

На правах рукописи



ДОБЫЧИНА ЕЛЕНА МИХАЙЛОВНА

**ЦИФРОВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2018

Диссертационная работа выполнена на кафедре 406 «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный консультант: **Воскресенский Дмитрий Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
заведующий кафедрой «Радиофизика, антенны
и микроволновая техника»

Официальные оппоненты: **Петров Александр Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор,
АО "Научно-производственное объединение
им. С.А. Лавочкина", главный научный сотрудник

Джиган Виктор Иванович,
доктор технических наук, доцент,
Национальный исследовательский университет
«МИЭТ», институт микроприборов и систем
управления, профессор

Климов Константин Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ОАО «НПО ЛЭМЗ», главный научный сотрудник

Ведущая организация: АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

Защита диссертации состоится «18» декабря 2018 года в 14 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 « ____ » _____ 2018 года

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



М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Основными направлениями совершенствования радиоэлектронных систем (РЭС) на борту летательных аппаратов (ЛА) являются: существенное расширение функциональных возможностей – многофункциональность, достижение высокого уровня информативности, повышение интеллектуальных качеств и степени автоматизации, интеграция с другим радиоэлектронным оборудованием ЛА, обеспечение работы в составе многопозиционных РЭС и комплексов защиты ЛА, радикальное повышение роли цифровой обработки информации [1 – 3]. Многофункциональность позволяет расширить круг задач, решение которых ранее обеспечивалось при одновременном размещении нескольких РЭС на борту ЛА.

Основой построения современных бортовых РЭС (БРЭС) должна стать интеллектуальная антенная система – цифровая антенная решетка (ЦАР).

Актуальность темы исследования

Необходимость интеллектуализации БРЭС обусловлена требованиями обеспечения многофункциональности и интегрированности, которые должны быть присущи перспективным радиоэлектронным комплексам ЛА, а также высокой степенью неопределенности априорных сведений об условиях работы. В наибольшей степени свойство интеллектуальности функций проявляется, во-первых, при решении задачи адаптации РЭС к быстроменяющейся внешней обстановке с целью обеспечения оптимального распределения ограниченных временных, частотных, пространственных и энергетических ресурсов по множеству обрабатываемых объектов. Во-вторых, уровень интеллектуальности приобретает принципиальное значение при действиях бортовых РЭС в условиях сложной помеховой обстановки, когда на нее оказывается непредсказуемое заранее комплексное воздействие разнообразных помех при столь же заранее неизвестной их пространственно-временной динамике. Особенно большое значение интеллектуальные способности системы имеют для вертолетов и

беспилотных ЛА, которые должны выполнять не только разведывательные и ударные задачи, но и широкий спектр задач ближайшей перспективы.

Актуальным направлением современного развития радиоэлектронной техники является переход к цифровым антенным системам, которые должны обладать высоким энергетическим потенциалом, работать в многолучевом режиме, иметь гибкое управление своими ресурсами и динамически адаптироваться в условиях пассивных и активных помех в изменяющейся электромагнитной обстановке.

Степень разработанности темы диссертации

Большой вклад в развитие теории и техники ЦАР, в том числе на борту ЛА, внесли многие отечественные и зарубежные ученые и инженеры, начиная с таких авторов, как Воскресенский Д.И., Иммореев И.Я., Слока В.К., Евстропов Г.А., Григорьев Л.Н., а также Brookner E., Josefsson L., Persson P.

Теорией цифровой обработки сигналов, а также алгоритмами адаптации в ЦАР занимались такие ученые, как Лихарев В.А., Ратынский М.В., Монзинго Р.А., Миллер Т.У. и продолжают заниматься Джиган В.И., V. Warcup, Fenn A.J.

Моделированию характеристик и вопросам построения многолучевых антенных решеток, в том числе цифровых и аналого-цифровых посвящены работы таких исследователей, как Бей Н. А., Петров А.С., Прилуцкий А. А., Фролов О.П., Kuroda M., Miura M. и др.

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

Известны работы авторов - Гуськов Ю.Н., Гупта Д., Муханов О., Магил Е., по разработке ППМ, в состав которых входят прямые цифровые синтезаторы сетки частот (ССЧ). Однако проблемы со стабильностью частоты в таких синтезаторах делают их неприемлемыми для бортовых РЭС.

Несмотря на то, что изучению и анализу характеристик самих ЦАР и их составных частей посвящено достаточно большое количество публикаций, в

основном они носят теоретический характер или ограничиваются частными случаями конкретных применений и измерений.

В целом вопросам анализа принципов построения ЦАР посвящено много работ, однако в связи с переходом к практической реализации проектов ЦАР, особенно для бортовых РЭС, необходимо решить ряд научных и технических проблем, таких как обеспечение высокого уровня излучаемой мощности с ограниченной апертуры антенной решетки; построение надежных полупроводниковых приемопередающих модулей (ППМ) на активных элементах с высоким КПД, коэффициентом усиления по мощности и стабильной фазовой характеристикой в широкой полосе частот, минимально возможным уровнем внеполосного излучения; разработка методов проектирования ЦАР с учетом минимизации массы, габаритов, стоимости.

В то время, как термин ЦАР зачастую используется для обозначения антенных решеток, в которых аналого-цифровому преобразованию подвергается уже сформированная аналоговым путем диаграмма направленности (ДН), в данной работе под ЦАР понимается согласно ГОСТу «антенная решетка с поэлементной обработкой сигналов, в которой сигналы от излучающих элементов решетки подвергаются аналого-цифровому преобразованию с последующей обработкой по определенным алгоритмам».

В настоящее время в мире ведутся активные работы по исследованию структуры цифрового приемопередающего модуля (ЦППМ) активной антенной фазированной решетки (АФАР), 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.

Выбор способа построения модуля для многоэлементных бортовых ЦАР недостаточно представлен в открытых публикациях, и требует дополнительного исследования. Использование цифрового диаграммообразования (ЦДО) обычно

сдерживается не только сложностью цифрового управления и синхронизации, но также и большой потребляемой мощностью модуля, что является недопустимым в бортовых РЭС.

Поиск путей построения оптимальной структуры как цифровой, так и СВЧ частей бортовой ЦАР, при которой возможно увеличение энергетического потенциала и уменьшение энергопотребления многофункциональной РЭС является актуальной задачей.

Цель диссертационной работы и решаемые научно-технические задачи

Целью работы является разработка принципов построения и схемотехнической реализации бортовой цифровой антенной решетки многофункциональной радиоэлектронной системы, а также моделей и путей создания новых устройств, в том числе цифровых приемопередающих модулей, позволяющих повысить энергетический потенциал, уменьшить уровень боковых лепестков, снизить энергопотребление, минимизировать массогабаритные характеристики системы за счет использования высокоэффективных технологий, методов расчета и моделирования.

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

1. разработка путей построения и схемотехнической реализации цифровой антенной решетки бортовой радиоэлектронной системы, работающей в условиях ограниченного энергопотребления, имеющей минимальные массу и размеры;
2. анализ и количественная оценка энергетических характеристик бортовой ЦАР и сравнение их с АФАР традиционной архитектуры;
3. разработка методологии построения и схемотехнической реализации передающего тракта ППМ для цифровой антенной решетки БРЭС на активных элементах с высокими уровнями выходной мощности, КПД и коэффициентом усиления по мощности, стабильной амплитудно-фазовой характеристикой в широкой полосе частот, низким уровнем фазовых шумов, а также разработка методики его проектирования с учетом минимизации массы, габаритов, стоимости;

4. развитие метода моделирования нелинейных процессов в мощных многосекционных псевдоморфных СВЧ транзисторах для цифровых ППМ на основе интерпретации результатов их экспериментальных исследований;

5. разработка математической модели мощного активного элемента (АЭ) с протяженной псевдоморфной структурой для достижения максимального КПД и требуемого усиления в рабочей полосе частот;

6. экспериментальное исследование мощных СВЧ усилителей на псевдоморфных транзисторах для подтверждения эффективности использования их в составе передающего тракта модуля ЦАР;

7. изыскание принципов построения и схемотехнической реализации приемного тракта ППМ цифровой антенной решетки БРЭС на основе использования процедур малоразрядной дискретизации для снижения вычислительных затрат и увеличения быстродействия РЭС;

8. развитие метода и разработка устройства калибровки для прецизионного управления амплитудно-фазовым распределением в раскрыве многоканальной ЦАР;

9. разработка имитационных моделей ЦАР, экспериментальное исследование примеров цифрового диаграммообразования и точностных характеристик калибровки ЦАР.

Методология и методы исследования

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

Программная реализация алгоритмов управления измерительным комплексом, сбора и обработки данных при проведении экспериментальных исследований, имитационного моделирования процесса калибровки ЦАР

осуществлялось с помощью уникального программного обеспечения и в среде MATCAD.

Объектом исследования являются антенные решетки с цифровым формированием и обработкой сигнала (ЦАР).

Предметом исследования являются ЦАР и ЦППМ, характеристики, математические и имитационные модели радиосистем на основе ЦАР.

Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем.

1. Предложены технические решения для создания нового класса приемопередающих антенных решеток с цифровым диаграммообразованием без применения аналоговых фазовращателей и распределительной системы СВЧ сигнала.

2. Проведено сравнение характеристик цифровых и аналоговых АР и показаны основные преимущества и недостатки ЦАР.

3. Разработан цифровой приемопередающий модуль, позволяющий снизить энергопотребление, массу и габариты бортовой ЦАР за счет размещения в нем высокостабильного источника СВЧ сигнала с фазовой автоподстройкой от единого для всей ЦАР опорного сигнала.

4. Развита методика нелинейного моделирования мощных многосекционных псевдоморфных СВЧ транзисторов для извлечения их параметров путем соответствия результатам экспериментальных исследований.

5. Разработана методика определения элементов эквивалентной электрической схемы мощного АЭ на плате, позволяющая увеличить точность определения его параметров по сравнению с существующими методиками.

6. Предложены принципы построения и схемотехнической реализации приемного тракта ППМ цифровой антенной решетки БРЭС на основе использования процедур малоразрядной дискретизации для снижения вычислительных затрат и увеличения быстродействия РЭС.

7. Разработано новое устройство калибровки для прецизионного управления амплитудно-фазовым распределением в раскрытии многоканальной ЦАР.

8. Разработан и апробирован принцип построения экспериментального стенда для исследования возможностей цифрового диаграммообразования в антенном измерительно-вычислительном комплексе на базе безэховой камеры, созданной в научно-производственном центре радиоинформационной метрологии (НПЦ РИМ) факультета «Радиоэлектроники ЛА» МАИ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что полученные в процессе работы над диссертацией результаты являются основой для разработки бортовых ЦАР многофункциональных комплексов, обеспечивающих повышение их энергетического потенциала, реализацию динамической адаптации рабочей зоны на основе оперативного перенацеливания приемо-передающих лучей, повышение чувствительности приемного тракта ЦАР при отказе от громоздкой системы обработки СВЧ сигнала, реализацию программно-реконфигурируемой архитектуры РЭС.

Предложенный в работе алгоритм определения параметров мощных СВЧ транзисторов и нелинейная модель АЭ служат 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 плате.

Предложено новое техническое решение, в котором реализована возможность проведения калибровки многолучевых ЦАР в штатном режиме, не прекращая выполнение основных функций решетки и всей РЭС в целом. Разработанный алгоритм калибровки ЦАР позволяет получать высокую производительность и сходимость процесса для различных отношений сигнал/шум и объемов выборки, обеспечивая точность наведения каждого луча ЦАР на порядок выше, чем в аналоговых системах.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы Добычиной Е.М., связанные с организацией процедуры калибровки, в соответствии с предложенным в работе

алгоритмом были использованы при выполнении работ по перенацеливанию станций спутниковой связи на предприятии АО «ВИСАТ-ТЕЛ».

Научные результаты диссертационной работы были использованы на предприятии АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» в разработке гибридно-интегральных GaN усилителей мощности сантиметрового диапазона длин волн, что позволило повысить их КПД и коэффициент усиления по мощности.

В Научном центре специальных радиоэлектронных систем и менеджмента МАИ (НЦ СРМ МАИ) нелинейная модель мощного псевдоморфного СВЧ транзистора была использована при разработке усилителя мощности для многофункциональной бортовой радиолокационной системы (МБРЛС), тема 450-10/41360-15550.

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 дисциплинам «Устройства генерирования и формирования сигналов»; «Передающие модули СВЧ и оптического диапазона», «Генераторы колебаний с управляемыми параметрами», а также с 1994 по 2016 год вошли в состав 9-ти учебных пособий.

Внедрение результатов диссертационной работы подтверждается соответствующими актами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Цифровые антенные решетки позволяют повысить энергетический потенциал бортовой РЭС, а также снизить энергопотребление на 5–10 % по сравнению с АФАР за счет увеличения коэффициента усиления и КПД предложенного цифрового приемопередающего модуля (Пат. 157114 Российская Федерация), при снижении габаритов и массы решетки, в результате исключения СВЧ распределительной системы и управляемых фазовращателей.

2. Алгоритм определения параметров, а также соответствующая ему нелинейная модель мощного активного элемента на плате на основе параллельных резонансных контуров, позволяют улучшить энергетические

характеристики цифрового приемопередающего модуля путём увеличения КПД усилителей мощности на 10–15%, а уровня выходной мощности на 8 – 10 %.

3. Устройство, реализующее коммутационный метод калибровки, применительно к многолучевой бортовой ЦАР (Пат. 166501 Российская Федерация), в котором устранено влияние дестабилизирующих факторов, вносящих неконтролируемые случайные амплитудные и фазовые ошибки в формирование ДН, позволяет повысить точность наведения каждого луча до долей ширины ДН ЦАР в штатном режиме, не прекращая выполнение основных функций решетки и всей РЭС в целом.

4. Результаты экспериментальных измерений и имитационного моделирования приемной ЦАР в БЭК на частотах 3 ГГц и 10 ГГц при наличии шумов подтверждают, что использование цифровой обработки в каждом канале при осуществлении моноимпульсной пеленгации источника излучения повышает точность определения угла прихода сигнала до долей ширины ДН, а также позволяет проводить калибровку ЦАР с точностями, превышающими существующие аналоговые системы, за одну итерацию.

Достоверность результатов работы обеспечивается:

- корректным использованием методов теории вероятности и математической статистики;
- строгим использованием математического аппарата для всех полученных научных результатов, соответствием в определенных случаях полученных результатов результатам других авторов, опубликованным в отечественной и зарубежной литературе;
- экспериментальной проверкой предложенных математических моделей и совпадением в частных случаях результатов имитационного моделирования с полученными аналитическими решениями;
- использованием измерительных средств и оборудования, прошедших метрологическую аттестацию.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Международных научно-практических конференциях:

15th, 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Cartagena, Spain, 2013 / Graz, Austria, 2014; с 17-й по 26-ю Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, с 2008 г. по 2017 г.; 14-й и 17-й Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, в 2008 г. и 2011 г.; 12-й и 14-й Международных конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2010 /2012» , Москва, в 2010 г. и 2012 г.; 10-й, 11-й, 14-й, 15-й Международных конференциях «Авиация и космонавтика – 2011/2012/2015/2016», Москва, в 2010 г., 2012 г., 2015 г., 2016 г.; XLII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения-2016», Москва, в 2016 г.;

Всероссийских научно-технических конференциях:

Конференции Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С.Попова: научная сессия, посвященная дню радио, Москва, 2010 г.; конференции Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С.Попова: цифровая обработка сигналов и ее применение, Москва, 2011г.; 1-й Всероссийской Микроволновой конференции, Москва, 2013 г.; Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике-2015», Москва, 2015 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Расплетинские чтения – 2016» Москва, 2016 г.; конференции «Иосифьяновские чтения 2017», Истра, 2017 г.

Публикации по теме диссертации

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 61 работе, из них 4 монографии, 9 учебных пособий, 13 статей в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России, сделано 32 доклада на международных и всероссийских конференциях, 12 опубликованы в изданиях, входящих в системы Scopus и Web of Science, 8 работ опубликовано без соавторов, получено 2 патента РФ на полезную модель, 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора

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

Постановка и проведение ряда экспериментальных измерений, связанных с моделированием принципов работы и процедуры калибровки ЦАР, выполнены совместно с инженером научно-производственного центра радиоинформационной метрологии (НПЦ РИМ) МАИ М.В. Снастиным. Часть экспериментальных результатов и модель мощного СВЧ транзистора получена вместе с к.т.н. Р.Ю. Малаховым.

В работах, опубликованных в соавторстве, соискатель предложила методы решения задач, разработала методики и программно-алгоритмические средства обработки результатов экспериментов, математические модели, алгоритмы моделирования, провела анализ и интерпретацию полученных результатов.

Структура и объём работы

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений, содержит 158 рисунков, 150 формул, 22 таблицы. Объём работы 284 страницы машинописного текста. Список использованных источников содержит 205 наименований.

Соответствие работы паспорту специальности

Работа соответствует паспорту специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии», пункт 2 «Исследование характеристик антенн и СВЧ устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т. д.», пункт 6 «Разработка и исследование новых технологий производства, настройки и эксплуатации антенных систем».

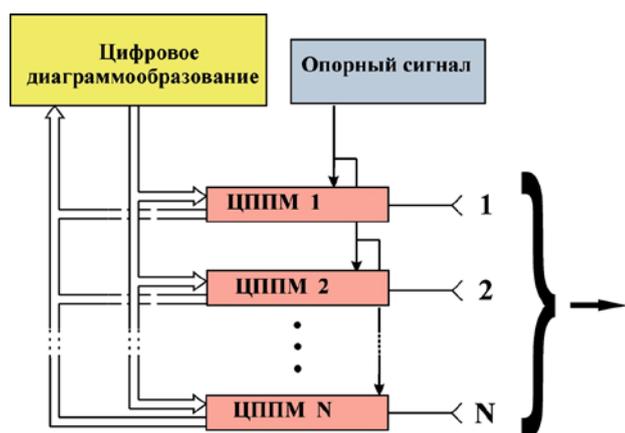
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений.

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, определена цель работы и решаемые научно-технические задачи. Приведены научная новизна и практическая ценность работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 Антенные решетки с цифровым диаграммообразованием – новый класс антенных систем обосновано свойство интеллектуальных качеств перспективных ЦАР, позволяющих им решать задачи, в которых отсутствуют четко формализованные правила обработки информации, и обучаться в процессе функционирования, что является новым научно-техническим направлением в радиоэлектронной системотехнике, результаты развития которого создают основу для резкого повышения эффективности применения многофункциональных ЛА.

Предложен принцип построения ЦАР, структура которой показана на рисунке 1. В ней отсутствует система разводки СВЧ сигнала; по существу это набор ЦППМ, объединенных только системой цифровых линий передачи, соединяющих их с модулем цифрового диаграммообразования (ЦДО), в котором формируются в цифровом виде команды для реализации амплитудного и фазового распределения ЦАР. Фазирование каналов осуществляется с помощью высокостабильного опорного сигнала, единого для всей решетки [2,3,4]. Проведен



аналитический обзор элементной базы цифровых АР, который показал возможность их реализации в различных диапазонах частот, включая СВЧ [8,10,12]. Показано, что практическое применение ЦАР в настоящее время определяется допустимой стоимостью элементов.

Рисунок 1 – Цифровая антенная решетка

Для оценки энергетических характеристик ЦАР выбрана структура модуля, показанная на рисунке 2, исследованию которого посвящена вторая глава настоящей работы. В первой главе детализация его передающего тракта позволила провести сравнение энергетики ЦАР и АФАР традиционной

архитектуры. Основным показателем эффективности выбрана мощность, потребляемая составными частями антенной решетки [14,15,17,18,28, 29,33,34].

Использование ЦППМ позволяет уменьшить габариты и массу многоэлементной бортовой ЦАР за счет исключения СВЧ распределительной системы и управляемых фазовращателей (УФВ) [35,36]. Кроме синтезатора сетки частот (ССЧ) с цифровым кольцом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и традиционных усилителей мощности (УМ) с согласующе-трансформирующими цепями (СТЦ) в состав каждого модуля входит микроконтроллер (МК), позволяющий оперативно изменять параметры выходного сигнала модуля. В качестве устройства управления амплитудно-фазовым распределением ЦАР выступает квадратурный модулятор (КМ).

Особенность приемного тракта модуля – применение АЦП непосредственно на несущей частоте в каждом канале решетки [37,54]. При этом исключаются операции преобразования частоты, детектирования сигналов с выделением огибающей, тем самым уменьшаются энергетические потери, повышается чувствительность приемной системы и упрощается конструкция модуля.

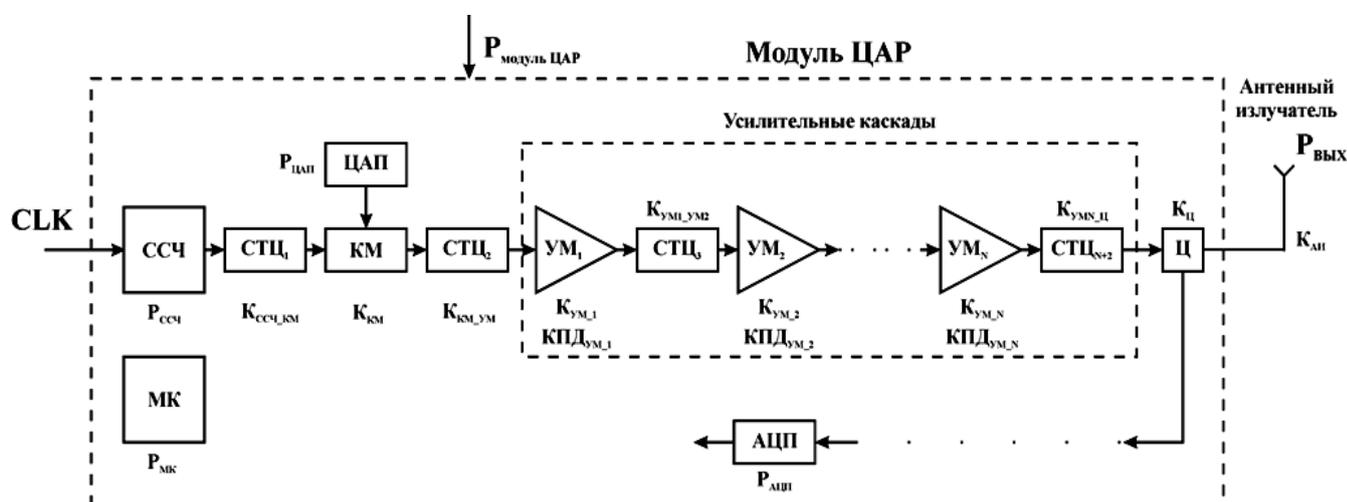


Рисунок 2 – Детализация передающего тракта цифрового ППМ

На рисунке 3 показаны частотные зависимости потребляемых мощностей АФАР и ЦАР для частного случая выходной мощности модуля $P_{\text{ВЫХ}} = 3,5$ Вт, числа элементов решетки $N = 500$ с использованием (а) - коаксиальной и (б) – волноводной разводки.

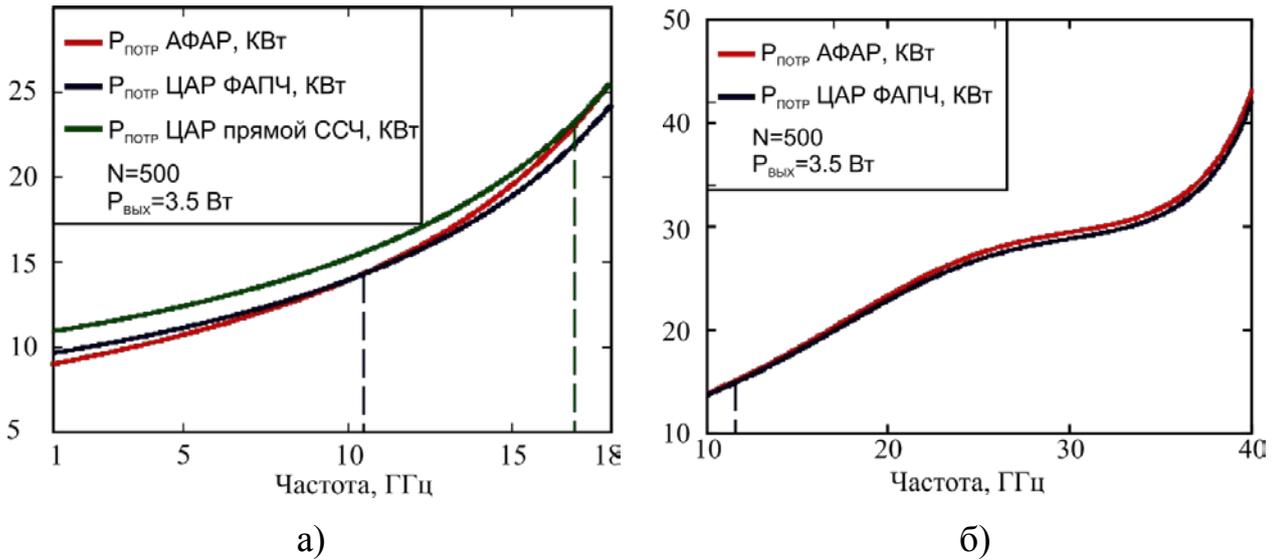


Рисунок 3 – Потребляемые мощности АФАР и ЦАР

За счет уменьшения КПД УМ и возрастания потерь в СВЧ распределительной системе при увеличении частоты несущего колебания, наблюдаются области, в которых ЦАР оказывается энергетически выгоднее АФАР. Результаты моделирования показали, что предложенная структура ЦППМ обеспечивает снижение энергопотребления бортовой ЦАР на 5 – 10 % в диапазоне частот 1 – 18 ГГц при использовании коаксиальной разводки и на 3 – 5 % в диапазоне частот 10 – 40 ГГц при использовании волноводной разводки.

Увеличение количества излучателей и требуемой выходной мощности приводит к дальнейшему выигрышу в энергопотреблении для ЦАР. Для определения условий энергетического выигрыша ЦАР рассмотрено влияние различных параметров антенной решетки на частотную зависимость мощности потребления. Для этого введен параметр $dP_{\text{ПОТР}}$ – энергетический выигрыш:

$$dP_{\text{ПОТР}}(f, N, P_{\text{ВЫХ}}) = 10 \log \left(\frac{P_{\text{ПОТР}_{\text{АФАР}}}(f, N, P_{\text{ВЫХ}})}{P_{\text{ПОТР}_{\text{ЦАР}}}(f, N, P_{\text{ВЫХ}})} \right), \text{ дБ} \quad (1)$$

Влияние $P_{\text{ВЫХ}}$ передающего тракта модуля на энергетический выигрыш представлено на рисунке 4 для (а) – коаксиальной и (б) – волноводной разводки.

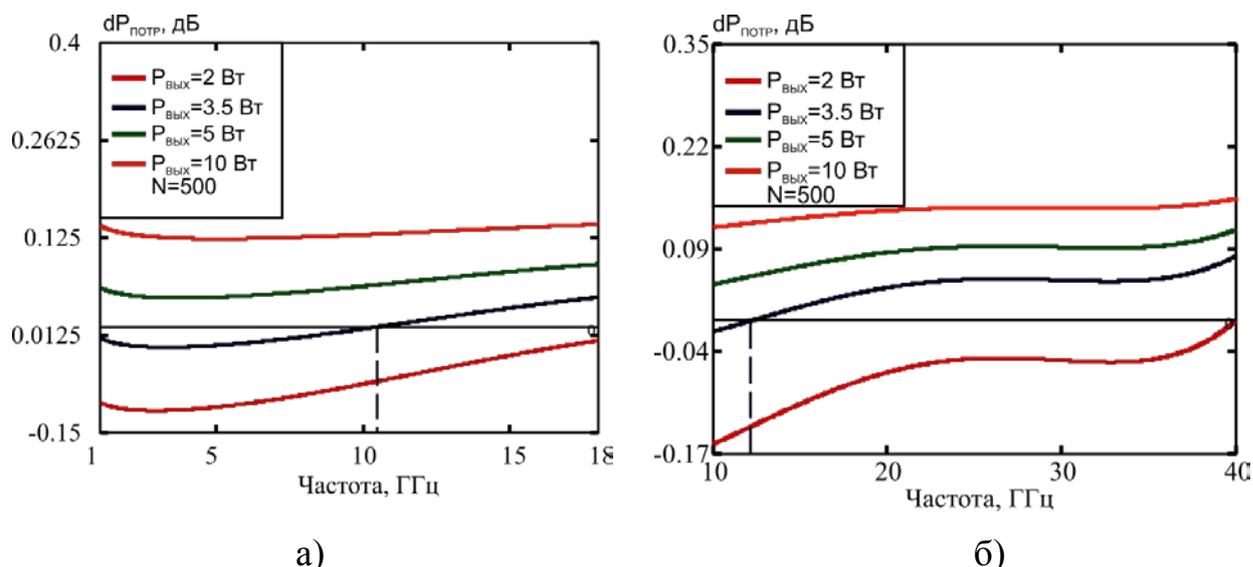


Рисунок 4 – Частотная зависимость $dP_{\text{Потр}}$ при различных значениях $P_{\text{ВЫХ}}$

Повышение выходной мощности ППМ приводит к более раннему по частоте выигрышу ЦАР по энергетическим характеристикам. Для антенной решетки с 500 каналами, при $P_{\text{ВЫХ}} = 3,5$ Вт рассматриваемый вариант построения модуля ЦАР оказывается более энергоэффективным, начиная с 10,5 ГГц для коаксиальной и 12,8 ГГц для волноводной разводки.

Влияние количества элементов антенной решетки на $dP_{\text{Потр}}$ представлено на рисунке 5 для (а) – коаксиальной и (б) – волноводной разводки.

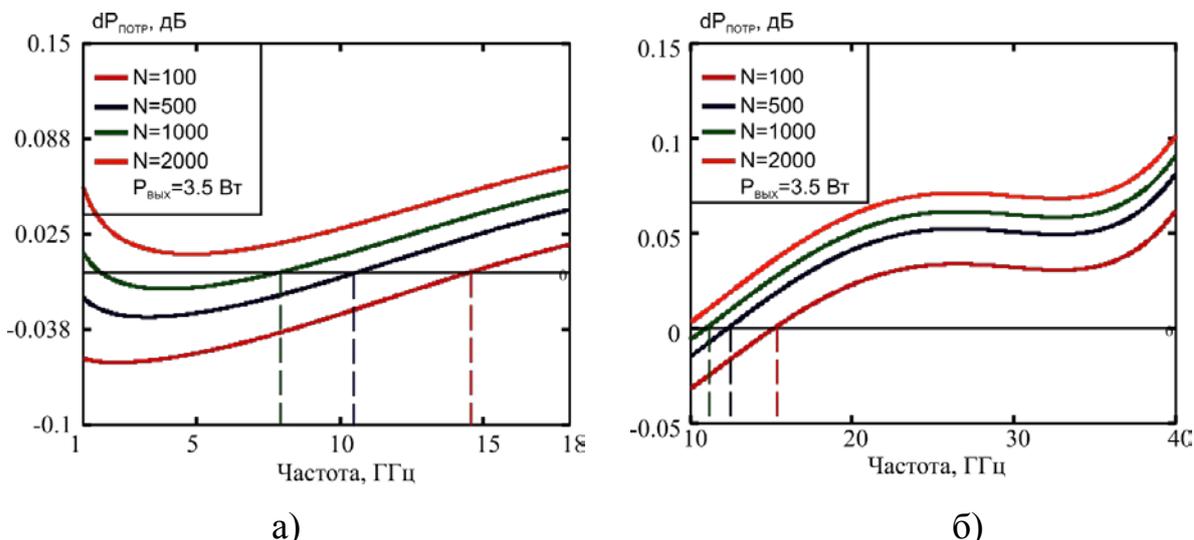


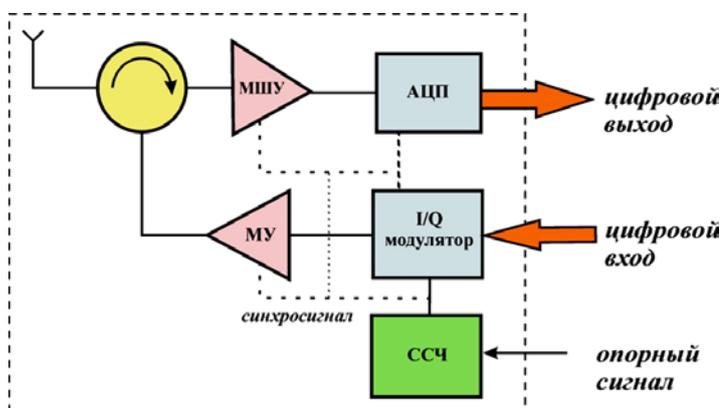
Рисунок 5 – Частотная зависимость $dP_{\text{Потр}}$ при различных значениях N

Показано влияние на энергопотребление ЦАР выходного усилителя мощности (УМ) в составе передающего тракта, КПД которого определяет энергетическую эффективность использования предложенного модуля в составе бортовой ЦАР.

В работе также обобщены принципы построения и схемотехнической реализации приемного тракта ЦППМ цифровой антенной решетки БРЛС на основе использования процедур малоразрядной дискретизации для снижения вычислительных затрат и увеличения быстродействия РЭС.

В Главе 2 **Приемопередающие тракты цифровых антенных решеток на борту летательных аппаратов** проведенный анализ современного состояния ППМ антенных решеток показал, что реализация основных функций бортовой ЦАР – адаптивность, многолучевость, самокалибровка – возможна только со структурой модуля, в которую входит ССЧ, ЦАП, АЦП и КМ в качестве устройств формирования АФР решетки [21,23,27,42,43,55]. Разработана аналитическая модель формирователя сигналов, позволившая оценить влияние ошибок ССЧ и КМ на выходной сигнал модуля и обосновать требования к амплитудно-фазовому балансу КМ и уровню спектральной плотности мощности шумов СВЧ генератора несущей – ССЧ с цифровым кольцом ФАПЧ [16,26].

Предложено новое техническое решение – приемопередающий модуль бортовой цифровой антенной решетки, позволяющий увеличить энергетический потенциал многоэлементной бортовой ЦАР, за счет увеличения коэффициента усиления и КПД модуля, при снижении габаритов и массы в результате исключения СВЧ распределительной системы и УФВ. Обобщенная структурная схема предлагаемого в диссертационной работе модуля ЦАР [59] представлена на рисунке 6. Преобразование СВЧ сигнала в цифровую форму в приёмном тракте



модуля ЦАР осуществляется непосредственно на несущей частоте. Частота дискретизации АЦП при этом должна быть больше или равна требуемой частоте выборки приёмного сигнала [37].

Рисунок 6 – Структурная схема модуля ЦАР

В зависимости от предъявляемых к ЦАР требований возможно несколько вариантов построения СВЧ трактов модуля. Наиболее предпочтительной для

построения передающего тракта ЦППМ является схема с использованием ССЧ с цифровым кольцом ФАПЧ, показанная на рисунке 7 [21].

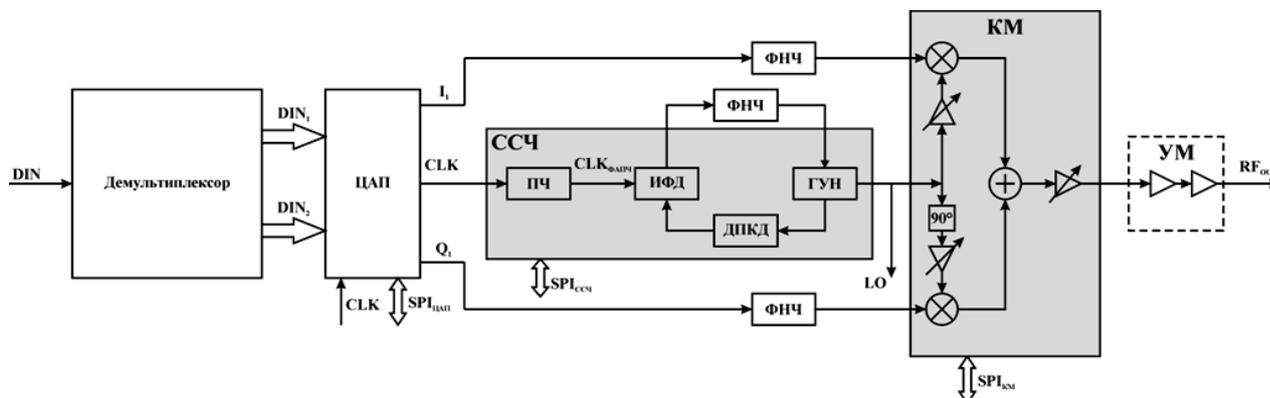


Рисунок 7 – Структурная схема передающего тракта модуля ЦАР с ССЧ на основе цифрового кольца ФАПЧ

Использование такого синтезатора в передающем тракте модуля ЦАР позволяет без дополнительных частотных преобразований формировать СВЧ сигнал вплоть до миллиметрового диапазона длин волн. Использование трех устройств – ФАПЧ, ЦАП и КМ – вместо одного прямого цифрового ССЧ, обеспечивает большую гибкость в получении высокой скорости управления АФР, дискрету фазы, амплитуды и фазовым шумам [16].

При высоких требованиях к динамическому диапазону системы приёмный тракт модуля целесообразно реализовать без частотного преобразования (Рис. 8).

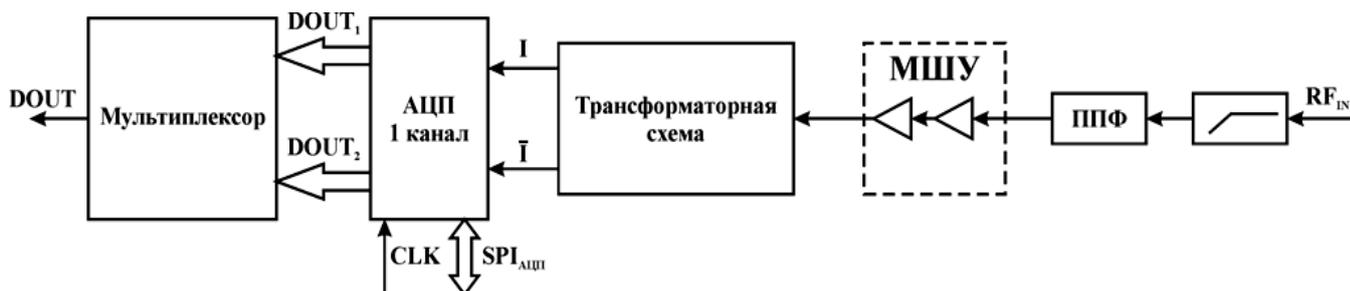


Рисунок 8 – Структурная схема приёмного тракта ЦППМ с преобразованием на несущей при использовании трансформаторной схемы

Основным каскадом аналоговой части передающего тракта модуля ЦАР, определяющим его энергетическую эффективность, является усилитель (УМ) на мощном активном элементе (АЭ) [19,22]. Единственным направлением повышения его эффективности является использование многосекционных

псевдоморфных СВЧ активных приборов на основе широкозонных материалов, например GaN, в которых при правильном выборе режима можно получать КПД свыше 70%. Использование традиционных моделей, хорошо адаптированных для АЭ на GaAs, не позволяют достигать потенциальных показателей в новом приборе. В работе был развит метод моделирования нелинейных процессов в мощных многосекционных псевдоморфных СВЧ транзисторах для ЦППМ на основе интерпретации результатов их экспериментальных исследований. Основой нового алгоритма является использование в качестве объекта не самого АЭ, а АЭ на плате (АЭП) (Рис. 9). Это позволяет за счет учета резонансных явлений в АЭП получать параметры оптимального режима для достижения высоких КПД и КУ, что невозможно при использовании традиционных моделей. Предложенный алгоритм позволяет найти значения элементов эквивалентной схемы самого АЭ в широкой полосе частот при различных значениях напряжений питания и смещения [5,6,7,39,44].

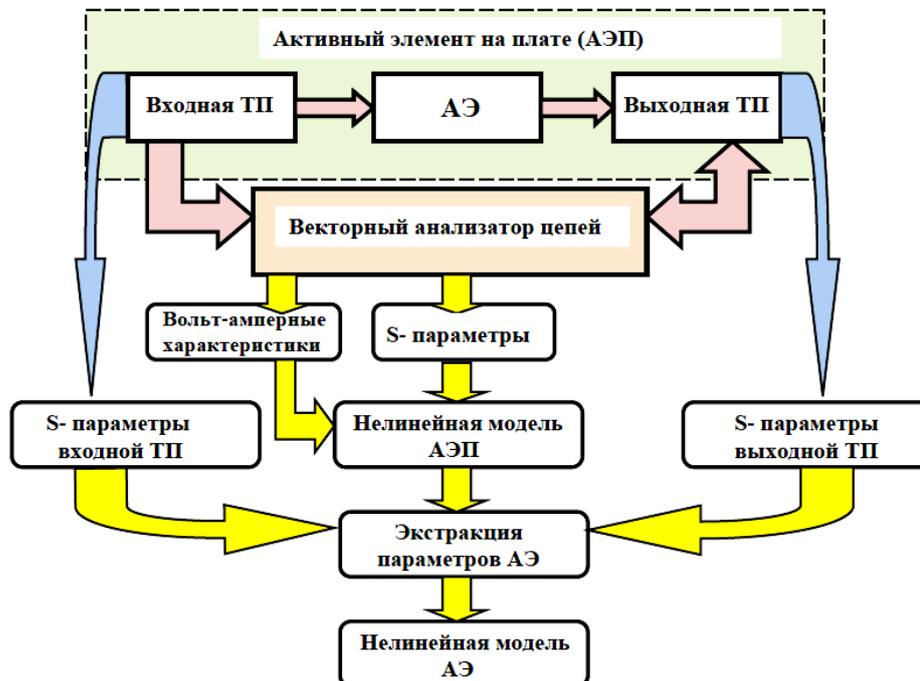


Рисунок 9 – Алгоритм нелинейного моделирования мощного СВЧ АЭ

Предлагаемая эквивалентная электрическая схема АЭП для случая мощного полевого транзистора представлена на рисунке 10. 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:

$$\begin{aligned} R_i(U_{DS}, U_{GS}) &= (\mathbf{RG}_i \cdot \mathbf{U}_{GS}) \cdot (\mathbf{RD}_i \cdot \mathbf{U}_{DS}), \\ L_i(U_{DS}, U_{GS}) &= (\mathbf{LG}_i \cdot \mathbf{U}_{GS}) \cdot (\mathbf{LD}_i \cdot \mathbf{U}_{DS}), \\ C_i(U_{DS}, U_{GS}) &= (\mathbf{CG}_i \cdot \mathbf{U}_{GS}) \cdot (\mathbf{CD}_i \cdot \mathbf{U}_{DS}), \end{aligned} \quad (2)$$

где i – порядковый номер резонансного контура;

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

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.

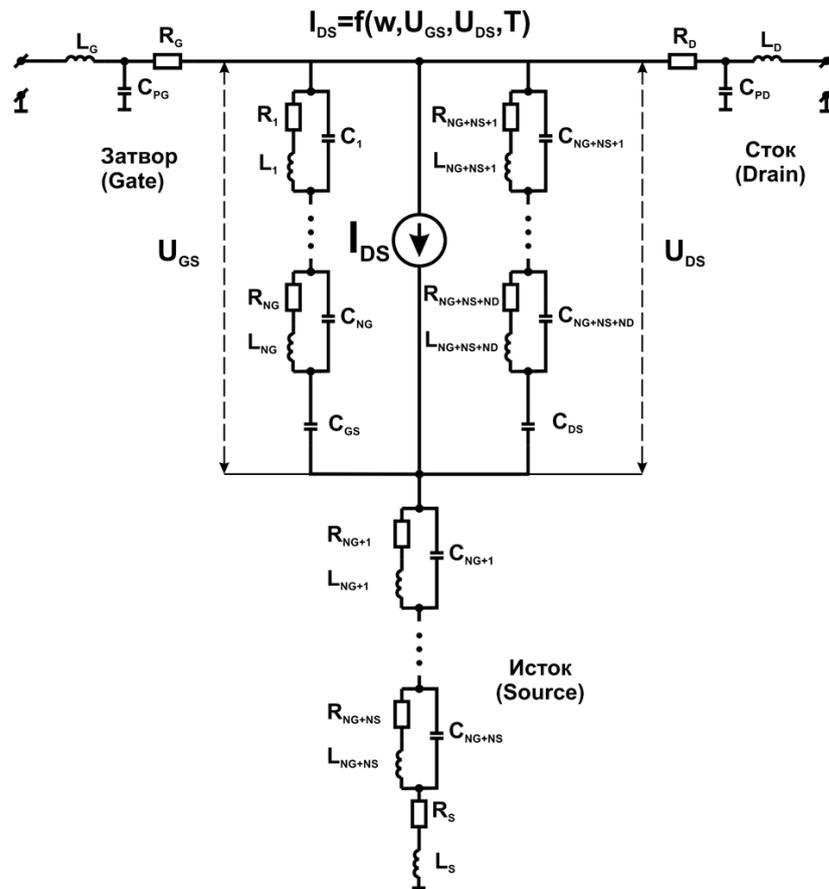


Рисунок 10 – Эквивалентная электрическая схема мощного АЭ на плате

Учитывая особенности эквивалентной схемы АЭП и принимая во внимание результаты измерений её характеристик, мгновенное значение тока на выходе генератора (I_{DS}) определяется как:

$$I_{DS}(\omega, U_{DS}, U_{GS}, T) = I_{MAX} \cdot \tanh(c_s \cdot U_{DS}) \cdot \left(\tanh\left(b_s \cdot (U_{GS_c}(\omega, U_{DS}, U_{GS}) - \frac{U'_{GS}}{2})\right) + 1 \right) \cdot (1 - \alpha_T T) e^{-j\omega\tau}, \quad (3)$$

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 АЭП, измеренных в “холодном” режиме при $U_{DS} = 0$.

Задача определения количества резонансных пиков соответствующих Z-параметров сводится к задаче нахождения экстремумов функции $Re(\dot{Z}_{nm}(\omega, U_{DS}, U_{GS}))$. Для этого необходимо найти нули первой частной производной функции:

$$Re(\dot{Z}_{nm}(\omega, U_{DS}, U_{GS}))' = \left. \frac{dRe(\dot{Z}_{nm}(\omega, U_{DS}, U_{GS}))}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_1} = \lim_{\omega \rightarrow \omega_1} \frac{Re(\dot{Z}_{nm}(\omega, U_{DS}, U_{GS})) - Re(\dot{Z}_{nm}(\omega_1, U_{DS}, U_{GS}))}{\omega - \omega_1}, \quad (4)$$

$\dot{Z}_{nm}(\omega, U_{DS}, U_{GS})$ – внутренние \dot{Z}_{nm} параметры АЭП на частоте ω , при постоянном напряжении на затворе, равном U_{GS} и напряжении питания, равном U_{DS} . Параметры резонансных кривых Z-параметров АЭП (резонансная частота, добротность, потери) позволяют найти соответствующие номиналы резонансных контуров:

$$R_i(U_{DS}, U_{GS}) = \frac{Re(\dot{Z}_{nm}(\omega_{0i}, U_{DS}, U_{GS}))}{Q_i^2(U_{DS}, U_{GS})}, \quad (5)$$

$$C_i(U_{DS}, U_{GS}) = \sqrt{\frac{1}{\omega_i^2(U_{DS}, U_{GS}) \cdot Re(\dot{Z}_{nm}(\omega_{0i}, U_{DS}, U_{GS})) \cdot R_i(U_{DS}, U_{GS})}}, \quad (6)$$

$$L_i(U_{DS}, U_{GS}) = Re(\dot{Z}_{nm}(\omega_{0i}, U_{DS}, U_{GS})) \cdot R_i(U_{DS}, U_{GS}) \cdot C_i(U_{DS}, U_{GS}), \quad (7)$$

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 (2) 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 .

Разработана нелинейная модель мощного АЭ на плате, позволяющая оптимизировать режим его работы в составе СВЧ УМ для обеспечения высоких КПД и КУ при требуемой выходной мощности в заданной полосе рабочих частот.

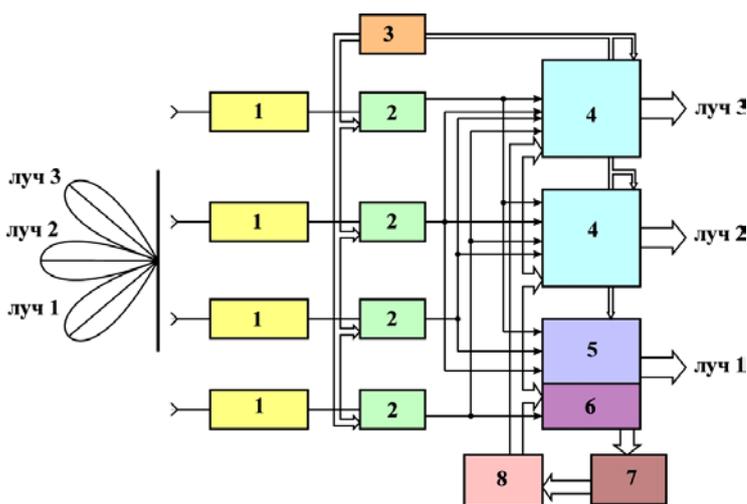
Модель можно использовать при разработке СВЧ УМ в САПР, где используется метод гармонического баланса для анализа нелинейных электрических цепей (AWR, ADS). Для оценки точности предложенной нелинейной модели и алгоритма определения её параметров необходимо экспериментальное исследование ряда мощных СВЧ транзисторов с различным количеством секций, частотным диапазоном и уровнем выходной мощности, которое было проведено и представлено в 4 главе настоящей работы.

В Главе 3 Калибровка цифровых антенных решеток на борту летательных аппаратов проведенный аналитический обзор существующих в настоящее время систем калибровки антенных решеток СВЧ показывает, что их

использование в ЦАР не обеспечивают нормальное функционирование всей радиосистемы, т.к. не позволяет осуществлять эту процедуру в рабочем режиме.

Предложено новое техническое решение – устройство, реализующее коммутационный метод калибровки, применительно к многолучевой бортовой ЦАР, в котором исключен ряд аналоговых устройств, таких как аттенюаторы, управляемые фазовращатели, узкополосный фильтр и квадратурный детектор для измерения мощности, вносящих неконтролируемые случайные амплитудные и фазовые ошибки в формирование ДН [60]. Показано, что это решение позволяет повысить точность наведения каждого луча ЦАР до долей градуса [1,11,20].

Показана возможность проведения калибровки в многолучевых ЦАР в штатном режиме, не прекращая выполнение основных функций решетки и всей РТС в целом. Выявлены временные затраты на обслуживание процедуры калибровки ЦАР. Изменение фазовых состояний калибруемых каналов циклично – оно ограничивается четырьмя ортогональными значениями, что уменьшает время калибровки до десятков микросекунд, в зависимости от числа элементов решетки, а использование алгоритма максимального правдоподобия даёт оптимальную точность оценок. Упрощенная структурная схема предложенного устройства представлена на рисунке 11. На схеме обозначено: 1 – аналоговая СВЧ



приемная (передающая) часть одного канала АР; 2 – аналого-цифровой преобразователь для приемного и цифро-аналоговый преобразователь для передающего канала АР соответственно; 3 – источник цифрового сигнала синхронизации; 4 – цифровой сигнальный процессор (ЦСПК), формирующий калибруемый луч; 5 – блок калибровки в составе ЦСПК; 6 – блок расчета калибрационных поправок в составе блока калибровки; 7 – блок расчета амплитудных и фазовых коэффициентов в составе блока калибровки.

Рисунок 11 – Устройство калибровки ЦАР

Процесс калибровки заключается в измерении мощностей P_0, P_{180}, P_{90} и P_{270} , соответствующих фазам калибруемого канала $\Phi_0, \Phi_{180}, \Phi_{90}$ и Φ_{270} . Получены выражения для оценок фазовых и амплитудных погрешностей калибруемого канала [30,32,53]

$$\widehat{\delta}_k = \tan^{-1} \left(\frac{P_{270} - P_{90}}{P_0 - P_{180}} \right), \quad (8)$$

$$\widehat{A}_k = \frac{\sqrt{(P_{270} - P_{90})^2 + (P_0 - P_{180})^2}}{4A_c}. \quad (9)$$

и для фазовых и амплитудных ошибок самого процесса калибровки

$$\widehat{\sigma}_\delta^2 = \frac{N_0 B}{4MP_k} \left(1 + \frac{N_0 B}{2P_k(N-1)^2} \right), \quad (10)$$

$$\widehat{\sigma}_A^2 = \frac{N_0 B}{2M} \left(1 + \frac{N_0 B}{2P_k(N-1)^2} \right), \quad (11)$$

где $P_k = A_k^2/2$ – мощность сигнала в калибруемом канале.

Построены зависимости оценок среднеквадратических ошибок фазовой и амплитудной коррекции от отношения сигнал/шум в калибруемом канале для различного числа M выборок принимаемого (передаваемого) сигнала (рис.12, 13)

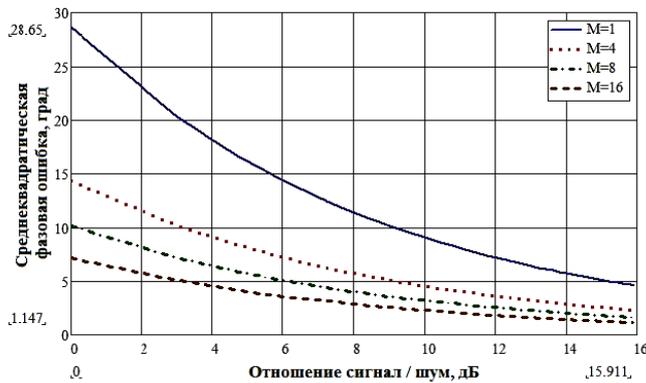


Рисунок 12 – Фазовая ошибка калибровки

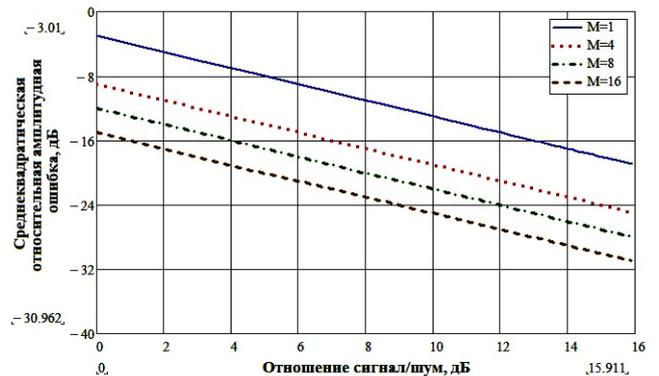


Рисунок 13 – Относительная амплитудная ошибка калибровки

Разработаны математическая и имитационная модели системы калибровки с учётом ошибок в управлении и дискретизации. Несколько примеров результатов имитационного моделирования показаны на рисунках 14, где красной линией на графиках изображается изменение абсолютной фазовой ошибки калибровки δ_{abs} , которая характеризует процесс добавления фазового набега в цикле моделирования. Синей линией показана динамика относительной фазовой

ошибки калибровки $\hat{\delta}_k^{(i)} - \hat{\delta}_k^{(i-1)}$, которая и иллюстрирует процесс окончания калибровки с заданной фазовой точностью. Параметрами для разных изображенных процессов сходимости процесса калибровки (а – г) служат: SNR – отношение сигнал/шум в калибруемом канале; M – число выборок калибровочного сигнала за одно фазовое состояние в процессе калибровки; $\hat{\delta}_k^{(0)}$ – начальная фазовая ошибка в калибруемом канале; ζ – ошибка управления фазовым состоянием в калибруемом канале.

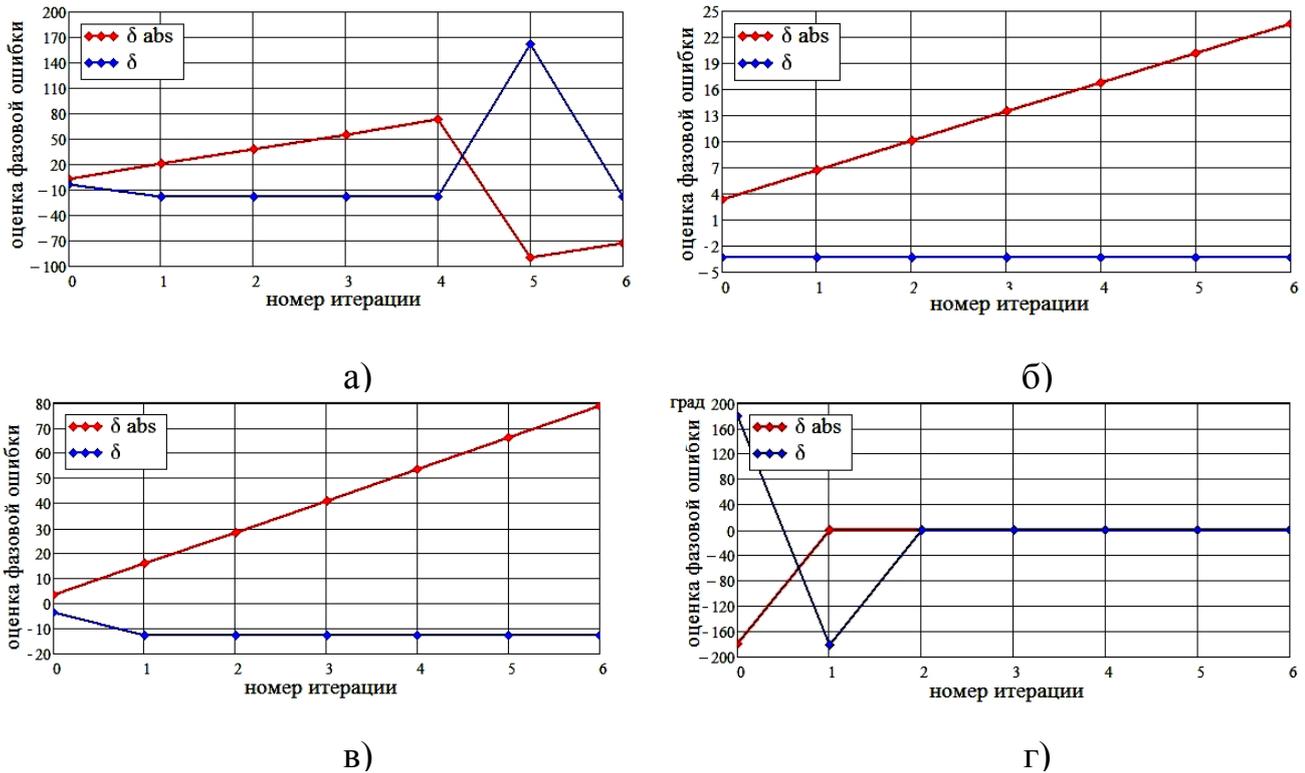


Рисунок 14 – Примеры сходимости процесса калибровки при

а) SNR = 10 дБ, $M = 8$, $\hat{\delta}_k^{(0)} = 3.2^\circ$, $\zeta \leq 45^\circ$; б) SNR = 10 дБ, $M = 8$, $\hat{\delta}_k^{(0)} = 3.2^\circ$, $\zeta = 0^\circ$; в) SNR = 10 дБ, $M = 8$, $\hat{\delta}_k^{(0)} = 3.2^\circ$, $\zeta \leq 8^\circ$; г) SNR < 0 дБ, $M = 1$, $\hat{\delta}_k^{(0)} = 180^\circ$, $\zeta = 0^\circ$

Анализ процессов сходимости, изображенных на графиках для разных параметров калибруемой системы и отношения сигнал/шум принимаемого сигнала, показывает, что влияние ошибок управления аналогично уменьшению отношения сигнал/шум. Во всех приведенных примерах метод сходится дифференциально за 1–2 итерации.

В диссертации разработан алгоритм процесса калибровки ЦАР, рассмотрены примеры реализации этой процедуры на примере спутниковой ЦАР.

В Главе 4 Результаты экспериментальных исследований элементов цифровых антенных решеток и возможностей цифрового диаграммообразования приведены основные результаты экспериментальных измерений, подтверждающие основные выводы и положения, сформулированные в предыдущих главах диссертационной работы.

Разработаны и верифицированы нелинейные модели партии отечественных и зарубежных мощных GaAs и GaN СВЧ транзисторов. Для проведения измерений была разработана плата в корпусе, фотография АЭ на этой плате представлена на рисунке 15. Проведена экстракция параметров мощного отечественного СВЧ GaN транзистора производства ОАО “Светлана” (рис. 16).

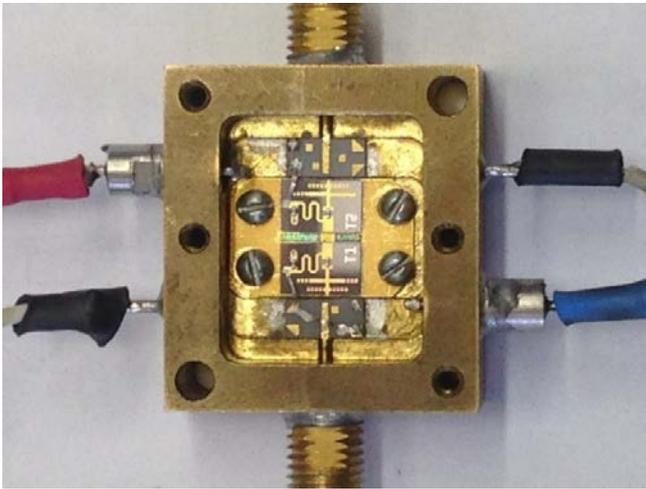


Рисунок 15 – АЭП в корпусе

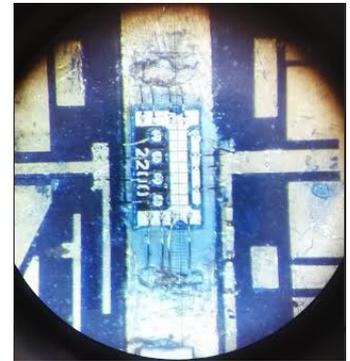


Рисунок 16 – Отечественный многосекционный СВЧ GaN транзистор в составе УМ

Графики зависимостей активной и реактивной составляющих входного и выходного сопротивления транзистора от частоты представлены на рисунках 17 и 18 соответственно.

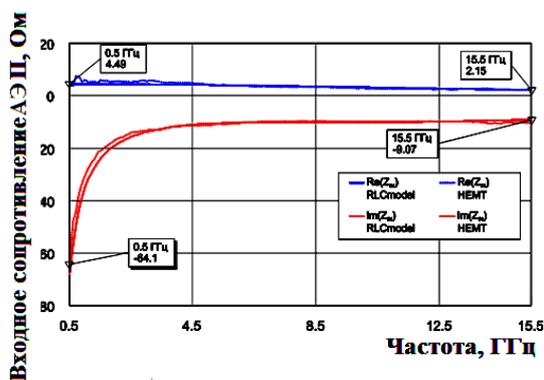


Рисунок 17 – Верификация входного сопротивления АЭП

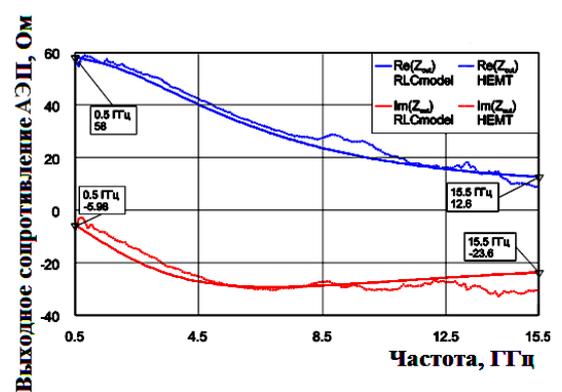


Рисунок 18 – Верификация выходного сопротивления АЭП

Среднеквадратическая ошибка при моделировании входных и выходных сопротивлений транзисторов составила не более 4% в рабочей полосе частот.

Экспериментально подтверждено увеличение КПД и уровня выходной мощности усилителей, разработанных на основе предложенной в диссертационной работе модели, на 10 – 15 % и 15 – 20% соответственно в диапазоне частот 8,5 – 10,5 ГГц по сравнению с моделью Ангелова (Рис. 19, 20).

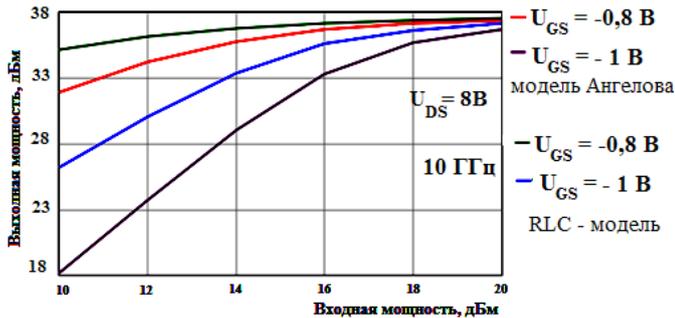


Рисунок 19 – Сравнение выходной мощности

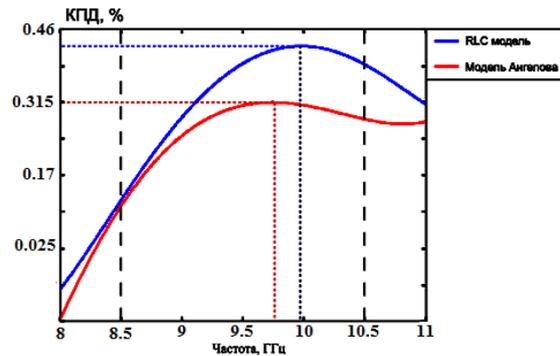


Рисунок 20 – Сравнение КПД СВЧ УМ

На основании предложенной нелинейной модели разработан СВЧ усилитель мощности (Рис. 21), диапазон рабочих частот которого составил 8,5 – 10,5 ГГц, выходная мощность от 4 до 5 Вт, максимальный КПД – 47%. Разработаны топологии передающего (Рис. 22) и приёмного тракта модуля ЦАР, обладающие малыми массогабаритными характеристиками, а также низкой стоимостью, что позволит использовать предложенную структуру модуля в ЦАР бортовых РЭС [9,13,31,48,49].

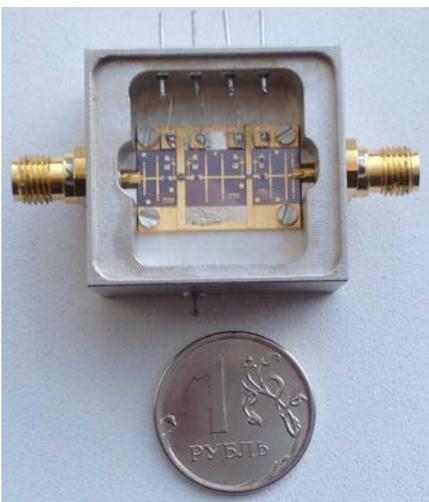


Рисунок 21 СВЧ усилитель мощности

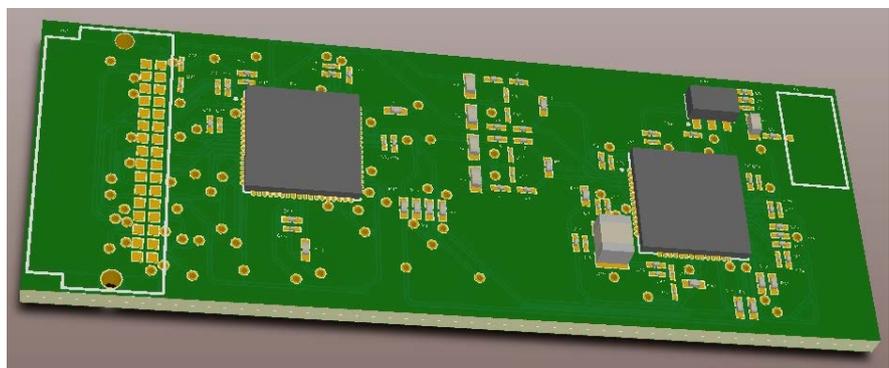


Рисунок 22 – Плата цифровой части передающего тракта модуля

В экранированной безэховой камере (БЭК) [24,25,31,38,41,45,46,47] с использованием установки планарного сканирования антенны проведена серия экспериментов, в результате которых полностью цифровым образом построены суммарные и разностные цифровые диаграммы направленности ЦАР (Рис. 23 – 28), воспроизведен режим пеленгации источника излучения с определением угла прихода сигнала с точностью до тысячных долей ширины ДН ЦАР[50,51,52,56].

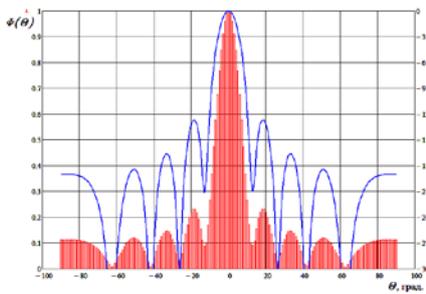


Рисунок 23 – ДН экспериментальной ЦАР, угол прихода 0 град.

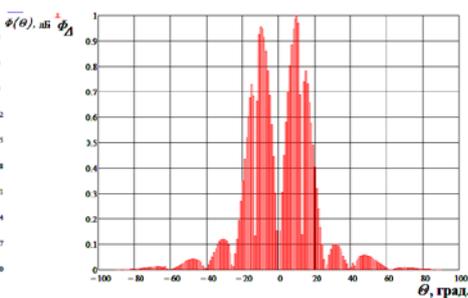


Рисунок 24 – Разностная ДН экспериментальной ЦАР, угол прихода 0 град.

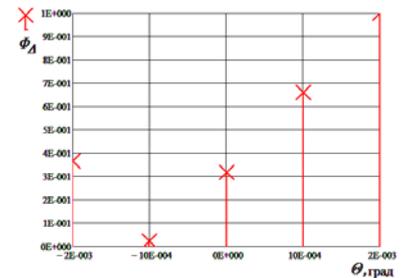


Рисунок 25 – Разностная ДН экспериментальной ЦАР, шаг выборки 0,01 град.

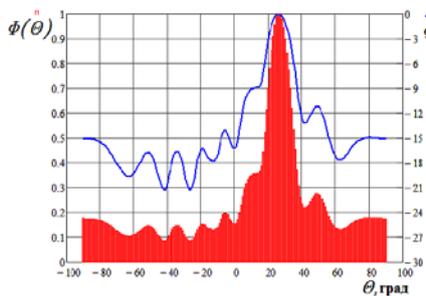


Рисунок 26 – ДН экспериментальной ЦАР, угол прихода 26 град.

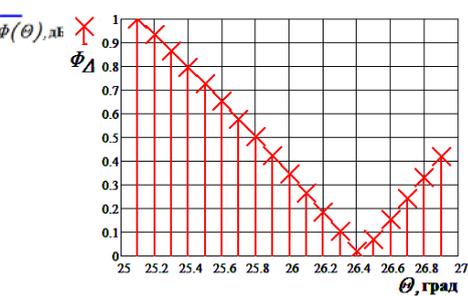


Рисунок 27 – Разностная ДН экспериментальной ЦАР, шаг выборки 0,1 град. угол прихода 26,4 град.

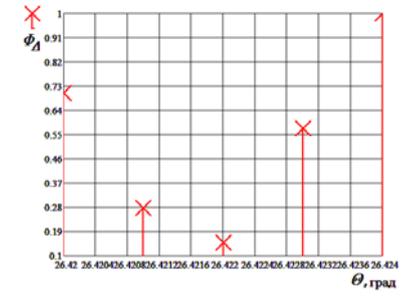


Рисунок 28 – Разностная ДН экспериментальной ЦАР, шаг выборки 0,001 град. угол прихода 26,422 град.

В экранированной БЭК проведена серия экспериментов для подтверждения теоретических положений о возможности калибровки цифровых решеток в процессе их основной работы с точностями, превышающими существующие аналоговые системы.

Получены экспериментальные данные, подтверждающие теоретические положения о возможности проведения диагностики антенной системы с

погрешностью определения фазовой ошибки $\widehat{\Delta\delta}_k = 0,5$ градусов за одну итерацию калибровки (Рис. 29, 30).

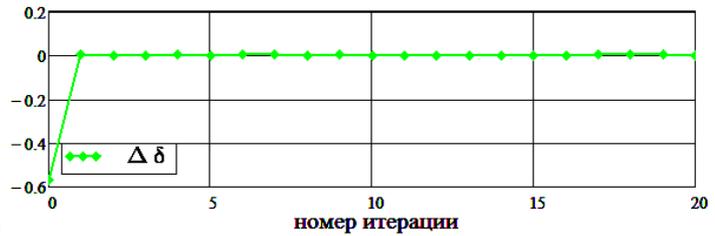
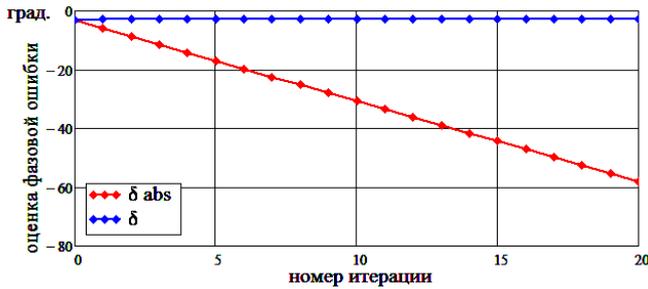


Рисунок 29 – Сходимость процесса калибровки экспериментальной ЦАР

Рисунок 30 – Результирующая фазовая ошибка экспериментальной ЦАР

Результаты натурального моделирования [58] послужили основой для разработки устройства калибровки многолучевой антенной решетки [60].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Обоснован переход от иерархической аналого-цифровой структуры активной решетки к распределенной, где интегрированные с излучателем цифровые ППМ связаны между собой только цифровыми системами синхронизации, управления и диаграммообразования, что позволяет рационально распределять ресурсы высокочастотной энергии, повышает энергетический потенциал и реализует возможность гибкого управления амплитудно-фазовым распределением (АФР) в раскрыве решетки.

2. Предложено новое устройство – цифровой приемопередающий модуль (ЦППМ), содержащий в передающем тракте источник СВЧ - сигнала, квадратурный модулятор и осуществляющий в приемном тракте аналого-цифровое преобразование на несущей частоте, позволяющий в составе многоэлементной бортовой ЦАР уменьшить её габариты и массу минимум в два раза за счет исключения СВЧ распределительной системы, аттенюаторов и управляемых фазовращателей.

3. Разработана математическая модель, позволившая доказать энергетическую эффективность ЦАР, построенной на основе предложенного ЦППМ перед АФАР, выявив диапазоны частот, число элементов решетки,

выходные мощности модулей и число каналов в них, при которых энергопотребление ЦАР становится ниже на 5 – 10 %, чем в АФАР, а энергетический выигрыш определяется ростом КПД выходного мощного усилителя передающего тракта модуля.

4. Разработана аналитическая модель формирователя СВЧ сигнала передающего тракта ЦППМ, позволившая оценить влияние амплитудных и фазовых ошибок синтезатора сетки частот (ССЧ) и квадратурного модулятора (КМ) в его составе на амплитуду и фазу выходного сигнала модуля и сформировать требования к амплитудно-фазовому балансу КМ и уровню спектральной плотности мощности шумов ССЧ с цифровым кольцом ФАПЧ.

5. Развита метод моделирования нелинейных процессов в мощных многосекционных псевдоморфных СВЧ транзисторах для ЦППМ на основе интерпретации результатов их экспериментальных исследований.

6. 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 4 % в рабочей полосе частот.

7. На основании предложенной нелинейной модели разработан СВЧ усилитель мощности, диапазон рабочих частот которого составил 8,5 – 10,5 ГГц, выходная мощность от 4 до 5 Вт, максимальный КПД – 47%.

8. Экспериментально подтверждено увеличение КПД и уровня выходной мощности усилителей, разработанных на основе предложенной в диссертационной работе модели, на 10 – 15 % и 15 – 20% соответственно в диапазоне частот 8,5 – 10,5 ГГц по сравнению с моделью Ангелова.

9. Развита статистическая теория калибровки амплитудно-фазового распределения в раскрытии многоканальной АР, для случая предложенной цифровой решетки; получены выражения для оценок фазовых и амплитудных погрешностей калибруемого канала и для фазовых и амплитудных ошибок самого процесса калибровки.

10. Новое техническое решение – устройство, реализующее коммутационный метод калибровки, применительно к многолучевой бортовой

ЦАР, в котором устранено влияние дестабилизирующих факторов, вносящих неконтролируемые случайные амплитудные и фазовые ошибки в формирование ДН, позволяет повысить точность наведения каждого луча ЦАР до долей ширины ДН в штатном режиме, не прекращая выполнение основных функций решетки и всей РТС в целом.

11. Получены результаты экспериментальных исследований и имитационного моделирования цифровой решетки, доказывающие возможность полностью цифровыми методами осуществлять пеленгацию источника излучения с определением угла прихода сигнала с точностью до сотых долей ширины ДН, а также проведена диагностика модели цифровой антенной системы с погрешностью определения фазовой ошибки $\widehat{\Delta\delta}_k = 0,5$ градусов за одну итерацию калибровки.

Таким образом, решена важная научная проблема, внесшая вклад в исследование и разработку нового класса антенных систем – цифровых антенных решеток, предназначенных для бортовых радиоэлектронных комплексов, позволяющих повысить их энергетический потенциал за счет оптимизации режима работы высокоэффективных активных устройств и обеспечения высокой точности формирования АФР с помощью устройства калибровки.

Для дальнейшей разработки темы необходимо обосновать энергетическую целесообразность многолучевой работы ЦАР на передачу; реализовать экспериментальную модель предложенного в работе ЦППМ и исследовать его характеристики; провести практические опыты по аналого-цифровым преобразованиям на несущих частотах СВЧ-диапазона, а также по синхронизации распределенной системы цифровых процессоров для ЦДО, в том числе посредством беспроводных сетей. Представляются перспективными для дальнейших исследований также вопросы реализации алгоритмов сверхразрешения в ЦАР и создания конформных антенных систем для интеграции с поверхностью носителя. Эффективность работ в указанных направлениях будет определяться прогрессом в совершенствовании технологий цифровой элементной базы, повышением её быстродействия при снижении массы габаритов и стоимости.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Монографии, учебники и учебные пособия**

1. Добычина, Е.М. Калибровка ЦАР бортовых РЛС / Е.М. Добычина // Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2010-2012 / А.В. Авласенок, П.А. Агеев, М.В. Акимова и др.; под ред. Ю.И. Белого. – М.: Радиотехника, 2011. – Раздел 4.29. – С. 695 – 699.
2. Добычина, Е.М. Цифровые антенные решетки и скоростные аналого-цифровые преобразователи / Е.М. Добычина, Ю.В. Кольцов. – М.: Издательство МАИ, 2012. – 168 с.
3. Добычина, Е.М. Цифровые антенные решетки в бортовых радиолокационных системах / Е.М. Добычина, Ю.В. Кольцов. – М.: Издательство МАИ, 2013. – 160 с.
4. Добычина, Е.М. Построение цифровых антенных решеток для современных радиоэлектронных систем / Е.М. Добычина, П.А. Шмачилин // Научно-технические серии. Выпуск: Устройства СВЧ и антенные системы. Книга 3. Активные и цифровые антенные решетки и их элементы. Коллективная монография; под ред. А.Ю. Гринева – М.: Радиотехника, 2014. – 172 с.
5. Добычина, Е.М. Автоматизированное проектирование генераторных каскадов: Учебное пособие / Г.П. Земцов, Р.А. Грановская, Е.М. Добычина. – М.: Издательство МАИ, 1994. – 52 с.
6. Добычина, Е.М. Расчет кварцевых генераторов: Учебное пособие / Р.А. Грановская, И.И. Постников, Е.М. Добычина, А.К. Ельцов – М.: Издательство МАИ, 1999. – 88 с.
7. Добычина, Е.М. Устройства генерирования и формирования сигналов: Учебное пособие / И.И. Гурова, Е.М. Добычина, Г.П. Земцов и др.; под ред. Р.А. Грановской. – М.: Издательство МАИ, 2006. – 100 с.
8. Добычина, Е.М. Цифровые антенные решетки ЛА: Учебное пособие / Е.М. Добычина. – М.: Издательство МАИ-ПРИНТ, 2011. – 56 с.
9. Добычина, Е.М. Интегрально-оптические модуляторы для волоконных каналов СВЧ-фотоники ЛА: Учебное пособие / А.Н. Братчиков, Е.М. Добычина. – М.: Издательство МАИ-ПРИНТ, 2011. – 76 с.

10. Добычина, Е.М. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. Учебное пособие для вузов / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин и др.; под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.

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

12. Добычина, Е.М. Цифровые антенные решетки / Е.М. Добычина // Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов и др.; под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2016. – Раздел 18.1. – С. 478–483.

13. Добычина, Е.М. Антенны радиоэлектронных систем летательных аппаратов. Учебное пособие / Е.М. Добычина, Е.В. Калябин, В.В. Карев и др. – М.: Изд. Доброе слово, 2016. – 184 с.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

14. Добычина, Е.М. Фазостабиляная система разводки СВЧ сигнала / Е.М. Добычина // Известия Вузов. Радиоэлектроника. – 1993. – № 6. – С. 68 – 71.

15. Добычина, Е.М. Фазостабиляные тракты СВЧ / Е.М. Добычина, Г.П. Земцов // Радиотехника. – 1995. – № 7-8. – С. 56 – 62.

16. Добычина, Е.М. Фазовые шумы синтезаторов частот / Е.М. Добычина // Вестник Московского Авиационного Института. – 2009. – т.16, № 3. – С. 69 – 76.

17. Добычина, Е.М. Построение цифровых антенных решеток для современных радиоэлектронных систем / Е.М. Добычина, П.А. Шмачилин // Антенны. – 2011. – № 3(166). – С.36 – 46.

18. Добычина, Е.М. Цифровые антенные решетки для бортовых радиолокационных систем / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 186. – С. 176 – 183.

19. Добычина, Е.М. Мощные транзисторы для передатчиков бортовых радиолокационных систем / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 186. – С. 184 – 190.

20. Добычина, Е.М. Калибровка цифровых антенных решеток / Е.М. Добычина // Радиотехника. Антенны. – 2013. – № 9 (196). – С. 46 – 55.
21. Добычина, Е.М. Приёмопередающий модуль цифровой антенной решетки / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Антенны. – 2014. – № 2 (201). – С. 53 – 57.
22. Добычина, Е.М. Схемы построения мощного усилителя X-диапазона бортовых радиоэлектронных систем / М.В. Снастин, Е.М. Добычина // Антенны. – 2014. – № 2 (201). – С. 45 – 52.
23. Добычина, Е.М. Цифровой приемо-передающий модуль активной фазированной антенной решетки / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 213. – С. 117 – 123.
24. Добычина, Е.М. Испытания антенных решеток бортовых радиолокационных систем в антенном измерительно-вычислительном комплексе / Е.М. Добычина, М.В. Снастин, А.Е. Обухов, С.В. Харалгин // Труды МАИ . – 2016. – № 91. – С. – [URL:http://trudymai.ru/published.php?ID=75661](http://trudymai.ru/published.php?ID=75661).
25. Добычина, Е.М. Исследование точности измерения коэффициента усиления антенн методом плоского экрана / Е.М. Добычина, М.В. Снастин., С.В. Харалгин // Электросвязь. – 2016. – № 12. – С. 33-38.
26. Добычина, Е.М. Способы построения и элементная база быстродействующих широкополосных синтезаторов частот / Е.М. Добычина, Д.С. Криков // Электросвязь. – 2017. – № 4. – С. 33-38.

Материалы международных научно-технических конференций:

27. Добычина, Е.М. Разработка модуля приемной широкополосной ЦАР / Д.И. Воскресенский, Е.М. Добычина // Материалы 17-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007) 10–14 сентября, Севастополь. – 2007. – Т. 2. – С. 394 – 395.
28. Добычина, Е.М. Построение широкополосной ЦАР / Д.И. Воскресенский, Ю.П. Большаков, Е.М. Добычина // XIV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2008) 15-17 апреля, Воронеж. – 2008. – Т.1. – С. 548 – 555.

29. Добычина, Е.М. Разработка приемной многолучевой ЦАР / Д.И. Воскресенский, Е.М. Добычина // Материалы 18-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008) 8–12 сентября, Севастополь. – 2008. – Т. 2. – С. 401 – 402.

30. Добычина, Е.М. Калибровка цифровой антенной решетки / А.Н. Братчиков, Е.М. Добычина // Материалы 19-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009) 14–18 сентября, Севастополь. – 2009. – Т. 2. – С. 401 – 402.

31. Добычина, Е.М. Цифровая антенная решетка с элементами СВЧ-фотоники / А.Н. Братчиков, Е.М. Добычина // Материалы 20-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010) 13–17 сентября, Севастополь. – 2010. – Т. 2. – С. 550 – 551.

32. Добычина, Е.М. Калибровка цифровой антенной решетки / Е.М. Добычина // 12-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2010» 31 марта – 2 апреля, Москва. – 2010. – выпуск XII-2. – С. 44 – 47.

33. Добычина, Е.М. Антенная решетка миллиметрового диапазона для многофункциональной бортовой РЛС / Е.М. Добычина, К.К. Клионовски // 17-я Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» 12-14 апреля, Воронеж. – 2011. – Т.3. – С. 2055 – 2062.

34. Добычина, Е.М. Проблемы аналого-цифрового преобразования ВЧ сигналов в цифровой антенной решетке (ЦАР) / Е.М. Добычина, Д.Л. Бохин // 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2011», Москва. – 2011. – С. 191 – 192.

35. Добычина, Е.М. Цифровая антенная решетка для многофункциональной бортовой РЛС / Д.И. Воскресенский, Е.М. Добычина // Материалы 21-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011) 12 –16 сентября, Севастополь. – 2011. – С. 525 – 526.

36. Добычина, Е.М. Расчет и моделирование линии передачи и излучателя контрольного сигнала (КС) для антенно-фидерного устройства (АФУ)

сантиметрового и миллиметрового диапазона / А.Г. Титов, Е.М. Добычина // 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2011», Москва. – 2011 . – С. 211 – 212.

37. Добычина, Е.М. Аналого-цифровое преобразование в цифровых антенных решетках / Е.М. Добычина, Д.Л. Бохин // 14-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2012» 28 – 30 марта, Москва. – 2012. – выпуск XIV-1. – С. 243 – 247.

38. Добычина, Е.М. Антенный измерительно-вычислительный комплекс на базе безэховой камеры / Е.М. Добычина // Материалы 22-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012) 10 –14 сентября, Севастополь. – 2012. – С. 477 – 478.

39. Добычина, Е.М. Мощный нитрид галлиевый усилитель 3-см длин волн / И.А. Петров, Е.М. Добычина // 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2012», Москва. – 2012 . – С. 309 – 310.

40. Dobychina, E. GaN pHEMT power amplifier for cellular network base station / E. Dobychina, R. Malachov, M. Snastin // 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.

41. Добычина, Е.М. Измерение характеристик экранированной безэховой камеры / Е.М. Добычина, М.И. Войтович, А.Е. Обухов // Материалы 23-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013) 8 –13 сентября, Севастополь. – 2013. – С. 634 – 635.

42. Добычина, Е.М. Цифровой приёмопередающий модуль интеллектуальной антенной решётки / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов, М.В. Снастин, В.К. Степанов // Материалы 23-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013) 8 –13 сентября, Севастополь. – 2013. – С. 638 – 639.

43. Dobychina, E. Digital transceiver module for on-board communication system / E. Dobychina, R. Malachov, M. Snastin // 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.

44. Добычина, Е.М. Экстракция параметров мощных многосекционных транзисторов / Б. В. Крылов, Е. М. Добычина, Р. Ю. Малахов, Б. Б. Сергеев // Материалы 24-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014) 7 –13 сентября, Севастополь. – 2014. – С. 123-125.

45. Добычина, Е.М. Бортовая волноводно-щелевая антенная решетка / Е. М. Добычина, М. В. Снастин, М. С. Бибко // Материалы 24-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014) 7 –13 сентября, Севастополь. – 2014. – С. 123-125.

46. Добычина, Е.М. Измерение коэффициента усиления антенн методом отражения / Е. М. Добычина, М.В. Снастин, Р.Ю. Малахов // Материалы 25-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015) 6 –12 сентября, Севастополь. – 2015. – Т.1. – С. 449-450.

47. Добычина, Е.М. Абсолютный метод измерения коэффициента усиления антенн / М.В. Снастин, Е.М. Добычина // 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2015», Москва. – 2015 . – С. 274 – 276.

48. Добычина, Е.М. Передающая система распределенного радиолокационного комплекса / Р.Ю. Малахов, Е.М. Добычина, М.В. Снастин, // Аннотированный сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Расплетинские чтения – 2016» / под общей редакцией Н.Э. Ненартовича. – М.: ПАО «НПО «Алмаз» . – 2015. – С. 87.

49. Добычина, Е.М. Исследование характеристик волноводно-щелевой антенной решетки в антенном измерительно-вычислительном комплексе на базе безэховой камеры / Е.М. Добычина, М.В. Снастин, С.В. Харалгин // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2016» 14 –18 ноября, Москва. – 2016 . – С. 372 – 374.

50. Добычина, Е.М. Волноводно-щелевая антенная решетка Ку-диапазона длин волн / Е.М. Добычина, С.В. Харалгин // XLII Международная молодежная

научная конференция «Гагаринские чтения-2016» 12 –15 апреля, МАИ, Москва. – 2016 . – С. 502 – 503.

51. Добычина, Е.М. Экспериментальное исследование цифрового диаграммообразования / Е.М. Добычина, М.В. Снастин, В.Р. Мезин, А.В. Пышненко // XLII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения-2016» 12 –15 апреля, МАИ, Москва. – 2016 . – С. 503 – 504.

52. Добычина, Е.М. Характеристики рассеяния антенных решеток на борту летательных аппаратов / М.В. Снастин, Е. М. Добычина, А.Е. Обухов // Материалы 26-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016) 4 –10 сентября, Севастополь. – 2016. – С. 1147-1153.

53. Добычина, Е.М. Волноводный излучатель с вращающейся поляризацией Х-диапазона длин волн / С.В. Харалгин, М.И. Войтович, М.В. Снастин, Е.М. Добычина // Материалы 27-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017) 10 –16 сентября, Севастополь. – 2017. – С. 641-648.

Материалы всероссийских и других научно-технических конференций

54. Добычина, Е.М. Адаптивный метод диагностики цифровой антенной решетки / Е.М. Добычина // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С.Попова, серия: научная сессия, посвященная дню радио, Москва. – 2010. – выпуск LXV. – С. 8– 10.

55. Добычина, Е.М. Цифровая антенная решетка миллиметрового диапазона / Е.М. Добычина, К.К. Клионовски., И.С. Баклашов // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С.Попова, серия: цифровая обработка сигналов и ее применение, Москва. – 2011. – выпуск XIII-2. – С. 20 – 23.

56. Добычина, Е.М. Цифровой приемо-передающий модуль бортовой активной фазированной антенной решетки / Р.Ю. Малахов, Е.М. Добычина, М.В. Снастин // 1 Всероссийская Микроволновая конференция, Москва. – 2013. – С. 361 – 365.

57. Добычина, Е.М. Учет кроссполяризационной составляющей при измерениях характеристик антенн / Е.М. Добычина, М.В. Снастин, М.С. Бибко // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике-2015», Москва. – 2015. – С. 161 – 162.

58. Добычина, Е.М. Измерение характеристик рассеяния объектов / Е.М. Добычина, М.В. Снастин, А.Е. Обухов // Тезисы докладов конференции «Иосифьяновские чтения 2017», Истра. – 2017. – С. 270 – 272.

Патенты на изобретения и полезные модели

59. Добычина, Е.М. Пат. **157114 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 Q 21/00**. Приемопередающий модуль бортовой цифровой антенной решетки / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов, М.В. Снастин; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)(МАИ) (RU). – № 2015109623/08, заявл. 19.03.2015; опубл. 20.11.2015. Бюл. № 32. – 9 с.: ил.

60. Добычина, Е.М. Пат. **166501 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 Q 3/26**. Устройство калибровки многолучевой антенной решетки / Е.М. Добычина, М.В. Снастин; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)(МАИ) (RU). – № 2016119618/28, заявл. 23.05.2016; опубл. 27.11.2016. Бюл. № 33. – 10 с.: ил.

61. Добычина, Е.М. Пат. **2655033 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 Р 5/08**. Малогабаритный двухполяризационный волноводный излучатель фазированной антенной решетки с высокой развязкой между каналами / Л.И. Пономарев, А.А. Прилуцкий, А.А. Васин, Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов, О.В. Терехин, С.В. Харалгин; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ) (RU). – № 2017123814, заявл. 06.07.2017; опубл. 23.05.2018. Бюл. № 15. – 12 с.: ил.