdot U_{GS}) \cdot (RD_i \cdot U_{DS}), \\
 L_i(U_{DS}, U_{GS}) &= (LG_i \cdot U_{GS}) \cdot (LD_i \cdot U_{DS}), \\
 C_i(U_{DS}, U_{GS}) &= (CG_i \cdot U_{GS}) \cdot (CD_i \cdot U_{DS}),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где i – порядковый номер резонансного контура;

$$\mathbf{U}_{GS} = \begin{bmatrix} 1 \\ U_{GS} \\ U_{GS}^2 \\ \vdots \\ U_{GS}^{P_{MAX}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_{DS} = \begin{bmatrix} 1 \\ U_{DS} \\ U_{DS}^2 \\ \vdots \\ U_{DS}^{P_{MAX}} \end{bmatrix} \text{ – векторы-столбцы напряжений затвор-}$$

исток и сток-исток соответственно, размерностью P_{MAX} ;

$\mathbf{RG}_i, \mathbf{RD}_i, \mathbf{LG}_i, \mathbf{LD}_i, \mathbf{CG}_i, \mathbf{CD}_i$ – векторы-строки соответствующих полиномиальных коэффициентов размерностью P_{MAX} ;

P_{MAX} – наибольший порядок полинома.

Моделирование импульса выходного тока ТТП осуществляется генератором постоянного тока. Учитывая особенности эквивалентной схемы ТТП и принимая во внимание результаты измерений её характеристик, мгновенное значение тока на выходе генератора (I_{DS}) определяется как:

$$I_{DS}(\omega, U_{DS}, U_{GS}, T) = I_{MAX} \cdot \tanh(c_s \cdot U_{DS}) \cdot \left(\tanh\left(b_s \cdot (U_{GS_c}(\omega, U_{DS}, U_{GS}) - \frac{U'_{GS}}{2})\right) + 1 \right) \cdot (1 - \alpha_T T) e^{-j\omega\tau}, \quad (2)$$

где I_{MAX} – максимально возможная величина тока стока, А;

b_s – крутизна зависимости тока стока от напряжения затвора;

c_s – крутизна зависимости тока стока от напряжения стока;

U'_{GS} – напряжение отсечки, В;

T – температура канала транзистора, К;

α_T – температурный коэффициент учитывающий, влияние температуры транзистора на максимальную величину тока стока, K^{-1} ;

τ – временная задержка, с.

Определение номиналов элементов, моделирующих контактные площадки транзистора, осуществляется на основе S-параметров ТТП, измеренных в “холодном” режиме при $U_{DS} = 0$.

Задача определения количества резонансных пиков соответствующих Z-параметров сводится к задаче нахождения экстремумов функции. Параметры резонансных кривых Z-параметров ТТП (резонансная частота, добротность, потери) позволяют найти соответствующие номиналы резонансных контуров:

$$R_i(U_{DS}, U_{GS}) = \frac{Re\left(\dot{Z}_{nm}(\omega_{0i}, U_{DS}, U_{GS})\right)}{Q_i^2(U_{DS}, U_{GS})}, \quad (3)$$

$$C_i(U_{DS}, U_{GS}) = \sqrt{\frac{1}{\omega_i^2(U_{DS}, U_{GS}) \cdot Re\left(\dot{Z}_{nm}(\omega_{0i}, U_{DS}, U_{GS})\right) \cdot R_i(U_{DS}, U_{GS})}}, \quad (4)$$

$$L_i(U_{DS}, U_{GS}) = Re \left(\dot{Z}_{nm}(\omega_{0i}, U_{DS}, U_{GS}) \right) \cdot R_i(U_{DS}, U_{GS}) \cdot C_i(U_{DS}, U_{GS}), \quad (5)$$

где $R_i(U_{DS}, U_{GS})$ – номинал резистора i -резонансного контура, Ом;

$C_i(U_{DS}, U_{GS})$ – номинал конденсатора i - резонансного контура, Ф;

$L_i(U_{DS}, U_{GS})$ – номинал индуктивности i - резонансного контура, Гн;

Q_i – добротность резонансной кривой.

Коэффициенты полиномиальных функций в выражении (1) находятся из решения системы нелинейных уравнений методом наименьших квадратов. Определение порядка полинома происходит итерационным методом, исходя из оценки заданной точности аппроксимации резонансных кривых. В качестве оценки сходимости аппроксимирующей функции к исходной зависимости используется критерий смешанной корреляции R^2 .

Предложенная в диссертационной работе модель ТТП позволяет определить режим работы транзистора в составе СВЧ УМ для обеспечения высокого КПД при требуемом уровне выходной мощности в заданной полосе рабочих частот. Разработанный алгоритм определения параметров ТТП позволяет найти номиналы элементов эквивалентной электрической схемы без использования методов оптимизации.

Глава 4 посвящена экспериментальным исследованиям мощных GaAs и GaN транзисторов, а также вопросам технологии и изготовления СВЧ УМ на их основе. Для проведения эксперимента была разработана тестовая плата с возможностью ручной настройки (рисунок 9), определены параметры ряда мощных отечественных и зарубежных GaAs и GaN транзисторов, составлены их нелинейные модели. С помощью критерия смешанной корреляции R^2 были рассчитаны точность моделирования, которые составили $R^2_{ВХ} = 0,97$ для и $R^2_{ВЫХ} = 0,93$ для входного и выходного сопротивлений соответственно. Графики зависимости действительной и мнимой составляющих входного и выходного сопротивления одной из созданных моделей от частоты представлены на рисунках 6 и 7 соответственно. Сплошными линиями обозначены результаты моделирования, прерывистыми – экспериментальные данные.

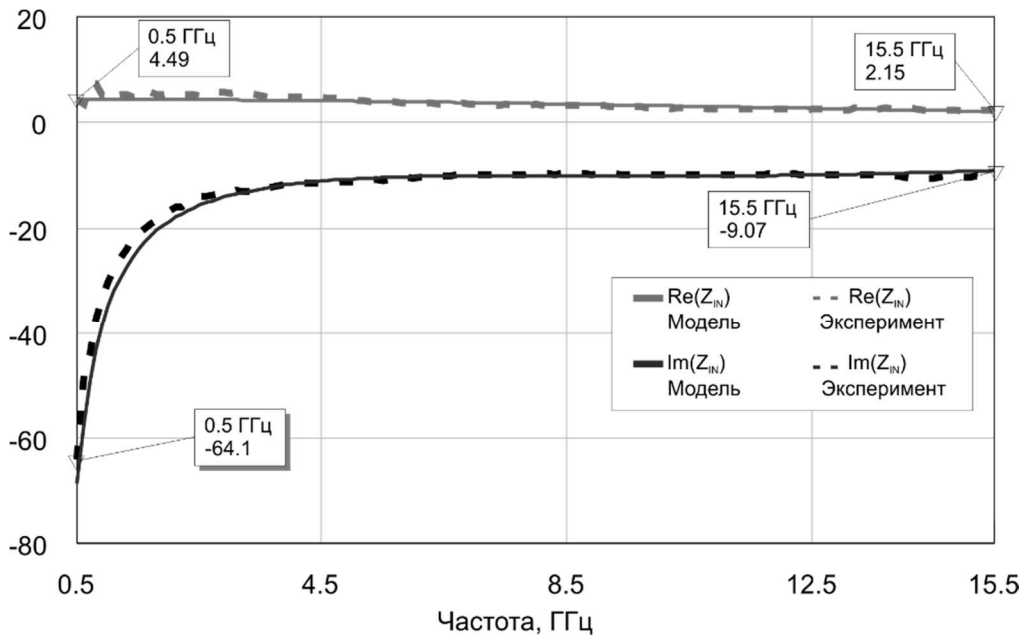


Рисунок 6 – Входное сопротивление модели и результатов измерений мощного отечественного GaAs транзистора

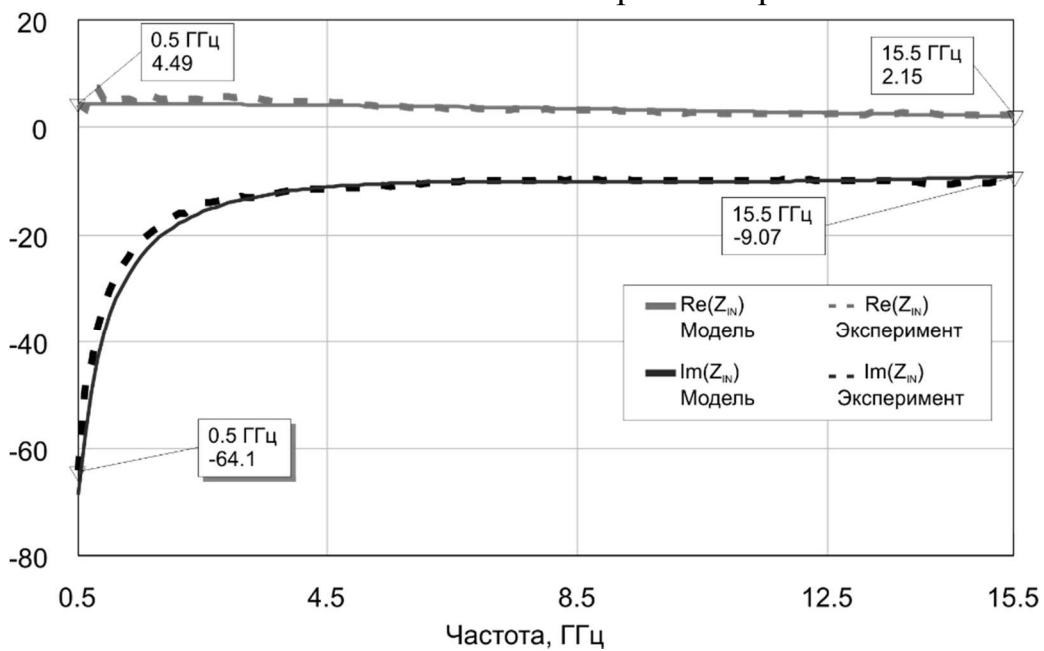


Рисунок 7 - Выходное сопротивление модели и результатов измерений мощного отечественного GaAs транзистора

На основании экспериментальных исследований описанного выше транзистора была разработана нелинейная модель Ангелова, а также модель, предложенная в диссертационной работе. Для экспериментального подтверждения результатов моделирования был осуществлен монтаж двух аналогичных транзисторов в платы СВЧ УМ, проведена их настройка для максимума выходной мощности в полосе частот 8,5 – 10,5 ГГц, а затем измерение энергетических па-

раметров. Настройка осуществлялась на основании результатов моделирования транзистора и согласующих цепей СВЧ УМ. Частотные зависимости КПД двух разработанных СВЧ УМ представлены на рисунке 8.

СВЧ УМ на основе модели Ангелова обладает максимальной выходной мощностью 1,65 Вт и КПД 31,5%. СВЧ УМ на основе предложенной в диссертационной работе модели обладает максимальной выходной мощностью 1,78 Вт и КПД 35,6%. Таким образом, предложенная нелинейная модель обеспечивает увеличение выходной мощности и КПД за счет более точного моделирования режима мощного СВЧ транзистора.

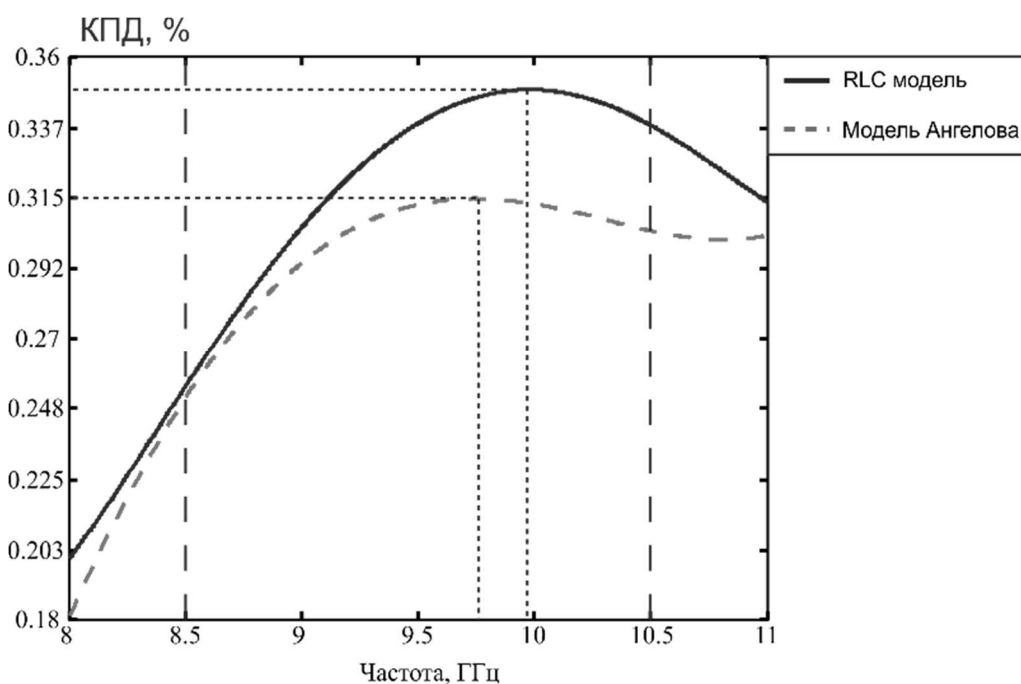


Рисунок 8 – Сравнение КПД СВЧ УМ, разработанных по модели Ангелова и модели, предложенной в диссертации

С целью экспериментального подтверждения результатов нелинейного моделирования был разработан GaN УМ (рисунок 10). Результаты эксперимента получили хорошее согласование с разработанной моделью УМ. Полоса рабочих частот усилителя составила 8,5 – 9,4 ГГц при неравномерности коэффициента усиления 0,5 дБ. Максимальный уровень выходной мощности составил 4,5 Вт при входной мощности 30 мВт.

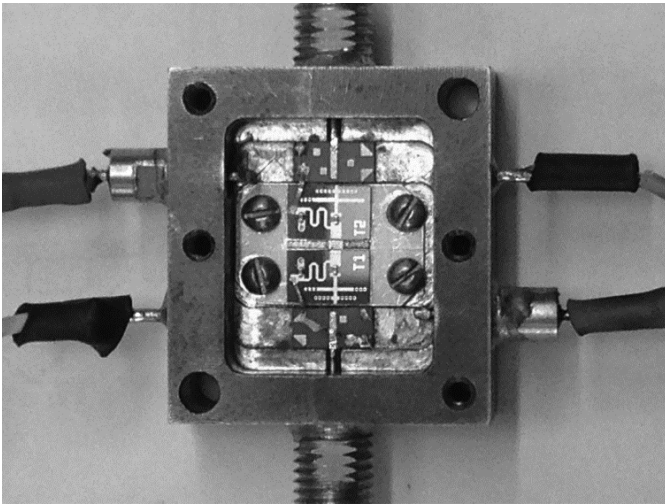


Рисунок 9 – Тестовая плата для измерения параметров мощных транзисторов

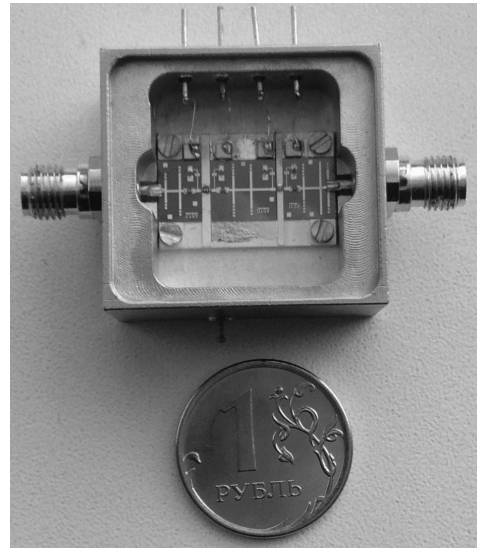


Рисунок 10 – Изготовленный образец СВЧ усилителя мощности

Были разработаны и верифицированы нелинейные модели ряда отечественных и зарубежных мощных СВЧ транзисторов. Разработана тестовая плата, обеспечивающие измерения и настройку одно – и многосекционных мощных СВЧ транзисторов в диапазоне от 100 МГц до 20 ГГц. Экспериментально показано увеличение КПД усилителей мощности, разработанных на основе предложенной в диссертационной работе модели, на 3 – 5 % в диапазоне частот 8,5 – 10,5 ГГц.

Заключение

В диссертационной работе были получены следующие результаты:

1. Предложена структура модуля, позволяющая уменьшить габариты и массу многоэлементной бортовой ЦАР за счет исключения СВЧ распределительной системы и управляемых фазовращателей.
2. Рассмотрена аналитическая модель формирователя сигналов, позволившая оценить влияние ошибок ССЧ и КМ на выходной сигнал модуля ЦАР и сформировать требования к амплитудно-фазовому балансу КМ и уровню спектральной плотности шумов СВЧ генератора несущей – ССЧ с цифровым кольцом ФАПЧ.
3. Построена модель, позволяющая провести оценку и сравнение энергопотребления традиционной АФАР и ЦАР с предложенной структурой

модуля. Результаты моделирования показали, что предложенная структура модуля обеспечивает снижение энергопотребления бортовой ЦАР на 3 – 5 % в диапазоне частот 1 – 18 ГГц при использовании коаксиальной разводки и на 2 – 3 % в диапазоне частот 10 – 40 ГГц при использовании волноводной разводки. Увеличение количества излучателей и требуемой выходной мощности приводит к дальнейшему уменьшению энергопотребления.

4. Разработана тестовая плата, обеспечивающая измерения и настройку одно – и многосекционных мощных СВЧ транзисторов в диапазоне от 100 МГц до 20 ГГц.
5. Разработаны и верифицированы нелинейные модели ряда отечественных и зарубежных мощных GaAs и GaN СВЧ транзисторов. Ошибка при моделировании входных и выходных сопротивлений транзисторов при этом составляла не более 7% в рабочей полосе частот.
6. Экспериментально подтверждено увеличение КПД и уровня выходной мощности усилителей, разработанных на основе предложенной в диссертационной работе модели, на 3 – 5 % и 8 – 10% соответственно в диапазоне частот 8,5 – 10,5 ГГц по сравнению с моделью Ангелова.
7. На основании предложенной нелинейной модели разработан СВЧ усилитель мощности, диапазон рабочих частот которого составил 8,5 – 9,5 ГГц, выходная мощность не менее 4,5 Вт, КПД не менее 47%.
8. Разработанные топологии передающего и приёмного тракта модулей ЦАР обладают малыми массогабаритными характеристиками, а также низкой стоимостью, что позволяет использовать предложенную схему модуля в бортовых РЭС.

Публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Малахов, Р.Ю. Усилители мощности цифровых антенных решеток бортовых радиоэлектронных систем / Р.Ю. Малахов // Вестник Московского Авиационного Института. – 2014. – № 2, том 21. – с. 135 – 142.

2. Малахов, Р.Ю. Приёмопередающий модуль цифровой антенной решетки / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Антенны. – 2014. – № 2 (201). – с. 53 – 57.
3. Малахов, Р.Ю. Цифровые антенные решетки для бортовых радиолокационных систем / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012, №186. – с. 176 – 183.
4. Малахов, Р.Ю. Мощные транзисторы для передатчиков бортовых радиолокационных систем / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012, №186. – с. 184 – 190.
5. Малахов, Р.Ю. Экстракция параметров мощных СВЧ транзисторов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014, №213, с. 136 – 144.
6. Малахов, Р.Ю. Цифровой приемо-передающий модуль активной фазированной антенной решетки / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Научный вестник МГТУ ГА, 2014, №213, с. 117 – 123.

Материалы международных научно-технических конференций:

7. Малахов, Р.Ю. Усилители мощности цифровых ППМ “smart” – антенн / Р.Ю. Малахов // 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2011». Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати. – 2011. – с. 200 – 201.
8. Малахов, Р.Ю. Исследование амплитудных и фазовых ошибок квадратурных модуляторов / Р.Ю. Малахов, В.К. Степанов // 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012». Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати. – 2012. – с. 323-324.
9. Малахов, Р.Ю. Моделирование мощного AlGaN/GaN усилителя X-диапазона / Р.Ю. Малахов // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2012. Севастополь, Украина. Сборник тезисов.
10. Малахов, Р.Ю. Цифровой приёмопередающий модуль интеллектуальной антенной решётки / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов, М.В. Снастин, В. К. Степанов // 23-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2013), Севастополь, Украина. – 2013. – с. 638 – 639.
11. Малахов, Р.Ю. Экстракция параметров мощных многосекционных транзисторов / Б. В. Крылов, Е. М. Добычина, Р. Ю. Малахов, Б. Б. Сергеев // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2014), Севастополь. – 2014. – с. 123-125.
12. Dobychina, E. Malachov, R.; Snastin, M. GaN pHEMT power amplifier for cellular network base station // 15th International Conference on Transparent

Optical Networks (ICTON-2013), Cartagena, Spain, 23-27 June 2013, INSPEC Accession Number:13779155, 10.1109/ICTON.2013.6602739, P. 1-4.

13. Dobychina, E. Malakhov, R.; Snastin, M. Digital transceiver module for on-board communication system // 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON-2014), Graz, Austria, 6-10 July 2014, INSPEC Accession Number:14526397, DOI:10.1109/ICTON.2014.6876333, P. 1-4.

Материалы всероссийских и других научно-технических конференций:

14. Малахов, Р.Ю. Фазовые ошибки аналоговой части передающего тракта цифровой антенной решетки / Р.Ю. Малахов // Научно-практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2011». Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: МЭЙЛЕР. – с. 57 – 58.
15. Малахов, Р.Ю. Усилитель мощности X-диапазона на AlGaIn/GaN» / Р.Ю. Малахов // 11-я Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012». Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». – 2012. – с. 105.
16. Малахов, Р.Ю. Цифровой приемо-передающий модуль бортовой активной фазированной антенной решетки / Р.Ю. Малахов, Е.М. Добычина, М.В. Снастин // 1 Всероссийская Микроволновая конференция. Москва. Доклады. – 2013. – с. 361 – 365.
17. Малахов, Р.Ю. Цифровой приёмопередающий модуль / Р.Ю. Малахов, В.К. Степанов // 3-я межвузовская студенческая конференция «Научная сессия – современная радиоэлектроника». Сборник докладов. Москва. – 2014, с. 166 – 169.

Учебные пособия:

18. Малахов, Р.Ю. Антенные решетки современных радиоэлектронных систем. Учебное пособие. / Е.М. Добычина, Е.В. Калябин, В.В. Карев, Р.Ю. Малахов и др. Москва. Изд. Доброе слово, 2015, с. 208.