

Радиоэлектроника СВЧ – движение вперед

Научно-техническая конференция «РЭСВЧ-2024»

Часть 2

А. Кищинский¹, В. Миннебаев²

УДК 621.37:38 | ВАК 2.2.2

3–4 декабря 2024 года в Москве состоялась научно-техническая конференция «Радиоэлектроника СВЧ – технологии, компоненты, приборы, комплексы», посвященная 20-летию АО «Микроволновые системы». В первую часть статьи, опубликованную во втором номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2025 год, вошли материалы секции 1 и секции 2 конференции. В данном номере обсуждаются доклады секций 3–5, посвященные вопросам проектирования, производства и эксплуатации СВЧ-усилителей, многофункциональных СВЧ-приборов и радиоэлектронных средств, а также изделий твердотельной электроники в составе радиотехнических комплексов СВЧ-диапазона.

Секция 3 конференции была посвящена проектированию, конструированию, испытаниям и эксплуатации СВЧ-усилителей различного назначения.

Кондратенко Алексей Владимирович, руководитель обособленного подразделения АО «Микроволновые системы» в Нижнем Новгороде, представил обзорный анализ опыта проектирования СВЧ МИС GaN-усилителей: сверхширокополосных непрерывного режима, резонансных импульсного режима в X- и Ku-диапазонах, а также комплексированных (front-end module) усилителей Ku-диапазона. Анализ проектов показал, что необходимы дополнительная характеристика используемых технологических процессов и получение собственной модельной базы для применения в проектах, требующих коррекции схмотехнических и топологических решений в зависимости от условий и режимов эксплуатации GaN/SiC ЭКБ.

Семенова Людмила Михайловна, инженер-конструктор ЗАО «НПП «Планета-Аргалл», доложила о параметрах разработанного предприятием усилителя GaAs МШУ – модуль А1.221. Модуль обладает коэффициентом шума $K_{ш} < 1,5$ дБ при коэффициенте усиления $K_y > 22$ дБ

в диапазоне $\Delta F = 2,0–4,0$ ГГц и выпускается как в бескорпусном исполнении, так и в металлокерамических корпусах для поверхностного монтажа.

Калинин Борис Вячеславович, директор ООО «Микровейв АйСи», представил результаты проектирования и изготовления GaAs МШУ X-диапазона с $K_{ш} < 1,5$ дБ при $K_y > 25$ дБ и $P_{1дБ} > 12$ дБм в диапазоне частот $\Delta F = 8,0–12,0$ ГГц и диапазоне температур $\Delta T = -60...85$ °C. В сообщении подтвержден высокий уровень совпадения модельных и измеренных характеристик.

Гнатюк Дмитрий Леонидович, заведующий лабораторией ФГБУН ИСВЧПЭ РАН, рассказал о разработке МИС-преобразователя СВЧ-сигнала Ku-диапазона, изготовленного на технологической линейке предприятия на гетероструктуре GaN/Al₂O₃ диаметром 50 мм от АО «Элма-Малахит». Кристаллы в корпусе производства АО «НИИПП» выдержали испытания на воздействие факторов космического пространства без потери работоспособности.

Калентьев Алексей Анатольевич, директор моделей ООО «50ом Технолоджиз», посвятил свой доклад результатам численных и натурных экспериментов по проектированию различных функциональных блоков малошумящих усилителей, аттенуаторов, фазовращателей, коммутаторов на основе технологических процессов 0,25 мкм GaAs pHEMT и 0,5 мкм GaN HEMT, реализованных в АО «Светлана-Рост» (Санкт-Петербург). Показано, что при использовании программных модулей разработанной этой компанией интеллектуальной САПР

¹ АО «Микроволновые системы», заместитель генерального директора – главный конструктор, ak@mwsystems.ru.

² АО «Микроволновые системы», заместитель генерального директора по развитию ЭКБ, vm@mwsystems.ru.

«Смекалец» разработчик СВЧ МИС оперативно получает несколько альтернативных схемных решений, удовлетворяющих требованиям к электрическим характеристикам и готовых к топологической реализации, при этом дополнительное время корректировки топологии, включая электромагнитный анализ, составляет от 4 часов.

Евграфов Александр Юрьевич, ведущий инженер АО «НПП «Пульсар», доложил о результатах электромагнитного моделирования МИС СВЧ фазовращателя, изготавливаемой по C³MOSHFET-технологии на гетероструктурах AlGaIn/GaN. Пятиразрядный фазовращатель частотного диапазона 8–12 ГГц обеспечивает фазовые сдвиги 11,25°, 22,5°, 45°, 90° и 180° при СКВ фазовой ошибке ≤ 5°; начальные потери в рабочем диапазоне частот менее 6 дБ; максимально допустимую входную мощность не менее 10 Вт в импульсном режиме $T_{имп} = 100$ мкс, $Q = 10$, $t_{ф} = 40$ нс. При этом МИС СВЧ управляющих приемопередающих устройств по C³MOSHFET-технологии функционируют без потребления постоянного тока. Главное преимущество ЭКБ СВЧ, изготавливаемой по данной технологии – это отсутствие омических контактов и барьера Шоттки, что обеспечивает им повышенную надежность: высокую температурную устойчивость $T_{осн} \geq 200$ °С, а также высокую устойчивость к накопленной дозе гамма-излучения $\geq 10^7$ рад (или ≥ 10 Мрад) [4].

Емельянов Борис Вячеславович, заместитель начальника отдела АО «НПП «Пульсар», рассказал о совместной разработке АО «НПП «Пульсар» и АО «Светлана-Рост» семейства многокристальных корпусированных СВЧ-транзисторов и транзисторных сборок L-, S- и C-диапазонов на основе кристаллов GaN/SiC, изготавливаемых по технологии PNO5D. Разработанные GaN-транзисторные сборки обладают выходной мощностью от 20 до 250 Вт (рис.10). В АО «НПП «Пульсар» с использованием данных транзисторныхборок разработаны и серийно выпускаются импульсный усилитель мощности S-диапазона с выходной мощностью 1200 Вт и приемопередающий модуль L-диапазона с выходной мощностью 700 Вт.

Радченко Алексей Владимирович, заместитель главного конструктора – начальник проектного отдела АО «Микроволновые системы», сделал доклад о реализации различных схем суммирования мощных усилительных каскадов с малыми потерями. Были представлены достигнутые результаты суммирования 16 каналов усиления на основе GaN МИС в сверхширокополосном диапазоне частот от 4 до 18 ГГц. Приведены результаты реализации схем суммирования с эффективностью суммирования от 65 до 90%, а также рассмотрены способы отвода тепла от элементов планарных конструкций. Докладчик показал, что в непрерывном режиме такой усилитель демонстрирует уровень мощности от 80 до 140 Вт при использовании напряжения питания +26 В для выходных GaN-микросхем. При этом он отметил, что полученный уровень

мощности, достигнутый в результате оптимизации схем суммирования и конструкции, позволил на этапе производства снизить напряжение питания до +23 В для существенного увеличения надежности изделия при сохранении КПД и высокого уровня мощности от 70 до 130 Вт во всем диапазоне частот. Также были продемонстрированы полученные результаты суммирования усилительных каскадов на основе объемных квадратурных сумматоров с лицевой связью с эффективностью суммирования от 85% до 90% в диапазоне от 4,4 до 5 ГГц и выходной непрерывной мощностью более 180 Вт.

Иовдальский Виктор Анатольевич, начальник лаборатории АО «НПП «Исток» им. А. И. Шокина», рассказал об исследованиях тепловых характеристик двухъярусной конструкции усилителя мощности СВЧ-диапазона [5]. Исследования показали, что наличие пластины из электро- и теплопроводящего материала с теплопроводностью 1000–2000 Вт/(м·К) толщиной 0,5 мм, установленной на обратной стороне GaAs (GaN)-кристалла усилителя мощности второго яруса, снижает его температуру на 15–20 °С и выравнивает разницу температур между кристаллами первого и второго яруса до $\Delta T = 1,5\text{--}3$ °С.

Вишневский Евгений Геннадьевич, начальник отдела ООО НПП «Радар-Прибор», представил результаты разработки мощного усилительного модуля L-диапазона на GaN HEMT для систем управления воздушным движением. Модуль обладает выходной мощностью $P_{вых.имп} \geq 3000$ Вт с КПД > 55% при $\tau = 10$ мкс и $Q = 200$ в диапазоне частот $\Delta F = 950\text{--}1560$ МГц, обеспечивая возможность одновременной работы на частотах в соответствии с ICAO и ГОСТ. В усилителе применены оригинальные многослойные делители – сумматоры мощности, а измерения спектральных характеристик подтвердили, что они не уступают параметрам использовавшихся ранее усилителей

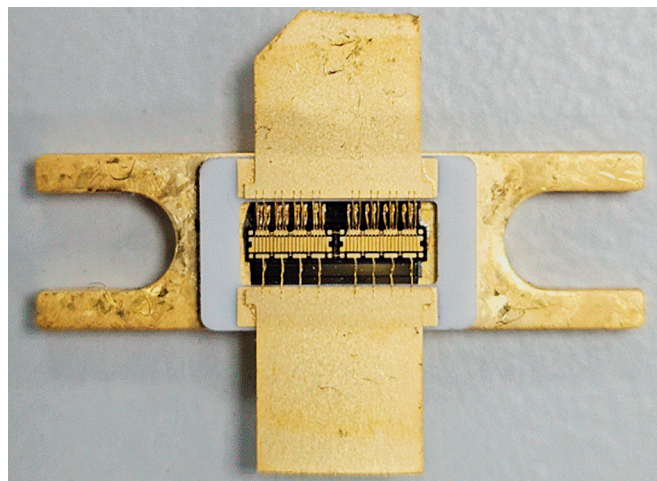


Рис. 10. Транзисторная сборка УМ-2731-200/6 с $P_{вых} = 210\text{--}250$ Вт при $K_v > 12$ дБ в диапазоне частот $\Delta F = 2,7\text{--}3,1$ ГГц

на биполярных импульсных транзисторах, обеспечивая увеличение выходной мощности и длительности импульса.

Туральчук Павел Анатольевич, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ», в своем докладе предложил конструкцию усилителя мощности (УМ) (рис.11) на базе транзистора GaN HEMT с пиковой мощностью 6 Вт и перестраиваемой выходной цепью на основе сегнетоэлектрического вариконда, предназначенного для работы на частоте 2,5 ГГц. Представлены результаты экспериментального исследования характеристик КПД усилителя в условиях модуляции нагрузки. Результаты измерений при изменении выходной мощности в пределах 8 дБ от своего максимального значения показывают, что управление нагрузкой УМ с помощью вариконда обеспечивает КПД не ниже 50%. Линейность предложенного устройства оценивалась с помощью измерений IMD3, а также путем измерения ACPR – коэффициента мощности по соседнему каналу (с использованием сигнала LTE). Величина ACPR оказалась не выше -25 дБ и может быть улучшена до -40 дБ при введении цифровых предискажений.

Суконкин Сергей Александрович, ведущий инженер ООО «Планар», доложил о результатах совместной работы с ООО «НПК Таир» по разработке алгоритмов, дополнительных узлов и стенда для измерения транзистора методом load-pull с применением активной инжекции. Эксперименты показали идентичность результатов измерений с результатами, полученными на стенде компании Maury Microwave. Особенности нового подхода к измерениям позволяют повысить скорость измерений при проведении быстрой калибровки, а также дают возможность измерять высокие коэффициенты отражения в диапазоне частот свыше 18 ГГц, что выгодно отличает разработанный стенд от зарубежного аналога.

Редька Алексей Владимирович, начальник отдела АО «Микроволновые системы», рассказал о разработке, тестировании и включении в производственный процесс предприятия автоматизированного стенда контроля параметров СВЧ-усилителей мощности. Стенд

предназначен для проведения приемо-сдаточных испытаний более 30 типов серийно выпускаемых изделий. В сообщении показаны результаты изготовления оригинальных СВЧ-модулей, разработки алгоритмов и программного обеспечения, а также приведены сравнительные показатели эффективности применения автоматизации процессов, обеспечивающей сокращение времени испытаний до 10 раз.

Слепенков Антон Владимирович, старший научный сотрудник АО «Институт микроволновых интегральных систем», отметил, что в СВЧ-усилителях с низким уровнем фазового шума вклад в СПМШ вносят не только активные элементы, но и пассивные: резисторы, конденсаторы, индуктивности и т. д. Наибольший интерес для исследования представляют мультипликативные шумы вида $1/f$, так как они переносятся в область рабочих частот усилителя при отстройке от несущей на 1–10 000 Гц и преобладают над остальными видами шума. Результаты измерений подтвердили, что шумы вида $1/f$ пассивных компонентов зависят не только от применяемых материалов, конструкции и электрических режимов функционирования, но и от фабрики производителя, от партии изделий, что подтверждает необходимость тщательного отбора ЭКБ для изготовления изделий со специальными требованиями к параметрам фазового шума.

Григорьев Кирилл Анатольевич, инженер 2-й категории ООО «ИПК «Электрон-Маш», представил технические решения в виде модульных измерительных усилителей серии iGPA с $P_{\text{ВЫХ}} = 3$ Вт в полосе $\Delta F = 2\text{--}18$ ГГц и приборного импульсного усилителя iSPA с $P_{\text{ВЫХ}} = 8$ Вт в полосе $\Delta F = 6\text{--}18$ ГГц, применение которых позволяет автоматизировать измерения на большом уровне мощности и заменить импортные аналоги.

Селиванов Максим Викторович, инженер 2-й категории ООО «ИнноЦентр ВАО», доложил о разработанной линейке модулей управления питанием iPWR, включающих в себя контроллеры питания и модуляторы для СВЧ-усилителей мощности на базе GaAs- и GaN-технологий. Модули изготовлены на отечественной ЭКБ в виде многослойной печатной платы и в металлопластиковых корпусах.

Ферапонтова Алиса Максимовна, начальник маркетингового отдела ООО «ИПК «Электрон-Маш», представила систему быстрого прототипирования СВЧ-трактов «СВЧ КИТ» (рис.12) на основе ЭКБ отечественного производства. СВЧ КИТ является универсальным конструктором, созданным с использованием улучшенных технических решений, для быстрого прототипирования СВЧ-трактов в диапазоне частот до 40 ГГц. Унифицированная платформа позволяет объединить доступную номенклатуру отечественной ЭКБ и ускорить разработку радиотехнических устройств, а также может

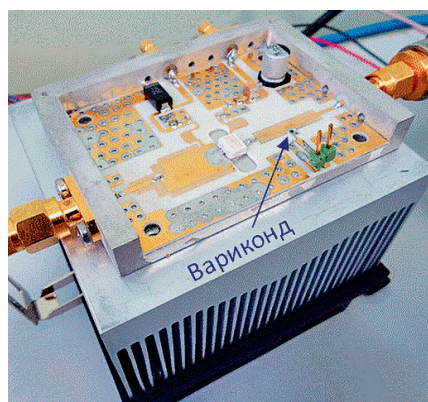


Рис. 11.
Усилитель
мощности
с модуляцией
нагрузки
управляемым
компонентом
в выходной
согласующей
цепи

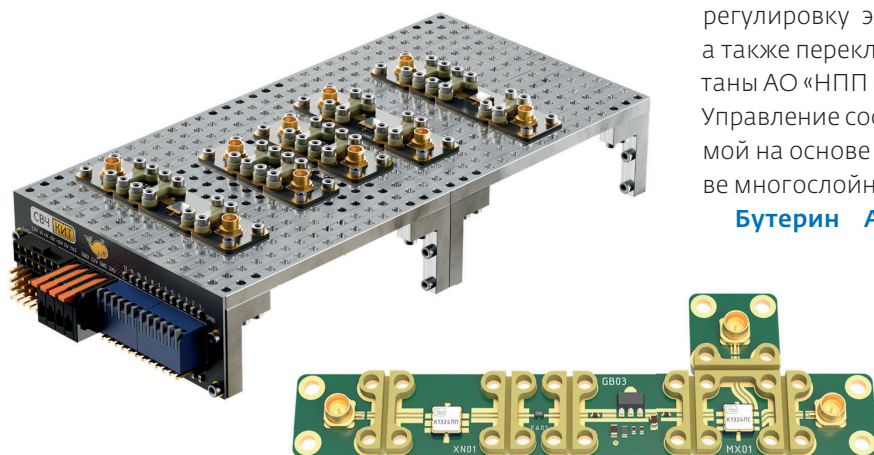


Рис. 12. СВЧ КИТ – система быстрого прототипирования радиоэлектронных трактов

использоваться для проведения лабораторных работ в вузах.

Кудюков Егор Владимирович, инженер технической поддержки ООО «ПЛМ Урал», рассказал о возможностях применения САПР «Гамма» для моделирования сложных СВЧ-систем, включая антенно-фидерные устройства (в том числе ФАР), ВЧ- и СВЧ-печатные платы, элементы СВЧ-цепей: линии передачи, делители, фильтры и т.п., резонаторы, усилители. В САПР можно проводить расчеты многолучевого распространения радиочастотного сигнала между передающей (T_x) и приемной (R_x) антеннами, отношения сигнал-шум, пропускной способности, расчеты моноэлектронной эффективной площади рассеяния проводящих тел с учетом переотражений от плоских и криволинейных поверхностей и многие другие. На ряде примеров показана сходимость решений САПР «Гамма» к решениям зарубежных САПР Ansys HFSS и ADS.

Участники **секции 4** обсуждали вопросы проектирования, производства и эксплуатации многофункциональных СВЧ-приборов.

Пидько Константин Геннадьевич, ведущий инженер АО «КНИРТИ», представил результаты разработки и испытаний макета восьмиканального приемо-передающего модуля (ППМ) сантиметрового диапазона длин волн. Изделие обеспечивает симплексный режим работы двух независимых сигналов и необходимое фазовое распределение в рабочей полосе частот более полутора октав. Каждый приемо-передающий канал (ППК) включает устройство ввода СВЧ-сигнала, антенный коммутатор, приемный и передающий тракт с двумя трактами формирования амплитудно-фазовых распределений. Отличительной особенностью является применение отечественных СВЧ МИС, обеспечивающих многофункциональную

регулировку электрической длины, фазы, амплитуды, а также переключение СВЧ-сигналов. СВЧ МИС разработаны АО «НПП «Исток» им. А. И. Шокина» и АО «НИИПП». Управление состояниями осуществляется цифровой схемой на основе ПЛИС, конструкция реализована на основе многослойной печатной платы.

Бутерин Александр Владимирович, руководитель обособленного подразделения АО «Микроволновые системы» в Саратове, представил результаты совместных с АО «НПП «Радар ммс» работ по глубокой модернизации и освоению в серийном производстве восьмиканальных ППМ АФАР X-диапазона частот. Модуль создан на базе унифицированных ППК [6] с габаритными размерами $24 \times 19 \times 4$ мм

и массой менее 5 г, которые изготовлены на основе комплекта МИС, разработанных дизайн-центром предприятия и выпускаемых серийно [7]. Габаритные размеры ППМ составляют $102 \times 159 \times 17$ мм, масса не более 400 г. Докладчик отметил подтвержденную на практике возможность эффективной и успешной совместной разработки проекта сложного СВЧ-устройства силами команды специалистов разных предприятий в разных городах (Москва, Санкт-Петербург, Саратов, Нижний Новгород).

Жуков Владимир Владимирович, ведущий инженер-электроник АО «НТЦ Элинс», доложил о разработке и испытаниях твердотельного СВЧ-генератора для применения в составе установки плазменной очистки в качестве источника высокочастотной энергии, работающего в диапазоне частот 2300–2500 МГц, с регулируемой выходной мощностью до 300 Вт (рис.13). Генератор функционально состоит из блока формирования опорного сигнала (БФОС), усилителя мощности (УМ), системы питания и блока управления. БФОС, в свою очередь, включает в себя задающий генератор, управляемый аттенюатор и предварительный усилитель с выходной мощностью 200 мВт. Частота СВЧ-генератора может перестраиваться с регулируемым шагом от 500 кГц, а установленный



Рис. 13. Многофункциональный СВЧ-генератор диапазона 2,3–2,5 ГГц

в составе БФОС аттенюатор позволяет плавно (программируемый шаг от 10 Вт) регулировать выходную мощность генератора от 0 до 300 Вт. Цифровое управление и контроль параметров генератора осуществляется с помощью подключенного ПК по интерфейсу USB при использовании специального программного обеспечения с графическим интерфейсом.

Вислоус Павел Анатольевич, инженер I категории ООО «Элиарс», представил результаты исследования параметров основных функциональных узлов перспективного бортового двухполяризационного радиолокатора переднего обзора, отметив, что требования многофункциональности и многорежимности при расширении углов обзора приводят к необходимости применения двухполяризационных режимов, в том числе с переключением между импульсами. Использование дополнительных механических приводов и специализированных формирователей сигналов существенно усложняет конструкцию устройства в целом. Реализация энергетических параметров радиолокатора требует применения АФАР с выходной мощностью до 20 Вт на канал с использованием GaN-микросхем усилителей мощности последнего поколения с КПД до 50% и многоканальных ППМ с применением Si-микросхем четырехканальных векторных формирователей. Для цифрового формирователя требуется использование современных АЦП/ЦАП и ПЛИС большого объема.

Терентьев Андрей Александрович, технический директор ООО «Скоростные системы связи», доложил о результатах совместных с АО «НПФ «Микран» работ по разработке методологии, ПО, измерительной оснастки и электронного калибратора, обеспечивающих векторные измерения и контроль параметров изделий микроволновой техники (SMD-компоненты и СВЧ-транзисторы) в микрополосковых трактах в диапазоне частот от 100 МГц до 20 ГГц.

Агуреев Александр Юрьевич, руководитель направления контрольно-измерительной техники ФГУП «НПП «Гамма», отметил, что оценка и максимизация динамического диапазона (ДД) измерений необходимы в приложениях, когда требуется провести одновременные измерения по спектру для сигналов, сильно отличающихся по уровню, при этом ограничения ДД связаны с собственными шумами и нелинейностью трактов анализаторов спектра. Докладчик представил результаты анализа методов экспериментального определения ДД анализаторов спектра и выявления их существенных особенностей, предложил рекомендации в этой части, а также привел результаты измерений для анализаторов спектра серии СК4-МАХ6 в диапазоне частот от 10 кГц до 26,5 ГГц, показавших динамический диапазон более 100 дБ.

Горбунов Степан Игоревич, аспирант НИУ «МЭИ», представил сравнительные результаты моделирования

и измерения параметров полосно-пропускающих SIW-фильтров, изготовленных на Al_2O_3 -подложке толщиной 0,5 мм. Отмечены высокая сходимость результатов измерений и моделирования, а также качественные преимущества характеристик SIW-фильтров по сравнению с микрополосковыми ППФ при использовании одной и той же технологии изготовления.

Калмыков Никита Сергеевич, ассистент СПбГЭТУ «ЛЭТИ», в своем докладе рассмотрел вопросы разработки и применения нефостеровских элементов (НФЭ) для реализации широкополосных инверторов иммитанса и СВЧ-фильтров с улучшенными частотными характеристиками на их основе. Была представлена пошаговая методика разработки НФЭ, реализующих заданную отрицательную емкость. С применением инверторов иммитанса на основе НФЭ с отрицательной емкостью разработаны двух- и трехзвенные полосовые фильтры с центральной частотой 2,45 ГГц и относительной полосой пропускания 30%. Показано, что использование инверторов с НФЭ в составе полосовых фильтров с переменными конденсаторами снимает фундаментальные ограничения на диапазон перестройки центральной частоты фильтра, обусловленные необходимостью поглощения отрицательных элементов инвертора элементами резонансных контуров фильтра. Представлен перестраиваемый полосовой фильтр с полосой пропускания 735 МГц и перестройкой центральной частоты от 1225 МГц до 3700 МГц.

Леонтьев Александр Дмитриевич, ассистент СПбГЭТУ «ЛЭТИ», доложил о способе повышения чувствительности микрофлюидного резонансного датчика измерения диэлектрической проницаемости жидкостей, оснащенного плоскопараллельным конденсатором с каналом для протекания исследуемой жидкости между обкладками. Резонансная частота датчика смещается при изменении емкости конденсатора путем расширения диапазона перестройки резонансной частоты контура с помощью перестройки емкости переменного конденсатора (при сохранении или увеличении его добротности). В основе способа лежит последовательное подключение к переменному конденсатору нефостеровского элемента (НФЭ), реализующего отрицательную емкость. На практическом примере продемонстрировано увеличение чувствительности микрофлюидного резонансного датчика более чем на 120% для жидкостей с относительной диэлектрической проницаемостью выше 20 при подключении к датчику НФЭ с отрицательной емкостью, что повышает точность идентификации или различения жидкостей с высокими значениями диэлектрической проницаемости.

Филатов Сергей Евгеньевич, главный технолог, и **Смирнов Владимир Владимирович**, ведущий инженер-технолог АО «Микроволновые системы», в совместном докладе представили результаты, полученные при

автоматизации технологических процессов в производстве СВЧ-приборов и модулей. В качестве примеров были представлены процесс герметизации модулей пайкой, позволивший за счет применения промышленного робота сократить время операции в 5 раз, и процесс раскроя технологических материалов на режущем плоттере, позволивший сократить рабочее время в 3,2 раза.

В рамках **секции 5** участники обсуждали особенности применения и эксплуатации изделий твердотельной электроники в составе радиотехнических комплексов СВЧ-диапазона, новые требования и принципы построения многофункциональных РЭС.

Чернов Владимир Германович, заместитель главного конструктора – начальник отдела комплексного проектирования АО «Микроволновые системы», доложил о разработке многофункциональной радиотехнической системы обеспечения безопасности полета вертолета, призванной обеспечить безопасную эксплуатацию летательного аппарата во всем фазовом пространстве ожидаемых условий эксплуатации, автономное применение при отсутствии навигационной инфраструктуры, а также информационную поддержку экипажей в резко изменяющихся условиях при выполнении всех видов полетных заданий. В докладе представлены возможные проблемы полета и способы их решения с помощью нового бортового оборудования – так называемой многофункциональной системы по принципу «все в одном».

Крылов Борис Витальевич, начальник центра микроэлектроники АО «ЦНИРТИ им. А. И. Берга», рассказал об особенностях применения переключательных матриц, понижающих и повышающих конвертеров, маломощных усилителей и усилителей мощности и других изделий твердотельной СВЧ-электроники в приемной и передающей аппаратуре, в которой реализуются функции поляризационного приема, пеленгации, мониторинга сигнальной обстановки и одновременного излучения сигналов в заданных направлениях с выбранными приоритетами посредством малоэлементных АФАР.

Вислоус Павел Анатольевич, инженер 1 категории ООО «Элиарс», представил перспективный способ построения компактной многоканальной приемопередающей АФАР для авиационного радиолокатора с воздушным охлаждением, обладающей следующими преимуществами:

- тепловыделяющие ППМ располагаются на задней плоскости конструкции, обеспечивая максимально удобную теплопередачу на «заднюю стенку АФАР» при любом типе охлаждения, что позволяет использовать GaN МИС в оптимальных тепловых режимах;
- «плоская» многослойная конструкция АФАР существенно снижает толщину и общую массу изделия;

- отсутствие необходимости монтажа открытых кристаллов (при необходимости их использования они заранее устанавливаются в SMD-корпуса);
- доступность выходных разъемов антенного полотна при настройке/калибровке АФАР;
- интегрированная компоновка всего радиолокатора в одной конструкции с единой системой охлаждения.

Ефимов Андрей Геннадьевич, начальник отдела АО «Ижевский радиозавод», доложил об опыте изготовления модулей ФАР и АФАР L- и X-диапазонов в условиях невозможности поставки СВЧ ЭРИ категорий military и space путем их замены как на отечественные ЭРИ (ЭРИ ОП), так и на ЭРИ ИП категории commercial с проведением дополнительных испытаний. При этом отмечено, что реализация фазовращателей в виде ГИС позволяет сократить потери в тракте за счет малого (3–4) числа разрядов при использовании диодов с балочными выводами, унифицированные корпуса мощных транзисторов позволяют проводить замену типа транзистора без изменения конструкции модуля, а замена управляющих интегральных схем требует обновления программного обеспечения.

Баринев Дмитрий Анатольевич, начальник лаборатории обособленного подразделения АО «Микроволновые системы» в Саратове, представил методологию разработки широкополосного быстродействующего синтезатора с низким уровнем фазового шума, основанную на использовании каскадов расширения диапазона перестройки частоты [8]. Основные параметры синтезатора частот: диапазон выходных частот от 10,948 до 21,895 ГГц; шаг перестройки менее 1,2 МГц; максимальное отклонение при аппроксимации сетки выходных частот с шагом 1 МГц не более 0,56 МГц; время перестройки частоты 30–50 нс; уровень вносимого фазового шума (для выходной частоты 20 ГГц): при отстройке от несущей 10 кГц – не более -135 дБн/Гц; при отстройке от несущей 1 МГц – не более -140 дБн/Гц. При этом полоса перестройки может быть легко расширена до нескольких октав за счет использования на выходе делителя частоты на 2^k или умножителя частоты в 2^m раз.

Королёв Алексей Владимирович, начальник отдела АО «ВНИИРТ», представил два доклада. Первый посвящен исследованию ошибок квантования при формировании гармонического колебания в цифровых вычислительных синтезаторах (ЦВС). В работе исследован спектр дискретизированного колебания на выходе ЦВС и выполнен анализ паразитных спектральных составляющих (ПСС), связанных с угловой модуляцией, при этом их спектр представлен в зависимости от частоты отстройки от несущей частоты в логарифмическом масштабе в одной боковой полосе, как это обычно делается в анализаторах источников сигналов. Рассчитанные фазовые шумы хорошо соответствуют экспериментально

полученной спектральной плотности мощности фазовых шумов как в области, где преобладают фликкер-шумы, так и в области, где преобладает влияние побочных спектральных составляющих, обусловленных ошибками квантования. Во втором докладе приводятся результаты моделирования фазовых и амплитудных шумов многоканальных ЦАП и ЦВС, выполненного на основе расчетных соотношений, учитывающих коррелированные составляющие шумов. При расчетах учитывалось, что схемы синхронизации и выходные коммутаторы многоканальных схем цифрового синтеза (МСЦС) образуют тракт приема и распределения тактового колебания. Исследования подтвердили присутствие коррелированных составляющих в спектрах как фазовых, так и амплитудных шумов суммарных выходных колебаний в исследованных МСЦС. Также было показано, что влияние фазовых шумов тракта приема и распределения тактового колебания приводит к увеличению фазовых шумов суммарных выходных колебаний МСЦС.

Румянцев Кирилл Викторович, директор департамента ООО «РШ Тех», провел анализ потребностей радиоэлектронной отрасли в решении для измерения фазового шума, показал коммерчески доступные, серийно производимые приборы, их базовые характеристики и варианты применения, а также представил новейшую российскую разработку – анализатор спектра и фазовых шумов PSA26, включающий в себя базовые возможности спектрального анализа с динамическим диапазоном более 100 дБ, возможность измерения фазовых шумов в непрерывном и импульсном режимах с чувствительностью лучше, чем -150 дБн/Гц (частота 1 ГГц, отстройка 10 кГц, режим непрерывной генерации), а также приложения для анализа параметров импульса и внутриимпульсной модуляции ЧМ/ФМ.

Брусова Анна Александровна, ассистент РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, представила результаты исследований частотно-временных параметров запросного сигнала

твердотельного радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) на A_3B_5 компонентной базе при проведении натурных испытаний. В результате натурного моделирования на программно-аппаратном макете выявлены и систематизированы основные проявления нестабильности работы и факторы, влияющие на разрешение РСА: ошибки синтезатора (программных установок) запросного ЛЧМ-сигнала; некорректная работа системы питания оконечного усилителя, включая ошибки программного управления; нарушения теплового режима функционирования; ошибки установки профилей и параметров запросного ЛЧМ-импульса.

Налогин Иван Алексеевич, начальник отдела АО «НПП «Исток» им. А. И. Шокина», отметил, что при проектировании и проведении испытаний цифровых приемопередающих систем целесообразно проводить моделирование и натурную отработку приема и передачи данных с использованием активных трансиверов с цифровым формированием отраженного запросного сигнала. Было выполнено макетирование канала передачи данных цифрового ППМ на существующих разработках для ускоренной отработки алгоритмической части радарной системы. Для прототипирования использовалась система на базе трансивера LMS7002M MIMO FPRF и ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE40F23 100 кГц–3,8 ГГц, управляемая через библиотеку, сформированную на программном пакете GNU Octave. С целью создания отраженного сигнала применялся код построения ЛЧМ с доплеровским и временным сдвигом, формируемый подпрограммой на языке Python. В результате использования оснастки удалось провести исследования особенностей работы радаров P-, L- и S-диапазонов.

Шевченко Роман Алексеевич, руководитель обособленного подразделения АО «Микроволновые системы» в Санкт-Петербурге, поделился результатами разработки радиомодема стандарта DVB-S2 для спутниковых широкополосных систем связи. В докладе проведен обзор существующих вариантов (архитектур) построения спутниковых терминалов широкополосной связи и базовых технологий, а также представлены результаты исследования радиотехнических характеристик макетов, изготовленных в двух вариантах: классический SDR-модем и «универсальная» вычислительная платформа 3U VPX с функцией модема (рис.14).

Ларьков Дмитрий Анатольевич, инженер ООО «Т8-НТЦ», представил результаты разработки комплекса устройств для передачи радиочастотного аналогового сигнала по оптическому волокну. В докладе выполнено сравнение параметров изделий, изготовленных на импортных и отечественных компонентах, в диапазоне температур от -10 до 50 °С, а также приведены целевые технические параметры радиофотонного комплекса в диапазоне частот от 0,5 до 26 ГГц.



Рис. 14. «Универсальная» вычислительная платформа с функцией модема



МИКРОВОЛНОВЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТ • КАЧЕСТВО

**Ведущий российский СВЧ ФАБЛЕСС-ЦЕНТР,
осуществляющий весь комплекс работ по разработке
кристаллов, корпусированию СВЧ-компонентов
и испытаниям**



НАШИ ВОЗМОЖНОСТИ - ВАШЕ ПРЕИМУЩЕСТВО:

- Разработка, изготовление и поставка СВЧ МИС любой сложности на основе GaAs и GaN
- 100% контроль и гарантия качества
- Индивидуальный подход
- Минимальные сроки от разработки до поставки
- Техническая инженерная поддержка

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»

105122, Россия, г. Москва,
Щёлковское шоссе, д. 5, стр. 1

Тел.: +7(499) 644-21-03

mwsystems@mwsystems.ru

www.mwsystems.ru



В процессе работы НТК «РЭСВЧ-2024», выступлений участников, обсуждений тематик и вопросов по докладам, а также в ходе свободной дискуссии были высказаны следующие мнения:

- основными проблемными вопросами развития радиоэлектронных средств СВЧ-диапазона являются отсутствие полных приборных рядов изделий СВЧ; промышленных технологий и производств по изготовлению гетероструктур и СВЧ-приборов на основе GaN HEMT, GaAs HBT, SiGe BiCMOS во всех востребованных частотных диапазонах; специальных электронных материалов и особо чистых газов;
- в настоящее время требуют развития все технологические направления СВЧ-электроники во всех используемых частотных диапазонах. При этом ускоренного развития требует полупроводниковая СВЧ-электроника на основе материалов A_3B_5 и кремний-германия, в первую очередь определяющая создание перспективных радиоэлектронных систем;
- использование целого ряда ЭРИ ИП в современных и перспективных РЭС является научно, технически и экономически обоснованным;
- кооперация разработчиков технологий, ЭКБ, приборов, аппаратуры и РЭС остается «стихийной», что не позволяет обеспечить эффективное взаимодействие по всей цепочке производства;
- несмотря на прогнозируемую массовость российского рынка базовых станций 5G/6G для потребления СВЧ ЭРИ ОП, представители системообразующих компаний игнорируют отечественного производителя ЭКБ, о чем также свидетельствует отсутствие докладов по данной тематике.

Научно-техническая конференция «Радиоэлектроника СВЧ – технологии, компоненты, приборы, комплексы»,

работа которой направлена на взаимный обмен научной, технической и организационной информацией, а также на формирование новых кооперационных связей между всеми участниками жизненного цикла радиоэлектронных средств, всемерно способствовала коллективным встречам специалистов различных предприятий. Участники НТК подтвердили высокий уровень представленных докладов и организации мероприятия, проведенного полностью силами АО «Микроволновые системы».

ЛИТЕРАТУРА

4. **Адонин А. С., Аврасин Э. Т., Евграфов А. Ю., Миннебаев В. М. и др.** Исследование влияния дозы гамма-излучения на параметры СВЧ МИС переключателя на AlGaIn/GaN гетероструктурах и контактами с емкостной связью // Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». г. Москва. 7–9 октября 2015 г. С. 319–321.
5. **Иовдальский В. А., Ганюшкина Н. В., Марин В. П.** Новый принцип суммирования мощности ПТШ в усилителях СВЧ-диапазона // М.: КУРС, 2023. 144 с.
6. **Кищинский А. А., Ширяев Д. А., Кондратенко А. В. и др.** Универсальный приемопередающий канал X-диапазона на основе СВЧ МИС собственной разработки // Наноиндустрия, 2024. Т. 17 (128). № 10S. С. 339–345. DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.10s.339.345.
7. Веб-ресурс: <https://www.mwsystems.ru/goods/import-substitution.html>.
8. **Баринев Д. А.** Цифровые синтезаторы прямого синтеза с расширением диапазона перестройки выходной частоты // СВЧ Электроника, 2019. № 3. С. 60–64.



ТЕЛЕГРАМ-КАНАЛ НАУЧНОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»

- Онлайн репортажи с крупнейших выставок отрасли
- Анонсы мероприятий с участием технических экспертов
- Скидки на журналы издательства до 25%
- Конкурсы и розыгрыши от ведущих компаний
- Книжные новинки и презентации новых выпусков журнала

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ и оставайтесь в курсе событий





Акционерное общество

ИРКУТСКИЙ РЕЛЕЙНЫЙ ЗАВОД

разрабатываем и производим радиоэлектронные компоненты



Ориентируемся на клиентов

Учитываем требования клиентов и предоставляем своим заказчикам образцы изделий

100% гарантия качества

Строго следим за выпускаемой продукцией и проверяем ее на каждом этапе производства

Работаем над продукцией

Постоянно работаем над своей продукцией и улучшаем технические характеристики

СОЕДИНИТЕЛИ РАДИОЧАСТОТНЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ



Субминиатюрные и микроминиатюрные соединители радиочастотные коаксиальные тип IX вариант 1, тип SMA в соответствии с ГОСТ РВ 51914-2002 и SMP по стандарту MIL-STD-348B, Fig. 326 с рабочим диапазоном частот 18; 26,5 и 40 ГГц, а так же СВЧ и НЧ вводы. Предназначены для работы многофункциональных СВЧ-устройств и модулей.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ



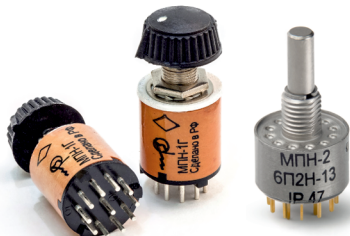
Реле слаботочные электромагнитные герметичные РЭС48 и РЭС83 с напряжением питания обмотки от 6 до 100В, и промежуточные РП-Ир2 и РЭС59 на 4 переключения и 1 замыкание с двойным разрывом цепи. Предназначены для коммутации электрических цепей постоянного и переменного тока радиоэлектронной аппаратуры.

СВЧ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ



Электромеханические коаксиальные переключатели ПСВЧ-2П2Н-N-1-28. Предназначены для замыкания, прерывания или изменения пути прохождения сигналов в диапазоне частот от 0,01 до 12,4 ГГц на два полюса два направления в коаксиальных трактах с волновым сопротивлением 50 Ом в режиме холодного переключения. Тип коаксиального соединителя - тип N, розетка, ГОСТ РВ 51914

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ ПОВОРОТНЫЕ



Переключатели поворотные низкочастотные малогабаритные одноплатные типа МПН-1, МПН-1М и МПН-2. Переключатели предназначены для ручной коммутации электрических цепей постоянного и переменного тока, с различными электрическими схемами коммутаций. Со степенями защиты IP40, IP47, IP48.

ФИЛЬТРЫ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ



Фильтры помехоподавляющие герметичные ФПГ-01 восьми типонаименований в зависимости от номинальных параметров. Фильтры предназначены для внутреннего монтажа и применения в герметизируемой аппаратуре. Изделия могут быть использованы в авиационной и наземной навигационной аппаратуре систем связи, управления объектами, сбора данных и т.п.

Россия, 664075,
г. Иркутск, ул. Байкальская, 239

(3952) 35-23-18

marketing@irzirk.ru



КАТАЛОГ ПРОДУКЦИИ:
www.irzirk.ru