

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 – 2019

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,
ПАО «Научно-производственное объединение
«Алмаз» имени академика А.А. Расплетина»,
главный научный сотрудник

Ведущая организация: акционерное общество «Радиотехнический
институт имени академика А.Л. Минца»

Защита диссертации состоится «27» июня 2019 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертационной работой можно ознакомиться на сайте <http://www.bmstu.ru> и в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.141.11, д.т.н., профессор



И.Б. Власов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Основными направлениями совершенствования радиоэлектронных систем (РЭС) на борту летательных аппаратов (ЛА) являются: 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 неопределенностью 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 как разведывательные, так и ударные задачи.

Актуальным направлением современного развития радиоэлектронной техники является переход к широкополосным 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. Warstop, 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., Климов К.Н., Фролов О.П., Kuroda M., Miura M. и др.

В работах Евстигнеева А., Гупта Д., Муханова О., Магил Е., уделено много внимания вопросам разработки приемопередающих модулей (ППМ), в состав которых входят синтезаторы сетки частот (ССЧ) с прямым цифровым синтезом. Однако проблемы со стабильностью частоты в таких устройствах делают их неприемлемыми для бортовых РЭС.

Задачи оптимизации режимов активных приборов решались в трудах Неймана М.С., Шахгильдяна В.В., Челнокова О.А., Кулешова В.Н., Алексеева О.В., Ангелова И.

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 настоящее время необходимость перехода от вопросов анализа теоретических принципов построения ЦАР к их практической реализации особенно для бортовых РЭС уже очевидна, поскольку остается нерешенным ряд научных и технических проблем, связанных с повышением уровня мощности, излучаемой апертурой антенной решетки; построением принципиально новых эффективных твердотельных приемопередающих модулей на активных элементах нового поколения, позволяющих работать с минимальными потерями и низким уровнем фазовых шумов в широкой полосе частот. Принципиально нового подхода требуют вопросы минимизации массы, габаритов и стоимости антенных решеток на цифровой элементной базе.

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».

Современные АФАР применяются в системах наземного и корабельного базирования, в летательных и космических аппаратах. АФАР состоят из модулей, куда кроме излучателей, приемников, фазовращателей и усилителей входят аналого-цифровые преобразователи (АЦП), являющиеся устройствами предварительной пространственно-временной обработки сигнала .

Разработка принципиально нового подхода к вопросу определения архитектуры бортовой ЦАР и её основного элемента цифрового приемо-передающего модуля (ЦППМ), который позволит нарастить энергетический потенциал системы, главным образом за счет снижения энергопотребления и потерь, является актуальной научной проблемой.

Целью работы является решение крупной научной проблемы, заключающейся в исследовании и разработке нового класса антенных систем – цифровых антенных решеток бортовых радиоэлектронных комплексов с повышенным энергетическим потенциалом и точностью формирования амплитудно-фазового распределения при снижении энергопотребления и минимизации массогабаритных характеристик системы, а также новых технологий их производства, настройки и эксплуатации.

Достижение сформулированной цели потребовало решения следующих научно-технических задач:

1. Разработка концепции и теоретических основ формирования облика и состава цифровой антенной решетки бортовой радиоэлектронной системы, работающей в условиях ограниченного энергопотребления, имеющей минимальные массу и размеры, включая:

- обоснование архитектуры системы, состава и характеристик ЦАР;
- сравнение с ближайшими прототипами и нахождение условий снижения энергопотребления ЦАР;
- подтверждение технической возможности реализации бортовой ЦАР предложенной архитектуры;

2. 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;

3. Обоснование нового подхода к моделированию нелинейных процессов в мощных многосекционных псевдоморфных СВЧ-транзисторах с учетом результатов их экспериментальных исследований;

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

5. Создание макетов для проведения экспериментальных исследований на псевдоморфных транзисторах, подтверждающих возможность повышения эффективности цифрового модуля;

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

7. 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 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 является цифровая антенная решетка, предназначенная для работы в составе бортовой радиоэлектронной системы.

Предметом исследования являются архитектура, структура и состав ЦППМ, характеристики, математические и имитационные модели ЦАР для бортовых радиосистем.

Научная новизна работы заключается в развитии теории и методологии построения нового класса антенных систем – цифровых антенных решеток бортовых радиоэлектронных комплексов, позволяющих повысить их энергетический потенциал за счет использования новых методов оптимизации режима работы высокоэффективных активных устройств и обеспечения высокой

точности формирования АФР с помощью предложенной системы автоматической калибровки. В частности:

1. Впервые проведена оценка и сравнение энергетических характеристик цифровых и аналоговых АР и показаны основные преимущества и недостатки ЦАР;

2. Предложена новая научная идея построения распределенной архитектуры приемопередающих антенных решеток с цифровым диаграммообразованием без применения аналоговых фазовращателей и распределительной системы СВЧ-сигнала;

3. Предложен новый подход к моделированию нелинейных процессов в мощных многосекционных псевдоморфных СВЧ-транзисторах с учетом результатов их экспериментальных исследований;

4. Предложена и верифицирована на экспериментальных образцах методика построения эквивалентной электрической схемы мощного активного элемента на плате, позволяющая увеличить его эффективность по сравнению с существующими методиками;

5. Предложена концепция построения цифрового приемопередающего модуля, позволяющая 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;

6. Развита статистическая теория калибровки амплитудно-фазового распределения для цифровой антенной решетки; предложен принцип построения нового устройства для прецизионного управления амплитудно-фазовым распределением в раскрыве многоканальной ЦАР;

7. Предложен и апробирован новый 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 МАИ.

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.

Разработаны макеты усилителей мощности на GaN бескорпусных транзисторах и проведены экспериментальные исследования, в результате которых получено повышение КПД и выходной мощности за счет использования предложенного метода моделирования активного элемента на плате вместо традиционных методов.

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 после осуществления калибровки аналогичным методом 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 перенастройке и калибровке каналов станций спутниковой связи на предприятии АО «ВИСАТ-ТЕЛ».

Научные результаты диссертационной работы были использованы при выполнении научно-исследовательской работы на предприятии АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» в разработке гибридно-интегральных нитрид галлиевых 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 для повышения коэффициента полезного действия в ходе выполнения опытно-конструкторской работы при разработке усилителя мощности для многофункциональной бортовой радиолокационной системы (МБРЛС), тема 450-10/41360-15550.

Методики и алгоритмы моделирования активного элемента на плате и процедуры калибровки ЦАР внедрены в учебный процесс на кафедре «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» МАИ. Основные материалы, относящиеся к вопросам построения и практической реализации радиоэлектронных систем с ЦАР, излагаются при чтении лекций и используются при проведении практических занятий, а также лабораторного практикума 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. Предложенный принцип построения нового класса цифровых антенных решеток позволяет повысить их энергетический потенциал, а также снизить энергопотребление по сравнению с АФАР за счет использования новой структуры цифрового приемопередающего модуля (Пат. 157114 Российская Федерация), при снижении габаритов и массы решетки, в результате исключения распределительной СВЧ-системы и управляемых фазовращателей.

2. Предложенный и экспериментально исследованный алгоритм экстракции параметров, а также разработанная нелинейная модель мощного активного элемента на плате на основе параллельных резонансных контуров, позволили улучшить энергетические характеристики цифрового приемопередающего модуля путём увеличения КПД усилителя мощности на 10–15%, а уровня его выходной мощности на 15 – 20 % по сравнению с существующими моделями.

3. Развитие коммутационного метода калибровки, применительно к многолучевой бортовой ЦАР (Пат. 166501 Российская Федерация), позволяющее устранить влияние дестабилизирующих факторов, вносящих неконтролируемые случайные амплитудные и фазовые ошибки в формирование ДН и тем самым 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. Новый метод имитационного моделирования приемной ЦАР в безэховой камере (БЭК) при наличии шумов позволил получить результаты экспериментальных исследований, подтверждающие, что использование цифровой обработки в каждом канале ЦАР 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:

15th, 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) (Cartagena, Spain, 2013), (Graz, Austria, 2014); с 17-й по 28-ю Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, с 2008 г. по 2018 г.; 14-й и 17-й Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2008, 2011); 12-й и 14-й Международных конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2010 /2012» (Москва 2010,2012); 10-й, 11-й, 14-й, 15-й Международных конференциях «Авиация и космонавтика – 2011/2012/2015/2016» (Москва 2010, 2012, 2015, 2016); XLII, XLIV Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения-2016/2018» (Москва 2016, 2018).

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

Публикации по теме диссертации

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 56 работах, из них 4 монографии, 15 статей в изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России, сделано 34 доклада на международных и всероссийских конференциях, 12 опубликованы в изданиях, входящих в системы Scopus и Web of Science, 7 работ опубликовано без соавторов, получено 2 патента РФ на полезную модель, 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора

Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе проведены лично автором в процессе научной деятельности.

Постановка и проведение ряда экспериментальных измерений, связанных с имитационным моделированием принципов работы цифровой антенной решетки и проверки возможностей цифрового диаграммообразования и процедуры калибровки макета антенной решетки, 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 и принципы построения новых устройств, разработала методики и программно-алгоритмические средства обработки результатов экспериментов, математические модели, алгоритмы моделирования, провела анализ, сравнение и интерпретацию полученных экспериментальных результатов, а также результатов имитационного моделирования.

Структура и объём работы

Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения, содержит 158 рисунков, 141 формулу, 22 таблицы. Объём работы 297 страниц машинописного текста, из них 10 страниц приложения. Список использованных источников содержит 205 наименований.

Соответствие работы паспорту специальности

Работа соответствует паспорту специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»: исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных устройств СВЧ, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами (п 3. паспорта специальности); исследование и разработка адаптивных и малошумящих антенных систем, больших антенн с высоким усилением, активных ФАР со сверхбольшими мощностями излучения, радиооптических антенных систем и антенн с уникальными характеристиками (п 8. паспорта специальности) и разработка методов проектирования и оптимизации антенных систем и СВЧ-устройств широкого применения (п 9. паспорта специальности). Этим положениям соответствуют главы 1, 2 диссертации.

Разработка и исследование новых технологий производства, настройки и эксплуатации антенных систем (п 6. паспорта специальности) и исследование и разработка метрологического обеспечения проектирования, производства и эксплуатации антенных систем и СВЧ-устройств (п 7. паспорта специальности) – этим положениям соответствуют главы 3, 4 диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения.

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].

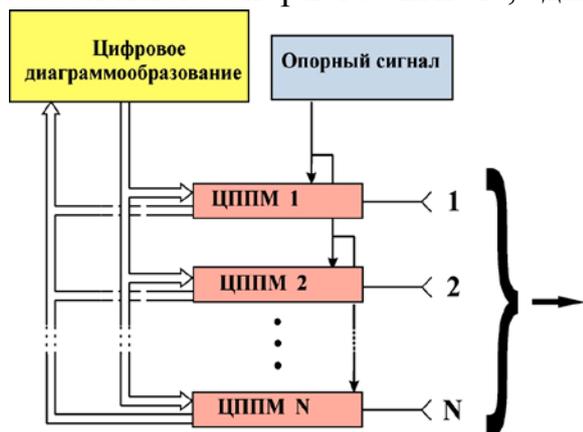


Рисунок 1. Цифровая антенная решетка

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

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

архитектуры. Основным показателем эффективности выбрана мощность, потребляемая составными частями антенной решетки [5,6,8,9,24, 25,30,31].

Использование ЦППМ позволяет уменьшить габариты и массу многоэлементной бортовой ЦАР за счет исключения СВЧ распределительной системы и управляемых фазовращателей (УФВ) [32,33]. 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 [29,34]. При этом исключаются операции преобразования частоты, детектирования сигналов с выделением огибающей, тем самым уменьшаются энергетические потери, повышается чувствительность приемной системы и упрощается конструкция модуля.

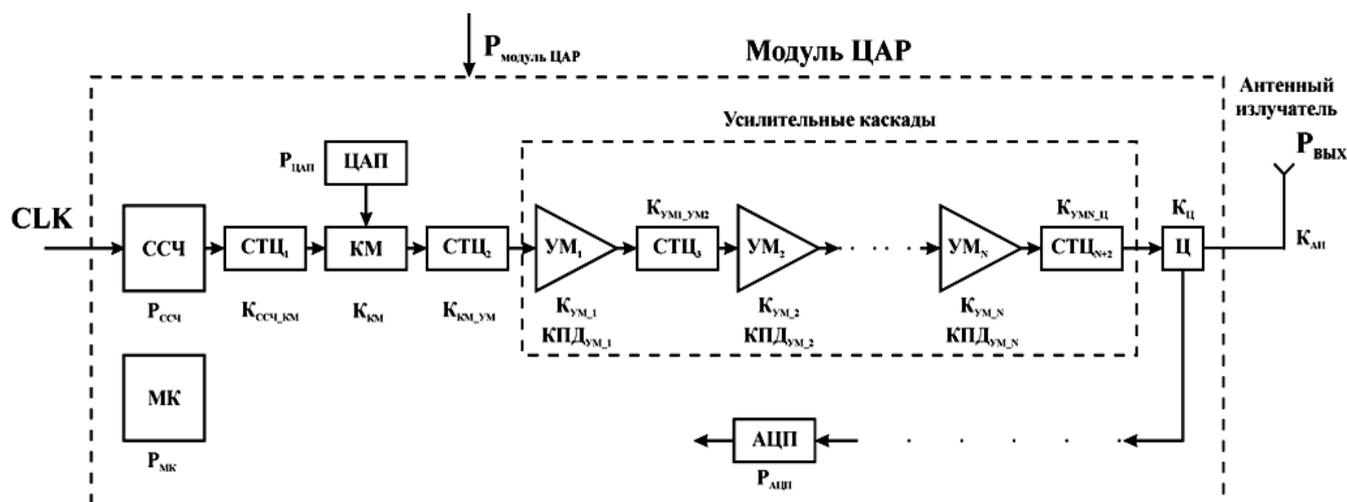


Рисунок 2. Детализация передающего тракта цифрового ППМ

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. 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.

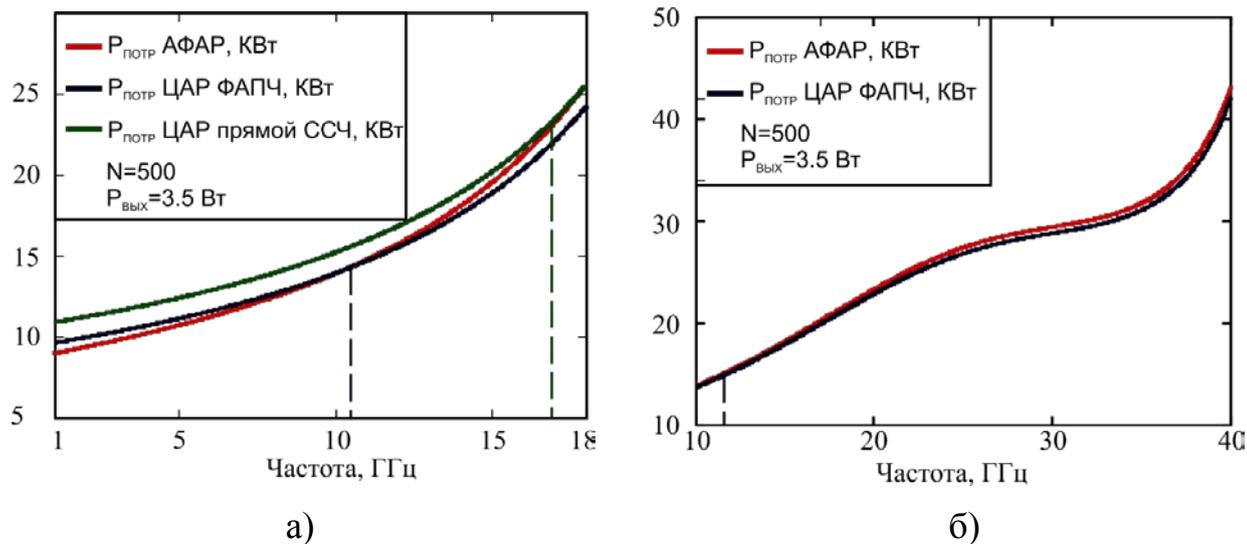


Рисунок 3. Потребляемые мощности АФАР и ЦАР

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:

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

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

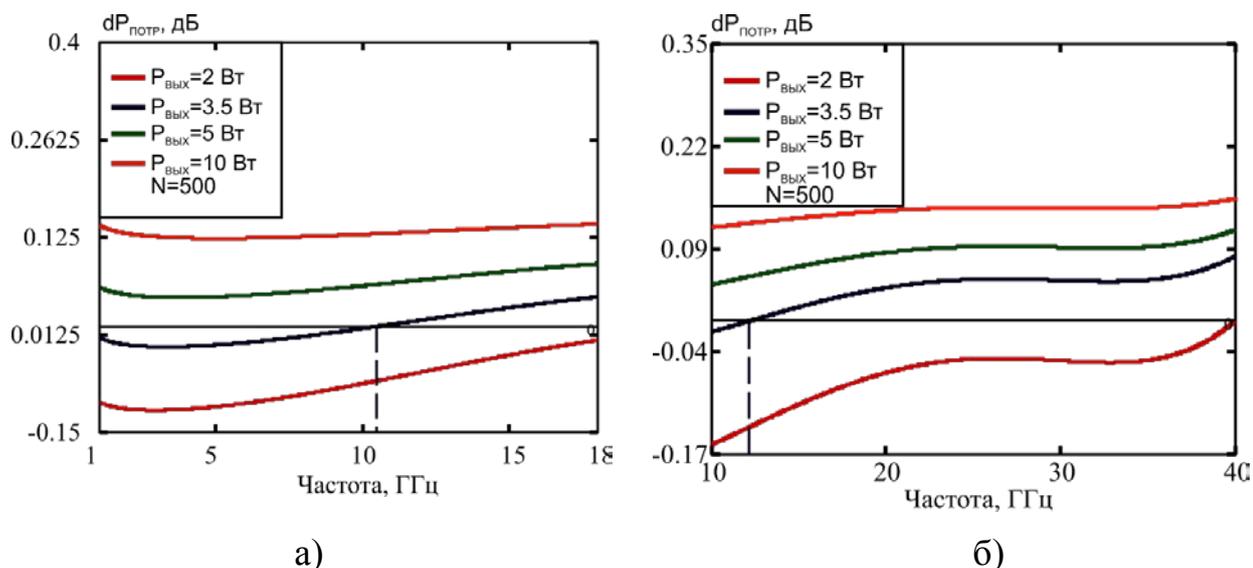


Рисунок 4. Частотная зависимость $dP_{\text{Потр}}$ при различных значениях $P_{\text{ВЫХ}}$

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.

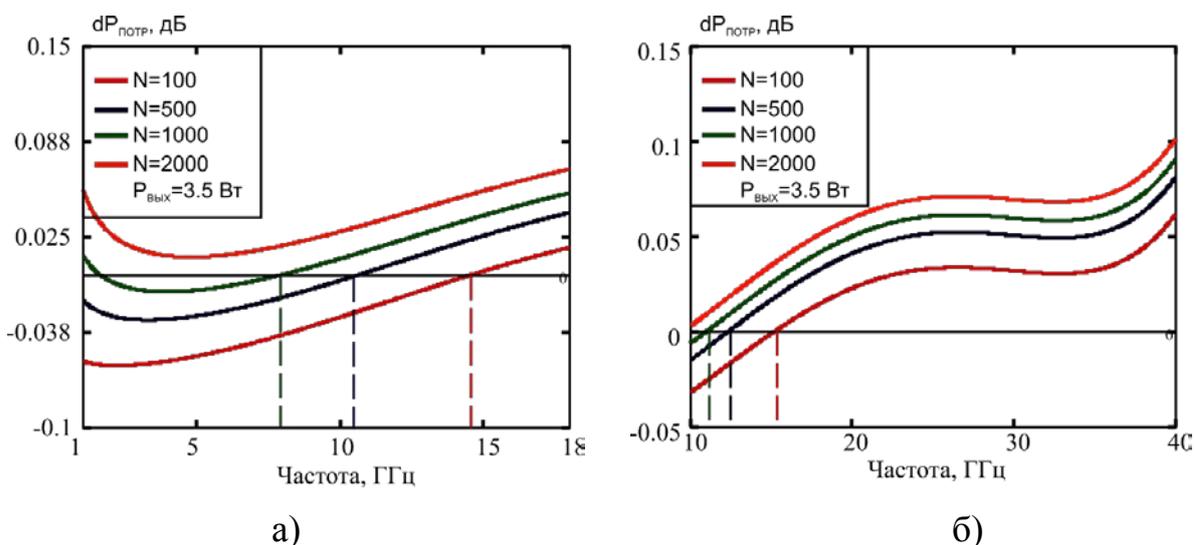


Рисунок 5. Частотная зависимость $dP_{\text{потр}}$ при различных значениях N

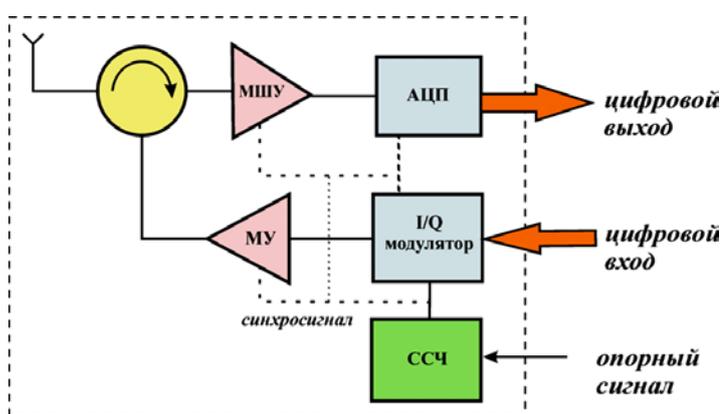
Показано влияние на энергопотребление ЦАР выходного усилителя мощности (УМ) в составе передающего тракта, КПД которого определяет энергетическую эффективность использования предложенного модуля в составе бортовой ЦАР.

Этот результат дает основание для пересмотра отношения к практическому использованию ЦАР в бортовых РЭС. При соизмеримом энергопотреблении ЦАР дает существенные преимущества радиосистеме, по сравнению с АФАР – это возможность адаптивной многолучевой работы, которые реализуются только в цифровых решетках.

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 [12,14,23,39,40,42]. 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 [7,17].

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 [20] 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 [34]. В зависимости от предъявляемых к ЦАР требований возможно несколько вариантов построения СВЧ трактов модуля.

Рисунок 6. Структурная схема модуля ЦАР

Наиболее предпочтительной для построения передающего тракта ЦППМ является схема с использованием ССЧ с цифровым кольцом ФАПЧ, показанная на Рисунке 7 [12].

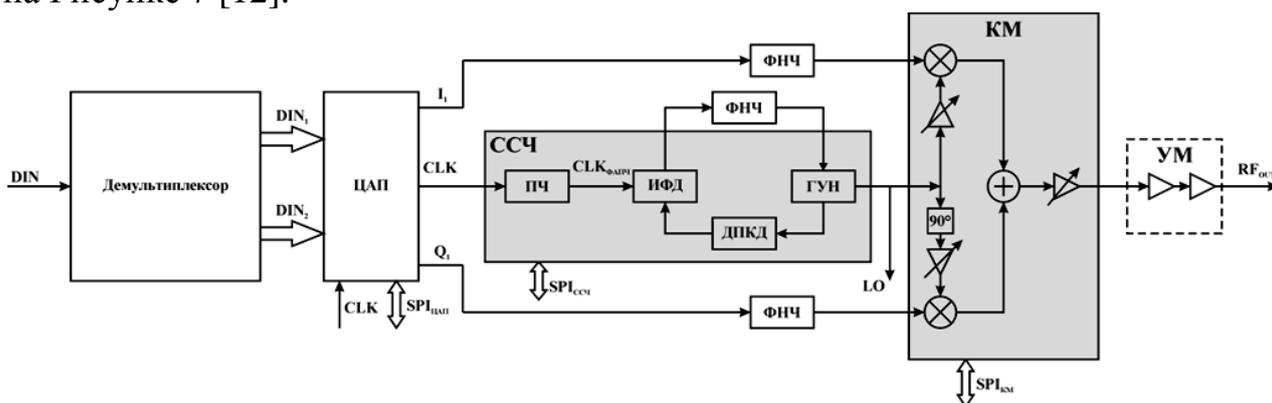


Рисунок 7. Структурная схема передающего тракта модуля ЦАР с ССЧ на основе цифрового кольца ФАПЧ

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 [7].

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

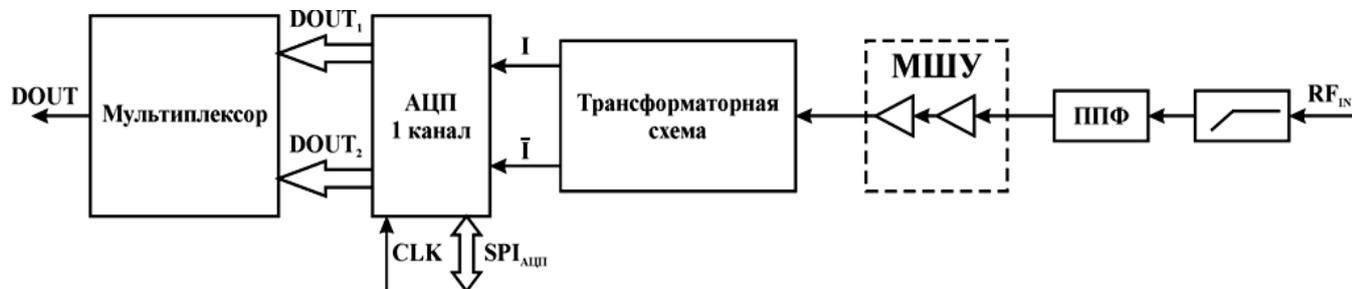


Рисунок 8. Структурная схема приёмного тракта ЦППМ с преобразованием на несущей при использовании трансформаторной схемы

Основным каскадом аналоговой части передающего тракта модуля ЦАР, определяющим его энергетическую эффективность, является усилитель (УМ) на мощном активном элементе (АЭ) [10,13]. 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) (Рисунок 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 [36,43].

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:

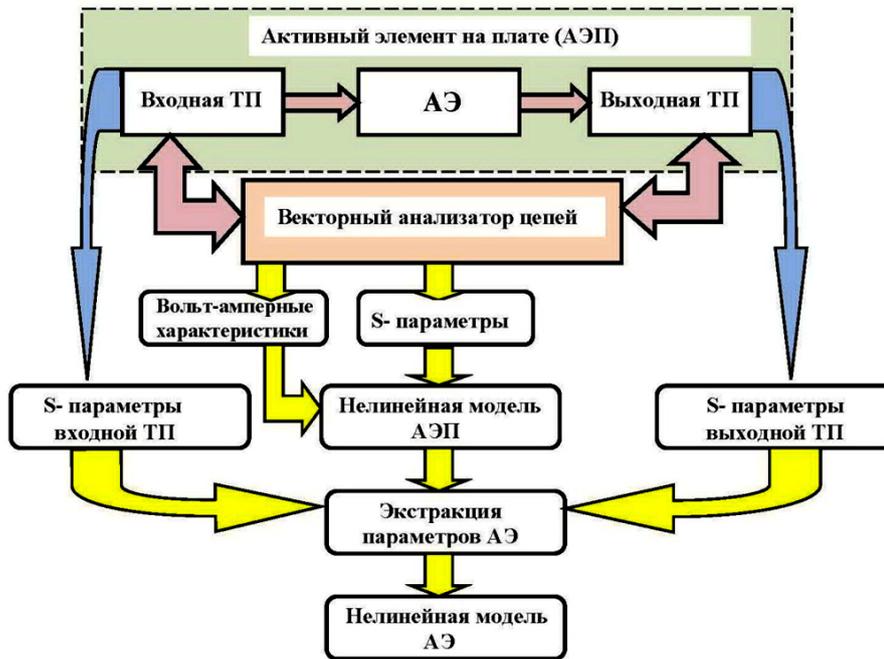


Рисунок 9. Алгоритм нелинейного моделирования мощного СВЧ АЭ

$$\begin{aligned}
 R_i(U_{DS}, U_{GS}) &= (RG_i \cdot U_{GS}) \cdot (RD_i \cdot U_{DS}), \\
 L_i(U_{DS}, U_{GS}) &= (LG_i \cdot U_{GS}) \cdot (LD_i \cdot U_{DS}), \\
 C_i(U_{DS}, U_{GS}) &= (CG_i \cdot U_{GS}) \cdot (CD_i \cdot U_{DS}),
 \end{aligned} \tag{2}$$

где i – порядковый номер резонансного контура;

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

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

$RG_i, RD_i, LG_i, LD_i, CG_i, CD_i$ – векторы-строки соответствующих полиномиальных коэффициентов размерностью P_{MAX} ; P_{MAX} – наибольший порядок полинома.

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

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

где I_{MAX} – максимально возможная величина тока стока, А; b_s – крутизна зависимости тока стока от напряжения затвора; c_s – крутизна зависимости тока

тока 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.

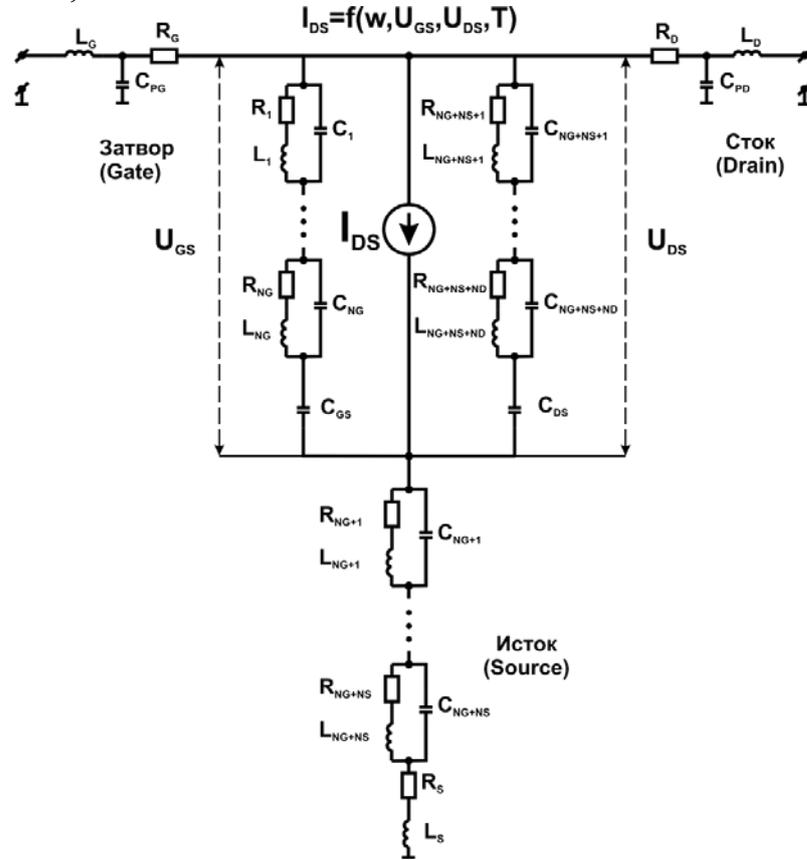


Рисунок 10. Эквивалентная электрическая схема мощного АЭ на плате

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 .

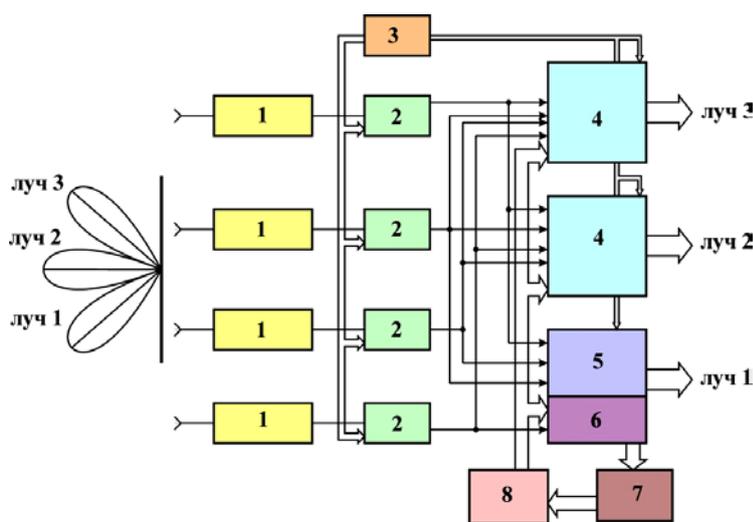
Разработана нелинейная модель мощного АЭ на плате, позволяющая оптимизировать режим его работы в составе СВЧ УМ для обеспечения высоких КПД и КУ при требуемой выходной мощности в заданной полосе рабочих частот.

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 Главе 4 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 [21]. Показано, что это решение позволяет повысить точность наведения каждого луча ЦАР до долей градуса [1,11].

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; 8 – 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 [26,28,51]

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

$$\widehat{A}_k = \frac{\sqrt{(\overline{P}_{270} - \overline{P}_{90})^2 + (\overline{P}_0 - \overline{P}_{180})^2}}{4A_c} \quad (9)$$

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 (Рисунки 12, 13).

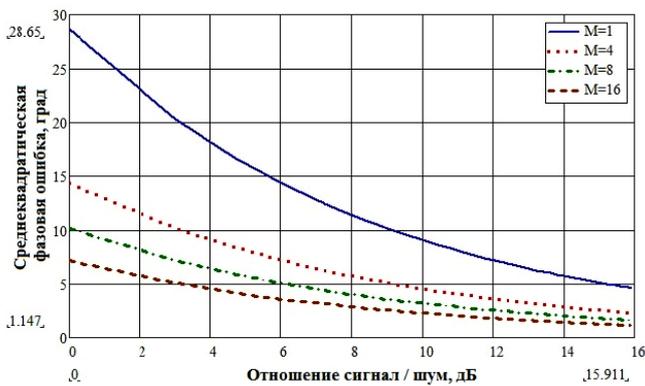


Рисунок 12. Фазовая ошибка калибровки

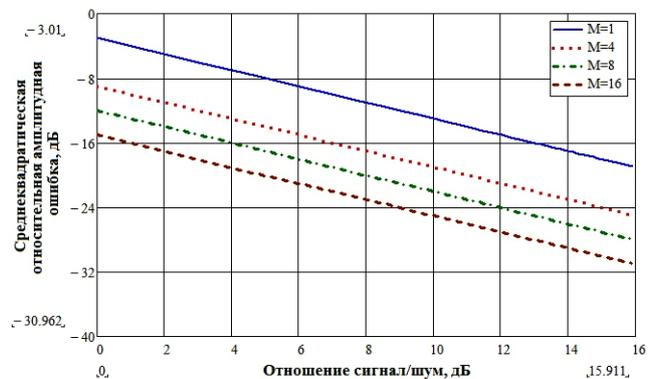


Рисунок 13. Относительная амплитудная ошибка калибровки

Разработаны математическая и имитационная модели системы калибровки с учётом ошибок в управлении и дискретизации. Несколько примеров результатов имитационного моделирования показаны на Рисунке 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 (Рисунок 14, а, б, в, 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.

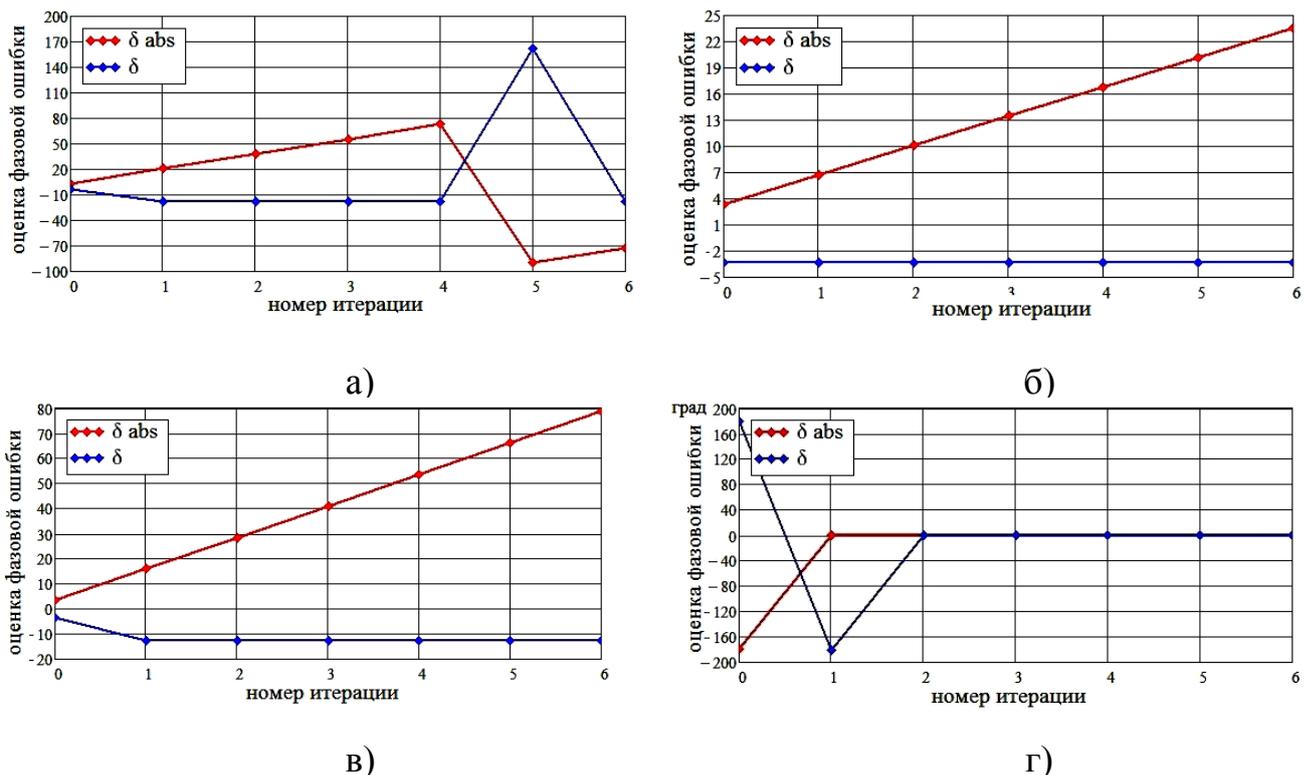


Рисунок 14. Примеры сходимости процесса калибровки при

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

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 плате представлена на Рисунке 15.

Проведена экстракция параметров мощного отечественного СВЧ GaN транзистора производства ОАО «Светлана» (Рисунок 16).

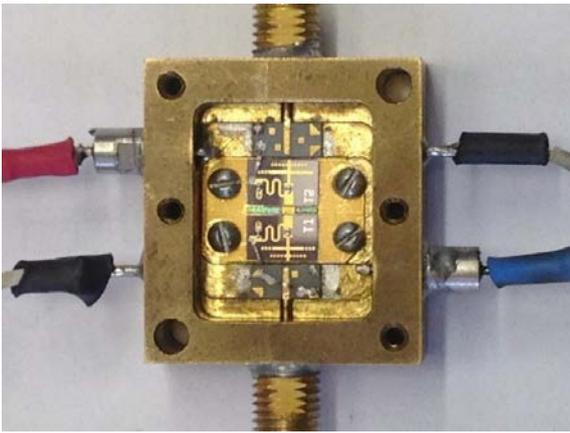


Рисунок 15. АЭП в корпусе

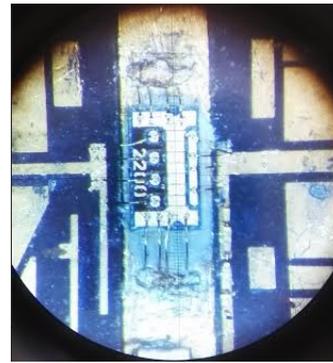


Рисунок 16. Отечественный многосекционный СВЧ GaN транзистор в составе УМ

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

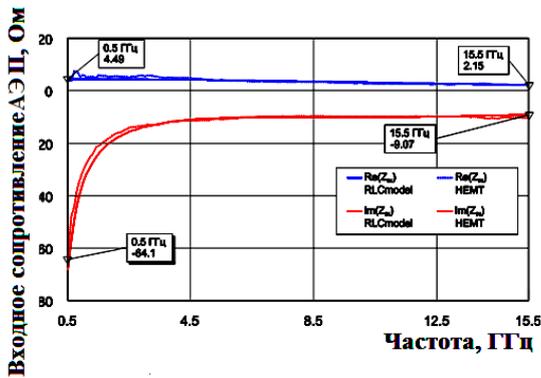


Рисунок 17. Верификация входного сопротивления АЭП

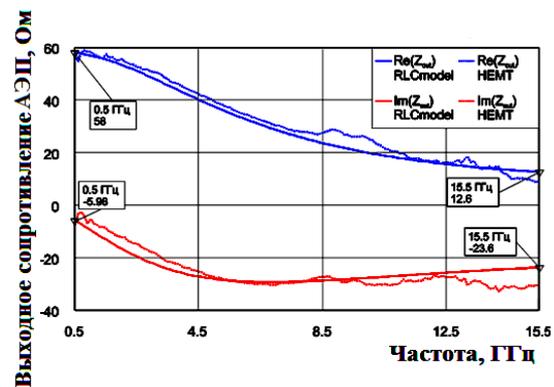


Рисунок 18. Верификация выходного сопротивления АЭП

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 (Рисунки 19, 20).

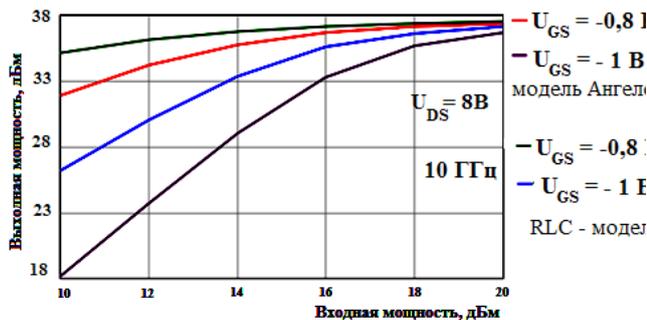


Рисунок 19. Сравнение выходной мощности

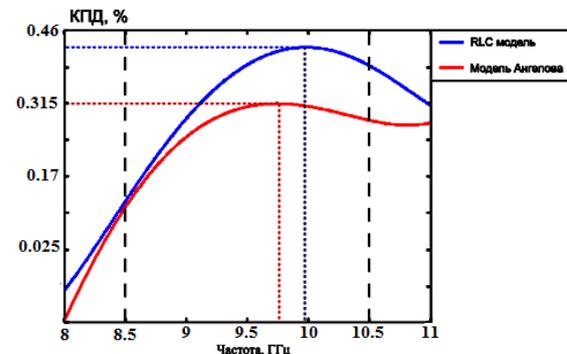


Рисунок 20. Сравнение КПД СВЧ УМ

На основании предложенной нелинейной модели разработан СВЧ усилитель мощности (Рисунок 21), диапазон рабочих частот которого составил 8,5 – 10,5 ГГц, выходная мощность от 4 до 5 Вт, максимальный КПД – 47%. Разработаны топологии передающего (Рисунок 22) и приёмного тракта модуля ЦАР, обладающие малыми массогабаритными характеристиками, а также низкой стоимостью, что позволит использовать предложенную структуру модуля в ЦАР бортовых РЭС [27,47,48].

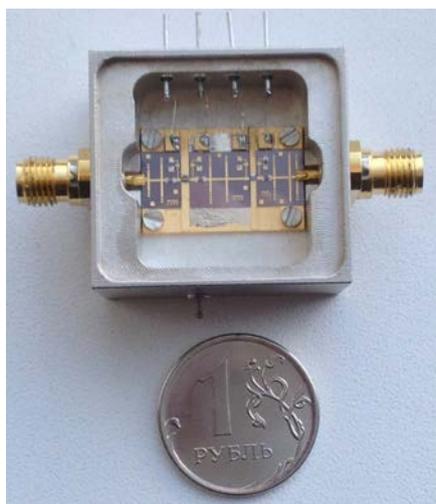


Рисунок 21. СВЧ усилитель мощности

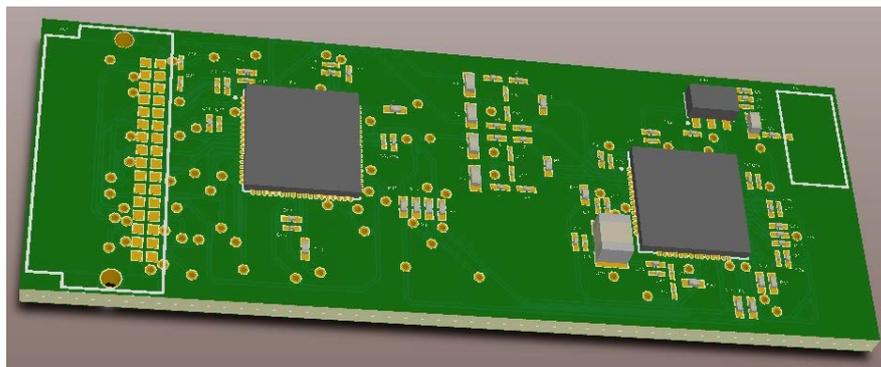


Рисунок 22. Плата цифровой части передающего тракта модуля

В экранированной безэховой камере (БЭК) [15,16,27,35,38,44-46] с использованием установки планарного сканирования антенны проведена серия экспериментов, в результате которых полностью цифровым образом построены суммарные и разностные цифровые диаграммы направленности ЦАР (Рисунки 23 - 28), воспроизведен режим пеленгации источника излучения с определением угла прихода сигнала с точностью до тысячных долей ширины ДН ЦАР [18,41,49,50].

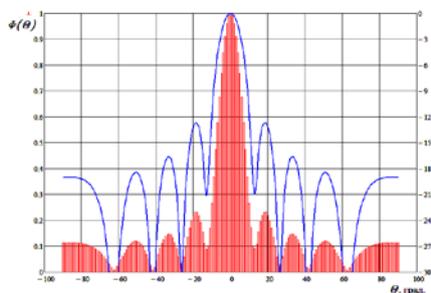


Рисунок 23. ДН экспериментальной ЦАР, угол прихода 0 град.

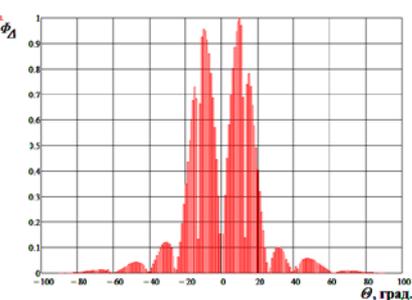


Рисунок 24. Разностная ДН экспериментальной ЦАР, угол прихода 0 град.

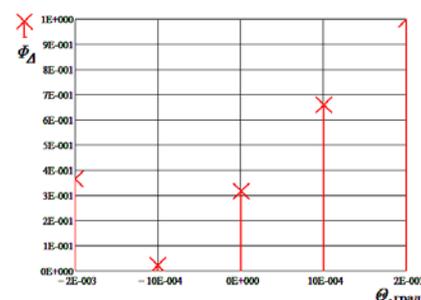


Рисунок 25. Разностная ДН экспериментальной ЦАР, шаг выборки 0,01 град.

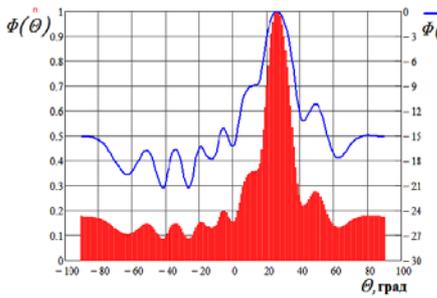


Рисунок 26. ДН экспериментальной ЦАР, угол прихода 26 град.

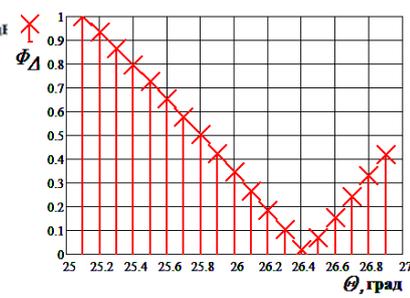


Рисунок 27. Разностная ДН экспериментальной ЦАР, шаг выборки 0,1 град. угол прихода 26,4 град.

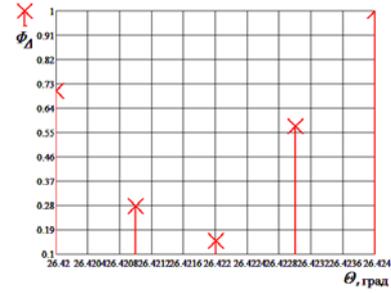


Рисунок 28. Разностная ДН экспериментальной ЦАР, шаг выборки 0,001 град. угол прихода 26,422 град.

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 $\Delta \widehat{\delta}_k = 0,5$ градусов за одну итерацию калибровки (Рисунки 29, 30).

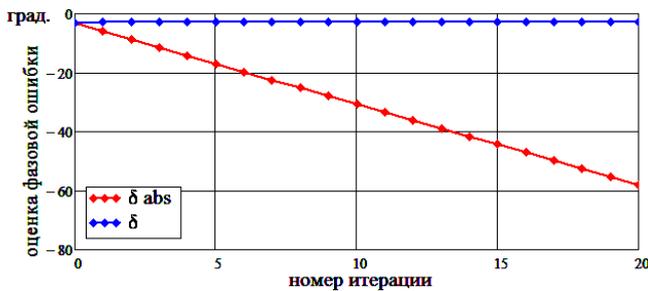


Рисунок 29. Сходимость процесса калибровки экспериментальной ЦАР



Рисунок 30. Результирующая фазовая ошибка экспериментальной ЦАР

Результаты натурного моделирования [19,48,53] послужили основой для разработки устройства калибровки многолучевой антенной решетки [5].

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена крупная научная проблема, внесшая вклад в исследование и разработку нового класса антенных систем – цифровых антенных решеток бортовых радиоэлектронных комплексов, позволяющих повысить их энергетический потенциал за счет использования новых методов оптимизации режима работы высокоэффективных активных устройств и обеспечения высокой точности формирования амплитудно-фазового распределения с помощью предложенной системы автоматической калибровки.

1. Обоснован переход от иерархической аналого-цифровой структуры активной решетки к распределенной, где интегрированные с излучателем цифровые приемопередающие модули 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 раскрыте 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 распределительной СВЧ-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 псевдоморфных транзисторов. Ошибка при моделировании входных и выходных сопротивлений транзисторов при этом составляла не более 4 % в широкой 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 составил 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 раскрыве многоканальной антенной решетки, для случая предложенной ЦАР; 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 $\Delta\widehat{\delta}_k = 0,5$ градусов за одну итерацию 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 ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Добычина Е.М. Калибровка ЦАР бортовых РЛС // А.В. Авласенок [и др.] Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2010-2012; под ред. Ю.И. Белого. М.: Радиотехника, 2011. С. 695-699. (57,5 п.л./ 0,3 п.л.).
2. Добычина Е.М., Кольцов Ю.Н. Цифровые антенные решетки и скоростные аналого-цифровые преобразователи. М.: Издательство МАИ, 2012. 168 с. (10,5 п.л./5,5 п.л.).
3. Добычина Е.М., Кольцов Ю.В. Цифровые антенные решетки в бортовых радиолокационных системах. М.: Издательство МАИ, 2013. 160 с. (10 п.л./5 п.л.).
4. Добычина Е.М., Шмачилин П.А. Построение цифровых антенных решеток для современных радиоэлектронных систем // 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. (10,75 п.л./0,35 п.л.).
5. Добычина Е.М. Фазостабильная система разводки СВЧ сигнала // Известия Вузов. Радиоэлектроника. 1993. № 6. С. 68-71. (0,25 п.л.).
6. Добычина Е.М., Земцов Г.П. Фазостабильные тракты СВЧ // Радиотехника. 1995. № 7-8. С. 56-62. (0,45 п.л./ 0,3 п.л.).
7. Добычина Е.М. Фазовые шумы синтезаторов частот // Вестник Московского Авиационного Института. 2009. Т.16, № 3. С. 69-76. (0,5 п.л.).
8. Добычина Е.М., Шмачилин П.А. Построение цифровых антенных решеток для современных радиоэлектронных систем // Антенны. 2011. № 3(166). С.36-46. (0,7 п.л./0,35 п.л.).
9. Добычина Е.М., Малахов Р.Ю. Цифровые антенные решетки для бортовых радиолокационных систем // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 186. С. 176-183. (0,5 п.л./0,3 п.л.).
10. Добычина Е.М., Малахов Р.Ю. Мощные транзисторы для передатчиков бортовых радиолокационных систем // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 186. С. 184-190. (0,44 п.л./0,24 п.л.).
11. Добычина Е.М. Калибровка цифровых антенных решеток // Антенны. 2013. №9 (196). С. 46-55. (0,625 п.л.).
12. Добычина Е.М., Малахов Р.Ю. Приёмопередающий модуль цифровой антенной решетки // Антенны. 2014. № 2 (201). С. 53-57. (0,65 п.л./0,35 п.л.).

13. Снастин М.В., Добычина Е.М. Схемы построения мощного усилителя X-диапазона бортовых радиоэлектронных систем // Антенны. 2014. № 2 (201). С. 45-52. (0,65 п.л./0,25 п.л.).

14. Добычина Е.М., Малахов Р.Ю. Цифровой приемо-передающий модуль активной фазированной антенной решетки // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 213. С. 117-123. (0,5 п.л./ 0,25 п.л.).

15. Испытания антенных решеток бортовых радиолокационных систем в антенном измерительно-вычислительном комплексе / Е.М. Добычина [и др.] // Труды МАИ. 2016. № 91. Эл. № ФС77-69492 от 14.04.2017. URL:<http://trudymai.ru/published.php?ID=75661> (дата обращения 28.08.2018). (1,1 п.л./0,4 п.л.)

16. Добычина Е.М., Снастин М.В., Харалгин С.В. Исследование точности измерения коэффициента усиления антенн методом плоского экрана // Электросвязь. 2016. № 12. С. 33-38. (0,8 п.л./ 0,4 п.л.).

17. Криков Д.С., Добычина Е.М. Способы построения и элементная база быстродействующих широкополосных синтезаторов частот // Электросвязь. 2017. № 4. С. 33-38. (1 п.л./ 0,4 п.л.).

18. Добычина Е.М., Снастин М.В., Харалгин С.В. Исследование цифровой антенной решетки в экранированной безэховой камере // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 12. С. 136-139. (0,8 п.л./0,4 п.л.).

19. Добычина Е.М. Снастин М.В, Солод А.Г. Имитационное моделирование процесса калибровки цифровой антенной решетки // Электросвязь. 2018. № 12. С. 68-73. (1 п.л./0,5 п.л.).

20. Приемопередающий модуль бортовой цифровой антенной решетки: пат. №157114 РФ / Е.М. Добычина, Р.Ю. Малахов, М.В. Снастин; заявл. 19.03.2015; опубл. 20.11.2015. Бюлл. № 32. (0,7 п.л./0,4 п.л.).

21. Устройство калибровки многолучевой антенной решетки: пат. 166501 РФ / Добычина Е.М., Снастин М.В.; заявл. 23.05.2016; опубл. 27.11.2016. Бюлл. № 33. (0,7 п.л./0,5 п.л.).

22. Малогабаритный двухполяризационный волноводный излучатель фазированной антенной решетки с высокой развязкой между каналами: пат. 2655033 РФ / Л.И. Пономарев, А.А. Прилуцкий, А.А. Васин, Е.М. Добычина [и др.]; заявл. 06.07.2017; опубл. 23.05.2018. Бюлл. № 15. (1 п.л./0,2 п.л.).

23. Воскресенский Д.И., Добычина Е.М. Разработка модуля приемной широкополосной ЦАР // Материалы 17-й международной Крымской конференции

«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007) 10-14 сентября. Севастополь, 2007. Т. 2. С. 394-395. (Scopus, WOS). (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

24. Воскресенский Д.И., Большаков Ю.П., Добычина Е.М. Построение широкополосной ЦАР // Труды XIV международной научно-технической конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2008) 15-17 апреля. Воронеж, 2008. Т.1. С. 548-555. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

25. Добычина Е.М., Воскресенский Д.И. Разработка приемной многолучевой ЦАР // Материалы 18-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008) 8-12 сентября. Севастополь, 2008. Т. 2. С. 401-402. (Scopus). (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

26. Братчиков А.Н., Добычина Е.М. Калибровка цифровой антенной решетки // Материалы 19-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009) 14-18 сентября. Севастополь, 2009. Т. 2. С. 401-402. (Scopus). (0,125 п.л./ 0,1 п.л.). (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

27. Братчиков А.Н., Добычина Е.М. Цифровая антенная решетка с элементами СВЧ-фотоники // Материалы 20-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010) 13-17 сентября. Севастополь, 2010. Т. 2. С. 550-551. (Scopus). (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

28. Добычина Е.М. Калибровка цифровой антенной решетки // Труды 12-й международной конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2010» 31 марта-2 апреля. Москва, 2010. выпуск XII-2. С. 44-47. (0,25 п.л.).

29. Добычина Е.М. Адаптивный метод диагностики цифровой антенной решетки // 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. (0,25 п.л.).

30. Добычина Е.М., Клионовски К.К. Антенная решетка миллиметрового диапазона для многофункциональной бортовой РЛС // Материалы 17-й Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» 12-14 апреля. Воронеж, 2011. Т.3. С. 2055-2062. (0,5 п.л./0,3 п.л.).

31. Добычина Е.М., Бохин Д.Л. Проблемы аналого-цифрового преобразования ВЧ сигналов в цифровой антенной решетке (ЦАР) // Материалы 10-й международной конференции «Авиация и космонавтика - 2011». Москва, 2011 . С. 191-192. (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

32. Воскресенский Д.И., Добычина Е.М. Цифровая антенная решетка для многофункциональной бортовой РЛС // Материалы 21-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011) 12-16 сентября. Севастополь, 2011. С. 525-526. (Scopus). (0,125 п.л./0,1 п.л.).

33. Титов А.Г., Добычина Е.М. Расчет и моделирование линии передачи и излучателя контрольного сигнала (КС) для антенно-фидерного устройства (АФУ) сантиметрового и миллиметрового диапазона // Тез. докл. 10-й Международной конференции «Авиация и космонавтика - 2011». Москва, 2011 . С. 211-212. (0,125 п.л./0,1 п.л.).

34. Добычина Е.М., Бохин Д.Л. Аналого-цифровое преобразование в цифровых антенных решетках // Труды 14-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2012» 28-30 марта. Москва, 2012. выпуск XIV-1. С. 243-247. (0,25 п.л./ 0,15 п.л.).

35. Добычина Е.М. Антенный измерительно-вычислительный комплекс на базе безэховой камеры // Материалы 22-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012) 10-14 сентября. Севастополь, 2012. С. 477-478. (Scopus). (0,125 п.л.).

36. Петров И.А., Добычина Е.М. Мощный нитрид галлиевый усилитель 3-см длин волн // Тезисы 11-й международной конференции «Авиация и космонавтика - 2012». Москва, 2012. С. 309-310. (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

37. Dobychina E. , Malachov R., Snastin M. GaN pHEMT power amplifier for cellular network base station // 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON-2013) 23 – 27 June. Cartagena, Spain, 2013. INSPEC Accession Number: 13779155, 10.1109/ ICTON.2013.6602739. P. 1-4. (Scopus). (0,25 п.л./ 0,1 п.л.).

38. Добычина Е.М., Войтович М.И., Обухов А.Е. Измерение характеристик экранированной безэховой камеры // Материалы 23-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013) 8-13 сентября. Севастополь, 2013. С. 634-635. (Scopus). (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

39. Добычина Е.М., Клионовски К.К., Баклашов И.С. Цифровая антенная решетка миллиметрового диапазона // 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. (0,25 п.л./0,15 п.л.)

40. Цифровой приёмопередающий модуль интеллектуальной антенной решётки / Добычина Е.М. [и др.] // Материалы 23-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013) 8-13 сентября. Севастополь, 2013. С. 638-639. (Scopus). (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

41. Малахов Р.Ю., Добычина Е.М., Снастин М.В. Цифровой приемопередающий модуль бортовой активной фазированной антенной решетки // Материалы 1 всероссийской микроволновой конференции. Москва, 2013. С. 361-365. (0,25 п.л./ 0,1 п.л.).

42. Dobychina E., Malachov R., Snastin M. Digital transceiver module for on-board communication system // 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON-2014) 6-10 July. Graz, Austria, 2014. INSPEC Accession Number: 14526397. DOI:10.1109/ICTON.2014.6876333. P. 1-4. (Scopus). (0,25 п.л./ 0,1 п.л.).

43. Экстракция параметров мощных многосекционных транзисторов / Е.М. Добычина [и др.] // Материалы 24-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014) 7-13 сентября. Севастополь, 2014. С. 123-125. (Scopus). (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

44. Добычина Е.М., Снастин М.В., Бибко М.С. Бортовая волноводно-целевая антенная решетка // Материалы 24-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014) 7-13 сентября. Севастополь, 2014. С. 459-460. (Scopus). (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

45. Добычина Е.М., Снастин М.В., Малахов Р.Ю. Измерение коэффициента усиления антенн методом отражения // Материалы 25-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015) 6-12 сентября. Севастополь, 2015. Т.1. С. 449-450. (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

46. Снастин М.В., Добычина Е.М. Абсолютный метод измерения коэффициента усиления антенн // Материалы 14-й международной конференции «Авиация и космонавтика - 2015». Москва, 2015. С. 274-276. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

47. Малахов Р.Ю., Добычина Е.М., Снастин М.В. Передающая система распределенного радиолокационного комплекса // Аннотированный сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Расплетинские

чтения – 2016»; под общей редакцией Н.Э. Ненартовича. М.: ПАО «НПО «Алмаз». 2015. С. 87. (0,125 п.л./0,1 п.л.).

48. Добычина Е.М., Снастин М.В., Харалгин С.В. Исследование характеристик волноводно-щелевой антенной решетки в антенном измерительно-вычислительном комплексе на базе безэховой камеры // Тез. докл. 15-й Международной конференции «Авиация и космонавтика - 2016» 14-18 ноября. Москва, 2016. С. 372-374. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

49. Экспериментальное исследование цифрового диаграммообразования / Е.М. Добычина [и др.] // Материалы XLII международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения-2016» 12-15 апреля. Москва, 2016. С. 503-504. (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

50. Снастин М.В., Добычина Е.М., Обухов А.Е. Характеристики рассеяния антенных решеток на борту летательных аппаратов // Материалы 26-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016) 4-10 сентября. Севастополь, 2016. С. 1147-1153. (0,125 п.л./0,1 п.л.).

51. Волноводный излучатель с вращающейся поляризацией X-диапазона длин волн / Е.М. Добычина [и др.] // Материалы 27-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017) 10-16 сентября. Севастополь, 2017. С. 641-648. (0,5 п.л./0,2 п.л.).

52. Рупорная антенна X-диапазона длин волн, изготовленная методом 3D печати / Е.М. Добычина [и др.] // Доклады XLIV международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения -2018» 17–20 апреля. Москва, 2018. Т.1. С. 217-218. (0,125 п.л./0,1 п.л.).

53. Добычина Е.М., Снастин М.В. Исследование модели цифровой антенной решетки в безэховой камере // Материалы 28-й международной конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018) 9-15 сентября. Севастополь, 2018. С.1274-1278. (0,125 п.л./ 0,1 п.л.).

54. Добычина Е.М., Снастин М.В., Бебко М.С. Учет кроссполяризационной составляющей при измерениях характеристик антенн // Тезисы Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике-2015». Москва, 2015. С. 161-162. (0,125 п.л./0,1 п.л.).

55. Добычина Е.М., Снастин М.В., Обухов А.Е. Измерение характеристик рассеяния объектов // Тезисы докладов конференции «Иосифьяновские чтения 2017». Истра, 2017. С. 270-272. (0,2 п.л./0,1 п.л.).