

Акционерное Общество

«Концерн радиостроения
«Вега»

121170, г. Москва, Кутузовский пр-т, д.34
Тел.: +7(499) 753-40-04
Тел.: +7(499) 249-07-04
Факс: +7(495) 933-15-63

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор по науке

А.Т.Силкин



2015 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу
Малахова Романа Юрьевича «Модуль бортовой цифровой антенной
решетки», представленную на соискание учёной степени кандидата
технических наук по специальности
05.12.07 — «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Актуальность тематики диссертации

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

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

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

Многофункциональность РЭС достигается переходом на цифровое диаграммообразование (ЦДО), при котором решетка становится цифровой (ЦАР). Использование ЦДО позволяет повысить помехозащищенность РЭС, её динамический диапазон, скорость управления амплитудно-фазовым распределением. Поэтому тема диссертационной работы Малахова Р. Ю., посвященной решению **научной задачи** создания модуля бортовой цифровой антенной решетки, требующего определения оптимальной структуры как цифровой, так и СВЧ частей модуля бортовой ЦАР, при которой возможно уменьшение энергопотребления многофункциональной РЭС, является,



несомненно, **актуальной**. Автором правильно сформулированы цель, объект и предмет исследования.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы:

- предложена структура модуля, позволяющая уменьшить габариты и массу многоэлементной бортовой ЦАР за счет исключения СВЧ распределительной системы и управляемых фазовращателей;

- рассмотрена аналитическая модель формирователя сигналов (ФС), позволившая оценить влияние ошибок синтезатора сетки частот (ССЧ) и квадратурного модулятора (КМ) на выходной сигнал модуля ЦАР и сформировать требования к амплитудно-фазовому балансу КМ и уровню спектральной плотности шумов СВЧ генератора несущей – ССЧ с цифровым кольцом ФАПЧ;

- построена модель, позволяющая провести оценку и сравнение энергопотребления традиционной АФАР и ЦАР с предложенной структурой модуля. Результаты моделирования показали, что предложенная структура модуля обеспечивает снижение энергопотребления бортовой ЦАР на 3 – 5 % в диапазоне частот 1 – 18 ГГц при использовании коаксиальной разводки и на 2 – 3 % в диапазоне частот 10 – 40 ГГц при использовании волноводной разводки. Увеличение количества излучателей и требуемой выходной мощности приводит к дальнейшему уменьшению энергопотребления;

- разработана тестовая плата, обеспечивающая измерения и настройку одно – и многосекционных мощных СВЧ транзисторов в диапазоне от 100 МГц до 20 ГГц;

- разработаны и верифицированы нелинейные модели ряда отечественных и зарубежных мощных GaAs и GaN СВЧ транзисторов. Ошибка при моделировании входных и выходных сопротивлений транзисторов при этом составляла не более 7% в рабочей полосе частот;

- экспериментально подтверждено увеличение КПД и уровня выходной мощности усилителей, разработанных на основе предложенной в диссертационной работе модели, на 3 – 5 % и 8 – 10% соответственно в диапазоне частот 8,5 – 10,5 ГГц по сравнению с моделью Ангелова;

- на основании предложенной нелинейной модели разработан СВЧ усилитель мощности, диапазон рабочих частот которого составил 8,5 – 9,5 ГГц, выходная мощность не менее 4,5 Вт, КПД не менее 47%;

- разработанные топологии передающего и приёмного тракта модулей ЦАР обладают малыми массогабаритными характеристиками, а также низкой стоимостью, что позволяет использовать предложенную схему модуля в бортовых РЭС.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

- впервые предложена схемотехническая реализация приемопередающего модуля цифровой антенной решетки, позволяющая снизить энергопотребление бортовой многофункциональной

радиоэлектронной системы за счет использования в каждом модуле ССЧ с цифровым кольцом ФАПЧ;

- впервые развит метод нелинейного моделирования процессов в мощных многосекционных псевдоморфных СВЧ транзисторах на основе результатов их экспериментальных исследований;

- впервые предложена нелинейная модель транзистора, в которой учтена зависимость режима от совокупности параметров, влияющих на его основные энергетические характеристики;

- впервые разработана методика определения элементов эквивалентной электрической схемы мощного СВЧ транзистора, позволяющая увеличить точность определения его параметров по сравнению с существующими методиками.

Обоснованность и достоверность результатов исследования обеспечивается применением метода гармонического баланса для описания нелинейных электрических цепей, теории функций комплексного переменного, элементов линейного программирования, теории статистического анализа, матричных методов решения систем линейных алгебраических уравнений, теории матричного описания антенн и устройств СВЧ, электродинамического моделирование СВЧ устройств методом моментов.

Теоретическая значимость работы состоит в получении новых научных результатов, позволяющих на основе разработанной аналитической модели формирователя сигналов оценить влияние ошибок ССЧ и КМ на выходной сигнал передающего тракта модуля ЦАР и сформировать требования к амплитудно-фазовому балансу КМ и уровню спектральной плотности шумов СВЧ генератора несущей – ССЧ с цифровым кольцом ФАПЧ. Также в диссертационной работе предложен алгоритм определения параметров мощных СВЧ транзисторов и разработана нелинейная модель мощных СВЧ транзисторов, позволяющая определить режим работы транзистора для обеспечения высокого КПД при требуемой выходной мощности в заданной полосе рабочих частот.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке бортовых ЦАР многофункциональных РЭС, обеспечивающих более высокие энергетические характеристики.

Предложенный в работе алгоритм определения параметров мощных СВЧ транзисторов и нелинейная модель могут быть использованы при разработке СВЧ усилителей мощности, поскольку с их помощью могут быть получены более высокие значения КПД и выходной мощности в широком диапазоне частот. Разработанные при подготовке работы образцы мощных СВЧ усилителей с высоким КПД могут также быть использованы при создании новых образцов РЭС.

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

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

Структура диссертации логически обоснована и соответствует последовательности решения задачи, что и обеспечило достижения цели исследования.

Основные положения и выводы диссертационной работы достаточно опубликованы, в т.ч. в изданиях из Перечня ВАК, и апробированы на научно-технических конференциях.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Рекомендуется использование результатов диссертации при проведении разработок усилительных трактов приемопередающих модулей и передающих устройств на предприятиях ОАО Концерн «Вега».

В то же время при изучении диссертации возникли следующие замечания.

1. Во введении указано, что существенное изменение входных сопротивлений излучателей при сканировании и смене режима работы АФАР обуславливает изменение характеристик активных элементов модуля и может нарушить их устойчивость, однако анализ такого влияния при разработке усилителя мощности передающего тракта выполнен не был.
2. При анализе тепловых параметров усилителя мощности указаны импульсный и непрерывный режимы работы, однако из материалов работы неясно, для какого режима работы задано тепловое сопротивление примененных транзисторов, и возможно ли применение разработанного усилителя в непрерывном режиме работы.
3. При разработке формирователя сигналов передающего тракта не проведена представляющая практический интерес оценка влияния ошибок выбранного ССЧ с использованием разработанной в диссертации аналитической модели ФС.
4. При анализе ранее разработанных ППМ не указан критерий низкого динамического диапазона и малого КПД.

Приведённые замечания не затрагивают основных результатов, полученных в диссертации Малахова Р.Ю., в которой проведён детальный анализ структуры как цифровой, так и СВЧ частей модуля бортовой ЦАР, разработаны аналитическая модель формирователя сигналов, нелинейные модели транзисторов и сформулированы рекомендации по уменьшению энергопотребления ППМ. Работа выполнена на высоком уровне с привлечением современных качественно-количественных методов анализа и

компьютерных средств. Полученные результаты имеют существенное значение для проектирования ППМ бортовых многофункциональных РЭС.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Малахов Роман Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании секции №5 научно-технического совета АО «Концерн «Вега» (протокол от 17 апреля 2015 года).

Начальник отдела АО «Концерн «Вега»,
д.т.н., профессор

А.П. Курочкин

Заместитель начальника отдела по НИОКР
АО «Концерн «Вега», к.т.н.

А.В. Королев

Начальник лаборатории
АО «Концерн «Вега», к.т.н.

Н.А. Кушнерев