УДК 621.382.2/.3

# Реализация радиотракта ППМ Ku-диапазона на основе комплекта многофункциональных МИС

**А.В. Бутерин[1], А.В. Иванов[1], А.С. Щербаков[1], А.В. Кондратенко[2], Д.А. Шишкин[2], П.С. Сорвачев[2]**

[1] Обособленное подразделение АО «Микроволновые системы» в г. Саратов
[2] Обособленное подразделение АО «Микроволновые системы» в г. Нижний Новгород

**Аннотация:** в докладе представлены результаты разработки комплекта монолитных интегральных схем: векторного модулятора (в иностранной терминологии – Core Chip), реализованного на основе технологического процесса 0,15 мкм GaAs pHEMT, и оконечного устройства (в иностранной терминологии – Front-End Module), реализованного на основе технологического процесса 0,25 мкм GaN HEMT, а также пример реализации на основе данных монолитных интегральных схем радиотракта многоканального приемо-передающего модуля Ku-диапазона частот.

**Ключевые слова:** многофункциональная монолитная интегральная схема диапазона СВЧ, приемо-передающий модуль, аттенюатор, фазовращатель, малошумящий усилитель, усилитель мощности, антенный коммутатор, драйвер управления, арсенид галлия, нитрид галлия.

## 1. Введение

Использование электронной компонентной базы высокой степени интеграции является трендом при построении приемо-передающих модулей (ППМ). Интеграция нескольких функциональных узлов на один кристалл позволяет уменьшить габаритные размеры и повысить технологичность сборки всего ППМ, что, в конечном счете, приводит к снижению себестоимости производства. Кроме того, исключение большого числа сварных межсоединений, имеющего место при реализации тракта СВЧ на основе однофункциональных монолитных интегральных схем (МИС), позволяет добиться качественного улучшения параметров ППМ и минимизировать их разброс от модуля к модулю.

В настоящее время можно выделить ряд архитектур построения радиотракта ППМ на основе многофункциональных МИС (см. рисунок 1):

- Классическое решение в виде трех микросхем (малошумящий усилитель, усилитель мощности и векторный модулятор), ориентированное не на целевой диапазон частот, а реализованное в сверхширокополосном исполнении;
- Решение в виде двух микросхем: векторного модулятора, реализуемого, как правило, на основе GaAs технологического процесса, и оконечного устройства, реализованного на основе GaN процесса и содержащего малошумящий усилитель в приемном канале, усилитель мощности в передающем канале, а также антенный коммутатор, заменяющий ферритовый прибор в составе ППМ и отвечающий за переключение режимов «Прием/Передача»;
- Микросхема на основе GaAs технологического процесса с повышенной степенью интеграции СВЧ узлов (содержащая более одного приемо-передающего канала), используемая совместно с интегральной схемой управления, реализованной на основе кремниевого технологического процесса;
- Многоканальная интегральная схема векторного модулятора (формирователя диаграммы направленности набора излучателей, в иностранной терминологии – Beamformer), реализованная в Si/SiGe базисе.

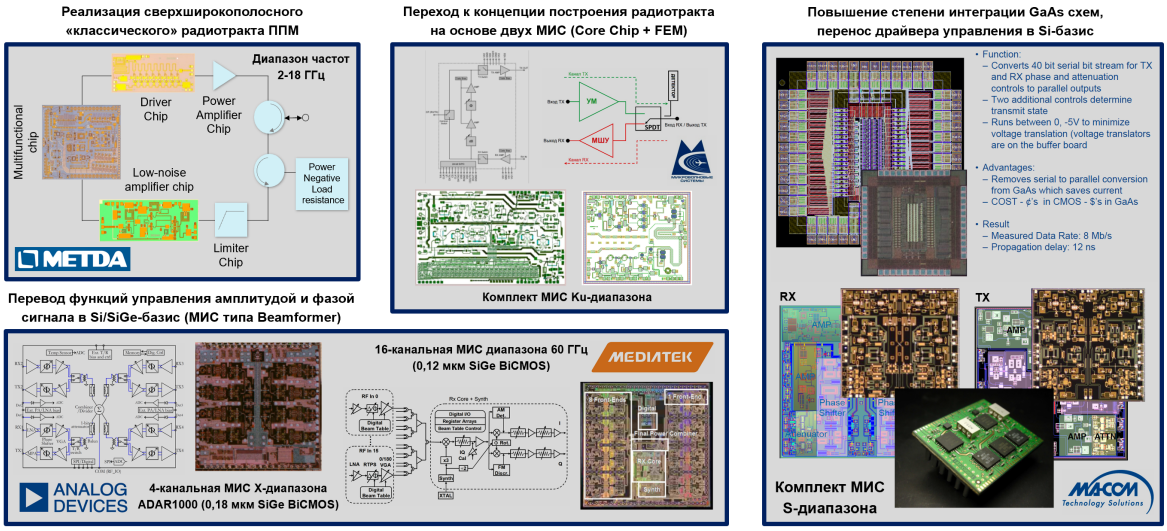


**Рисунок 1.** Современные тренды построения радиотракта ППМ в интегральном исполнении

Каждая из архитектур имеет свои достоинства и недостатки (технические, организационные, экономические, и т.д.), которые могут быть сформулированы, исходя из системных требований к конкретному комплексному проекту.

В работе, которой посвящен доклад, выбор был сделан в пользу реализации радиотракта на основе комплекта из двух МИС: GaAs векторного модулятора и GaN оконечного устройства. Основаниями для данного решения послужили: богатый опыт дизайн-центра АО «Микроволновые системы» в реализации однофункциональных и многофункциональных МИС на основе GaAs и GaN полупроводниковых процессов; доступность вышеобозначенных процессов и экономическая целесообразность их использования; а также соответствие с точки зрения ожидаемых от ППМ технических параметров и графиков разработки и производства.

## 2. Краткое описание разработанных МИС Ku-диапазона

МИС оконечного устройства (в иностранной терминологии – Front-End Module) MSN011V реализована на основе технологического процесса 0,25 мкм GaN HEMT и содержит в своем составе: малошумящий усилитель (МШУ) в приемном канале; усилитель мощности (УМ) с функцией контроля уровня выходного сигнала в передающем канале; а также антенный коммутатор, обеспечивающий переключение режимов «Прием/Передача». Функциональная схема и топология кристалла приведены на рисунке 2. Габаритные размеры составляют 3,5×3,0×0,1 мм.

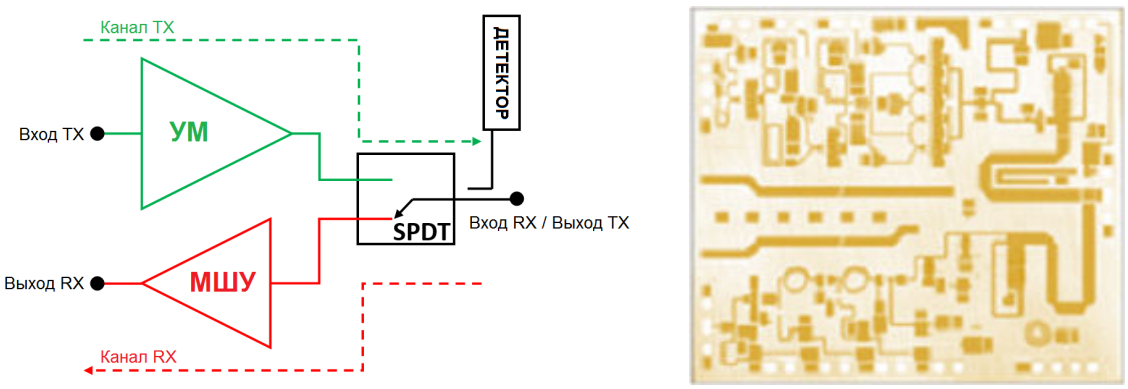


**Рисунок 2.** Функциональная схема и топология МИС MSN011V

МИС векторного модулятора (в иностранной терминологии – Core Chip) MSP010D реализована на основе технологического процесса 0,15 мкм GaAs pHEMT и содержит в своем составе: систему коммутаторов, обеспечивающих переключение режимов «Прием/Передача»; МШУ на входе приемного канала; 6-разрядный аттенюатор, 6-разрядный фазовращатель и два буферных усилителя в общем плече; предварительный УМ на выходе передающего канала; цепи стабилизации затворного смещения всех усилителей; а также 24-разрядный драйвер последовательно-параллельного типа, обеспечивающий загрузку данных по амплитудным и фазовым состояниям для режимов «Прием/Передача» за один цикл. Функциональная схема и топология кристалла приведены на рисунке 3. Габаритные размеры составляют 6,0×3,8×0,1 мм.

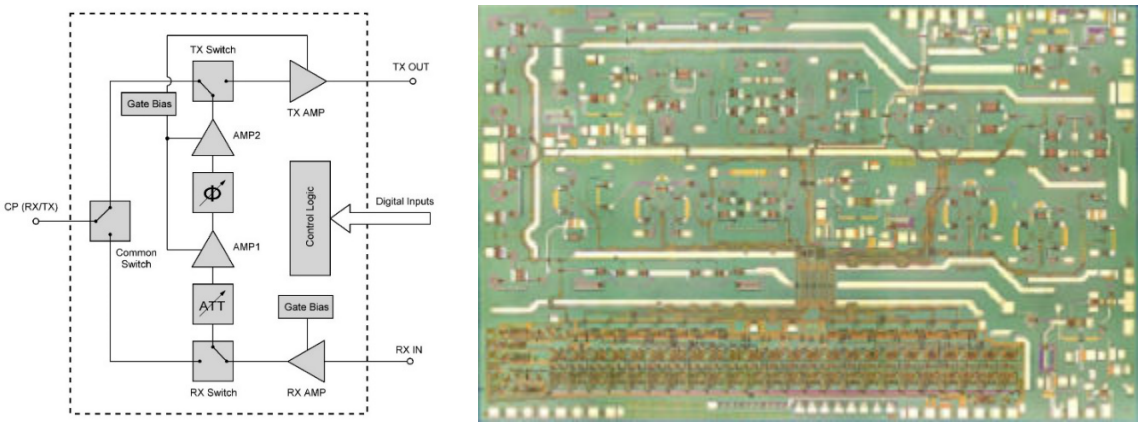


**Рисунок 3.** Функциональная схема и топология МИС MSP010D

Поскольку комплект в составе MSP010D и MSN011V был разработан в первую очередь для реализации собственного комплексного проекта АО «Микроволновые системы», параллельно с характеризацией экспериментальных образцов микросхем каждого типа в отдельности была инициирована проверка их работоспособности в составе 8-канального ППМ, промежуточные результаты которой приведены ниже.

## 3. Результаты макетирования радиотракта на основе разработанных МИС

Для проверки схемотехнических, топологических и конструктивных решений, заложенных в групповой 8-канальный ППМ (см. рисунок 4), был разработан макет приемо-передающего канала (ППК), фотографии которого приведены на рисунке 5.

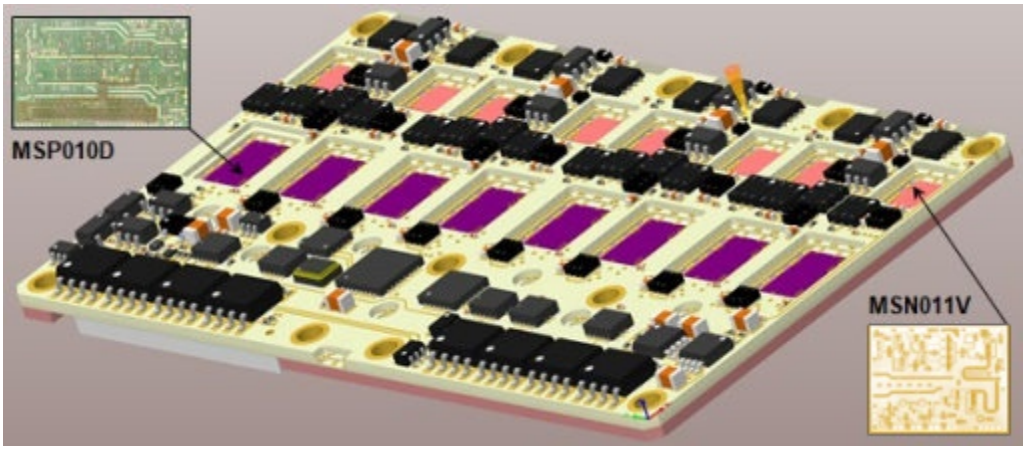


**Рисунок 4.** 3D-модель узла 8-канального ППМ, в который устанавливаются MSP010D и MSN011V

В состав макета ППК входят: МИС векторного модулятора MSP010D, МИС оконечного устройства MSN011V, элементы внешней обвязки детектора мощности в составе MSN011V, обеспечивающие требуемый уровень выходного напряжения, а также модуляторы питания по цепям «20 В», «11 В» и «8 В». Для возможности управления режимами «Прием/Передача» в обеих микросхемах, а также состояниями функциональных узлов аттенюатора и фазовращателя в составе MSP010D посредством персонального компьютера было разработано устройство сопряжения, устанавливаемое непосредственно на измерительную оснастку.

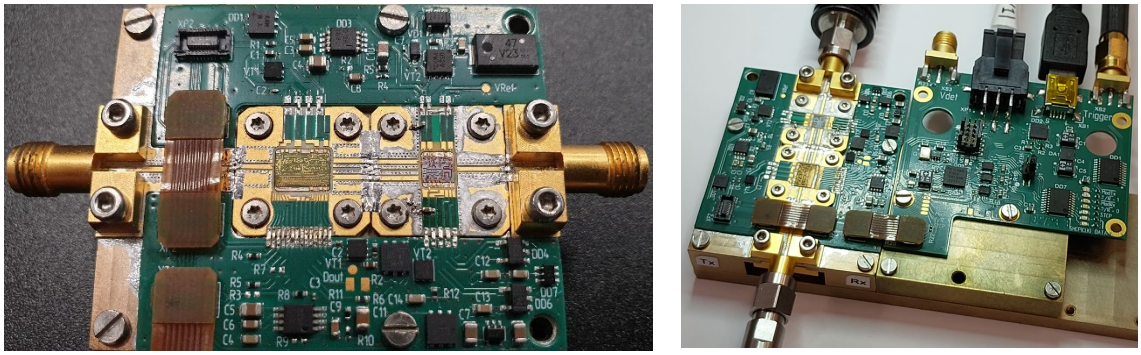

**Рисунок 5.** Оснастка для проверки параметров макета ППК (слева) и устройство сопряжения измерительной оснастки с персональным компьютером (справа)

На рисунке 6 приведены амплитудные характеристики макета ППК на частоте 16 ГГц, а также частотные зависимости вносимого фазового сдвига для 64 возможных состояний фазовращателя и вносимого ослабления для 64 возможных состояний аттенюатора при работе канала в режиме приема.

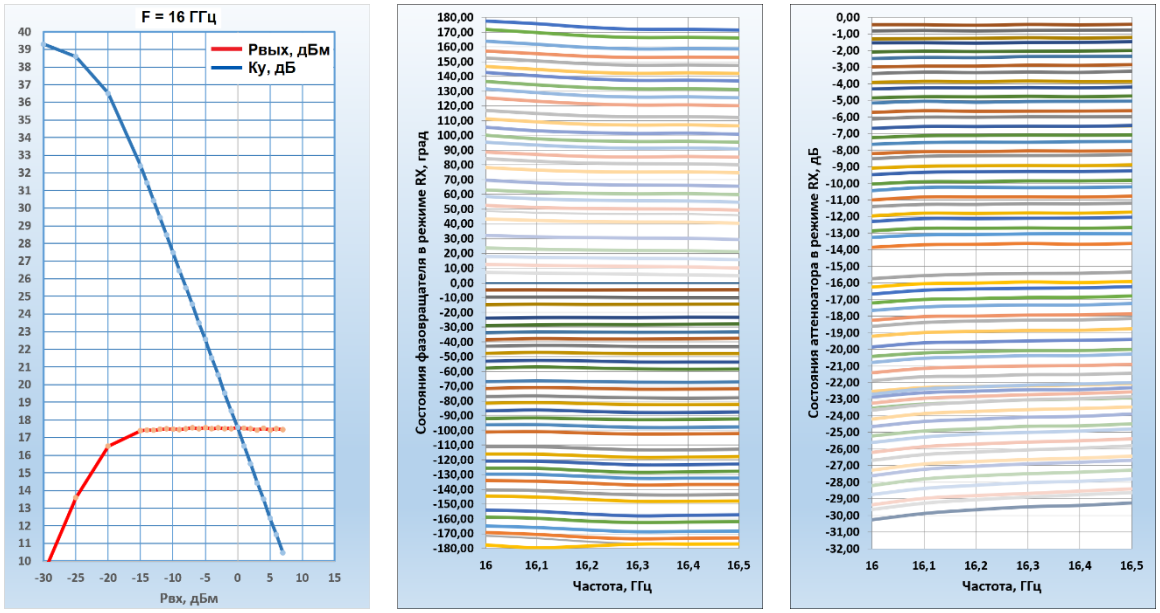


**Рисунок 6.** Экспериментальные характеристики при работе макета канала в режиме приема

На рисунке 7 приведены амплитудные характеристики макета ППК на частоте 16 ГГц, а также частотные зависимости вносимого фазового сдвига для 64 возможных состояний фазовращателя при работе канала в режиме передачи. Измерение частотных зависимостей вносимого ослабления не проводилось в виду отсутствия требований к использованию аттенюатора в режиме передачи. Однако архитектура МИС MSP010D позволяет полноценно использовать функцию ослабления в обоих режимах.

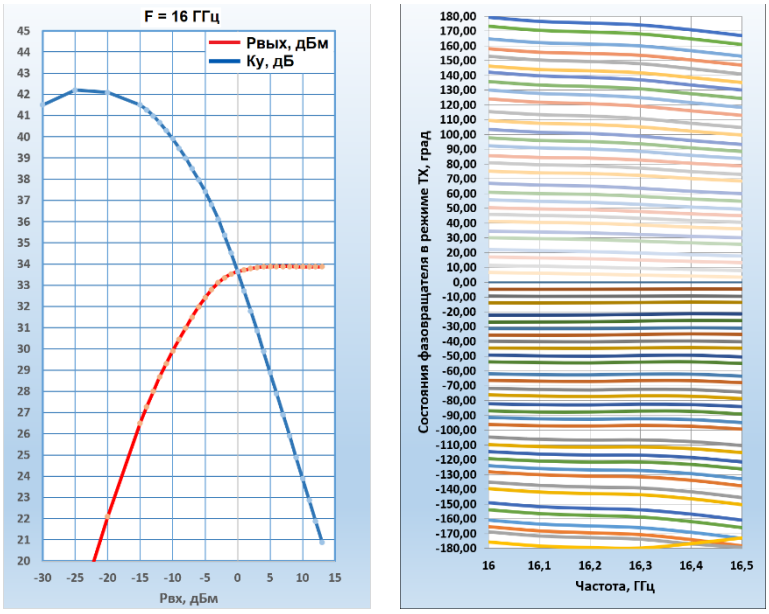


**Рисунок 7.** Экспериментальные характеристики при работе макета канала в режиме передачи

Основные параметры макета ППК приведены в таблице 1.

**Таблица 1**. Измеренные электрические параметры разработанной МИС

| **Наименование параметра, единица измерения** | **Значение** |
|---|---|
| Диапазон рабочих частот, ГГц | 16…16,5 |
| Линейный коэффициент усиления в режиме приема, дБ, тип. знач. | 39 |
| Линейный коэффициент усиления в режиме передачи, дБ, тип. знач. | 42 |
| Выходная мощность при 1дБ компрессии в режиме приема, дБм, тип. знач. | 15 |
| Выходная мощность при 5дБ компрессии в режиме передачи, дБм, тип. знач. | 33 |
| Диапазон вносимого фазового сдвига (6 бит, шаг 5,625º), град. | 354 |
| Диапазон вносимого ослабления (6 бит, шаг 0,5 дБ), дБ | 31,5 |
| Ток потребления по цепи питания «8 В», мА | 165 |
| Ток потребления по цепи питания «11 В», мА | 80 |
| Ток потребления по цепи питания «20 В», мА | 700 |
| Ток потребления по цепи питания/смещения «-3,3 В», мА | 45 |
| Стандарт сигналов управления | ТТЛ |
| Время переключения амплитудных и фазовых состояний, нс, не более | 35 |

## 4. Заключение

Полученные экспериментальные характеристики для макета ППК подтверждают работоспособность каждой из разработанных многофункциональных МИС, возможность их совместного использования для реализации выбранной архитектуры радиотракта, а также позволяют прогнозировать удовлетворительные результаты после изготовления и испытания группового 8-канального ППМ.