

# БОРТОВОЕ РАДИОПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО С ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

Рассмотрена возможность создания бортового радиопередающего устройства дециметрового диапазона с фазовой манипуляцией для радиотелеметрической системы нового поколения на отечественных электронных компонентах.

Существующая радиотелеметрическая система канала связи (КС), используемая в госкорпорации «Росатом», была разработана в 70–90 годах прошлого века.

Для передачи контролируемой информации КС работает с использованием в приемопередающей аппаратуре сигналов с кодовой время-импульсной модуляцией (КВИМ).

На тот период развития техники выбор КВИМ был обусловлен помехозащищенностью канала связи и наиболее простой технической возможностью передавать информацию о работоспособности контролируемого бортового оборудования в нужном объеме.

В соответствии с требованием обеспечения заданного потенциала радиолинии, при приемлемых массогабаритных характеристиках передающей аппаратуры (РПДУ) и энергетических возможностях первичных источников питания, для надежной передачи необходимой информации РПДУ должно было обладать мощностью в сотни ватт.

Кроме того, отсутствие на момент разработки быстродействующих регистрирующих устройств, позволяющих фиксировать и записывать информацию о быстро протекающих процессах, требовалось передавать данные в реальном масштабе времени с КВИМ без дополнительного кодирования.

Поэтому из-за отсутствия мощных СВЧ-транзисторов первые РПДУ для КС предыдущего поколения были полностью реализованы на отечественной элементной базе.

Мощный однокаскадный СВЧ-генератор РПДУ был выполнен на металлокерамической радиолампе ГИ-48 с параметрической стабилизацией частоты непосредственно на рабочих частотах на основе колебательной системы из термостабильных сплавов.



▲ Рис. 1. Радиопередающее устройство на импортных электронных компонентах

В формирователе модулирующих импульсов использовались первые отечественные интегральные микросхемы.

В выходных каскадах модулятора и в блоке питания применялись мощные низкочастотные транзисторы в ключевом режиме.

С появлением высокочастотных отечественных биполярных СВЧ-транзисторов, разработанных НИИ «Пульсар» в Москве, в 1980-е годы в НИИИС были начаты работы и успешно созданы РПДУ с КВИМ полностью на отечественных электронных компонентах (ЭК). В блоке формирования сигнала использовалась кварцевая стабилизация частоты и цепочка транзисторных умножителей частоты.

РПДУ с КВИМ до сих пор успешно эксплуатируются при различных испытаниях в госкорпорации «Росатом».

В настоящее время применение в новых перспективных разработках КС с КВИМ уже не может обеспечить требуемую пропускную способность канала связи, что и потребовало переход на сигналы с фазовой манипуляцией (ФМ), так как появилась необходимость получения все больших объемов телеметрической информации.

При создании КС нового поколения с повышенной пропускной способностью в НИИИСе была проведена разработка РПДУ с ФМ в основном на импортных ЭК.

В связи с известными событиями последнего времени и директивным ука-

занием о переходе на отечественные ЭК в настоящее время в НИИИСе ведется разработка РПДУ с использованием полностью отечественных ЭК, как серийно выпускаемых, так и находящихся на стадии проектирования.

Разработанное РПДУ с фазовой манипуляцией на импортных ЭК состоит из следующих основных функциональных узлов:

- формирователь логической структуры информативного кадра и модулирующего сигнала;
- модуль интерфейсов;
- квадратурный модулятор и синтезатор;
- трехкаскадный СВЧ-усилитель мощности;
- блок питания.

Внешний вид РПДУ приведен на рис. 1.

РПДУ с фазовой манипуляцией обладает следующими основными характеристиками:

- передача телеметрической информации со скоростью 0,5–1 Мбит/с при двухпозиционной и до 2 Мбит/с при четырехпозиционной фазовой манипуляции;
- выходная мощность не менее 10 Вт при работе на фиксированных рабочих частотах в С-диапазоне;
- потребляемая мощность от первичного источника питания напряжением 20–33 В: не более 55 Вт;
- объем: не более 1 дм<sup>3</sup>;
- масса: не более 1,2 кг.

Функциональная схема РПДУ представлена на рис. 2.

В качестве основных ключевых импортных ЭК была использована и применяется сегодня при производстве РПДУ следующая элементная база:

- в формирователе логической структуры кадра и модулирующего сигнала программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) фирмы Xilinx, флэш-память объемом 4 Мбит фирмы Numonux, полностью совместимая с ПЛИС, и двухканальный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) фирмы Analog Device с разрядностью 12 бит для формирования аналогового модулирующего сигнала;
- формирования цифровых отсчетов сигнала с ПЛИС на ЦАП малым джиттером и стабильным фронтом осуществляется микросхемой умножителя частоты фирмы ON Semiconductor;
- в синтезаторе частот применены микросхемы PLL синтезаторов со встроенным генератором фирмы Analog Device;
- в квадратурном модуляторе для формирования СВЧ фазоманипулированного сигнала применена микросхема квадратурного модулятора фирмы Analog Device;
- для обеспечения подстройки частоты опорного генератора применена микросхема цифрового потенциометра фирмы Analog Device;
- в усилителе мощности УМ, состоящем из трех усилительных каскадов, использованы транзисторы SBA-5089Z фирмы Stanford

Microdevices, МААМ-009286 фирмы M/A-COM и GaN транзистор NPTB00025 фирмы Nitronex Corporation.

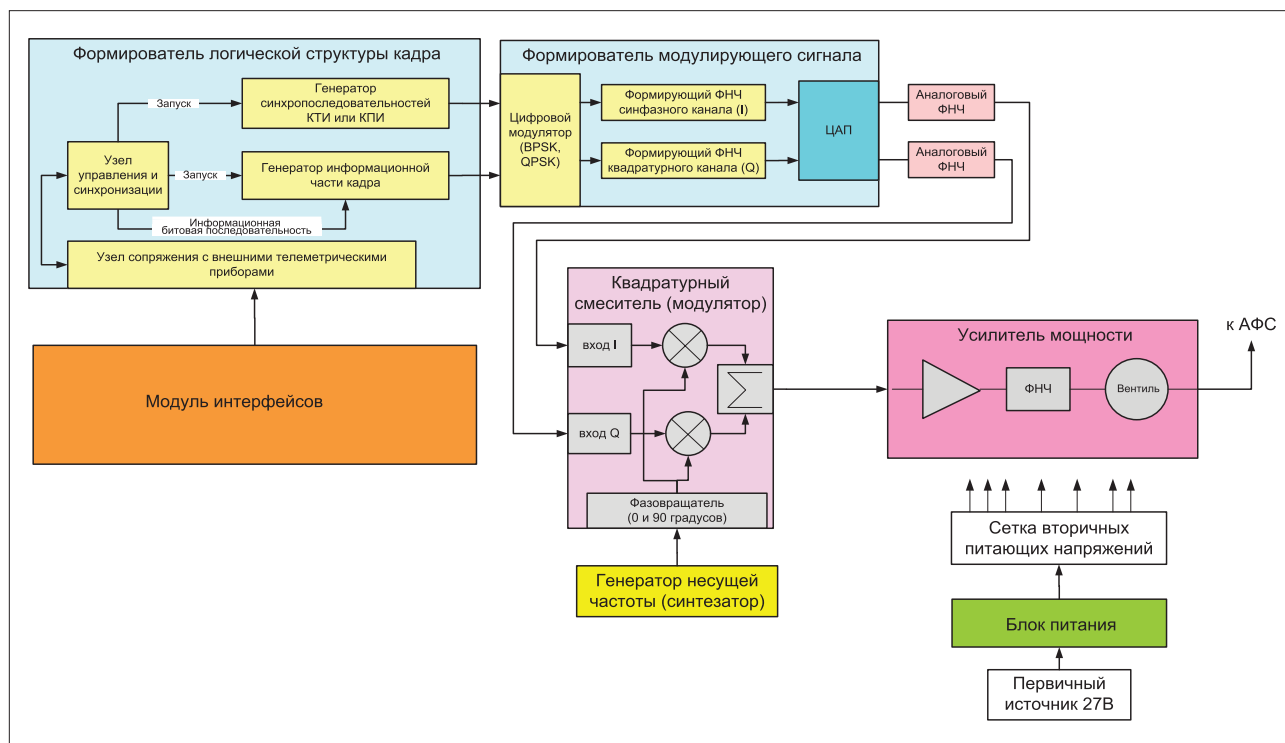
Следует отметить, что единственным и важным отечественным узлом, определяющим стабильность колебаний несущих частот РПДУ, является термокомпенсированный генератор ГК143-ТС [1] производства ОАО «Морион» (Санкт-Петербург).

Благодаря высококвалифицированному персоналу, современному оборудованию, сертифицированной системе качества и технологическому совершенству ОАО «Морион» является крупным поставщиком кварцевых генераторов во многие известные компании мира, в том числе США, Канады, Франции, Германии и других стран [2].

Замена ЭК в блоке формирователя логической структуры кадра и модулирующего сигнала, в модуле интерфейсов на отечественные, разработки АО «НИИЭТ» (Воронеж) и ЗАО «ПКК Миландр» в настоящее время не вызывает особых трудностей в оптимальном выборе и может привести лишь к незначительному увеличению объема.

Блок питания может быть также реализован на отечественных ЭК и с использованием микросхем разработки НИИИСа.

Реализация СВЧ-блоков, формирующих рабочие сигналы с нужными параметрами — синтезатора частоты с фазовой автоматической подстройкой частоты и квадратурного модулятора, — полностью возможна на отечественных микросхемах.



▲ Рис. 2. Функциональная схема РПДУ с ФМ

Таблица 1. Основные классификационные характеристики GaN-транзисторов

Тип транзистора	ПП9136А	ПП9137А	ПП9138А	ПП9138Б	ПП9139А1	ПП9139Б1
Выходная мощность, Вт	5	10	15	25	50	100
Коэффициент усиления	16	12	11	9	13	9
Частота, ГГц	до 4	до 4	до 4	до 4	до 2,9	до 2,9

Таблица 2. Импортные и отечественные импортозамещающие электронные компоненты СВЧ-блоков

Состав РПДУ	Ключевые импортные электронные компоненты	Импортозамещающие отечественные аналоги
Синтезатор частоты	PLL-синтезаторы с встроенным генератором фирмы Analog Device	<b>1508ПЛ10БТ</b> АЕЯР.431320.624ТУ; <b>1508МТ015</b> АЕНВ.431239.245ТУ (ОКР 03.2019 г.), ЗАО «ПКК Миландр» <b>1288ПЛ1У АЕНВ.431230.245 ТУ;</b> АО НПЦ «Элвис» (Зеленоград) <b>К1367ПЛЗУ</b> АДКБ.431332.222ТУ; (Категория качества — ОТК); АО «НИИМА «Прогресс»
Квадратурный модулятор	Квадратурный модулятор фирмы Analog Device	<b>1327МА015</b> АЕНВ.431.300.010ТУ; АО «НИИМА «Прогресс»
Усилитель мощности	SBA-5089Z фирмы Stanford Microdevices; МААМ-009286 фирмы M/A-COM; NPTB00025 фирмы Nitronex Corporation	<b>1324УВ9У</b> АЕЯР.431000.760-16ТУ; ОАО «НПП «Пульсар» <b>ПП9136А, ПП9137А, ПП9138Б</b> АДКБ.432140.540ТУ; АО «НИИЭТ» (Воронеж)

При разработке синтезатора частоты на фиксированные частоты С-диапазона возможны различные варианты построения с использованием микросхем ЗАО «ПКК Миландр» и АО НПЦ «Элвис» (Зеленоград), ОАО «НПП «Пульсар» (Москва).

Квадратурный модулятор 1327 МА015 — это функциональный аналог ADL5375 (Analog Devices Inc), разработанный

АО «НИИМА «Прогресс», замещает используемую микросхему квадратурного модулятора фирмы Analog Device.

До недавнего времени разработка СВЧ-усилителя мощности с высоким КПД для бортового РПДУ сдерживалась отсутствием отечественных мощных СВЧ GaN-транзисторов.

Эти транзисторы, применяемые в выходном каскаде усилителя, совместно

с блоком питания определяют в основном потребляемую мощность РПДУ.

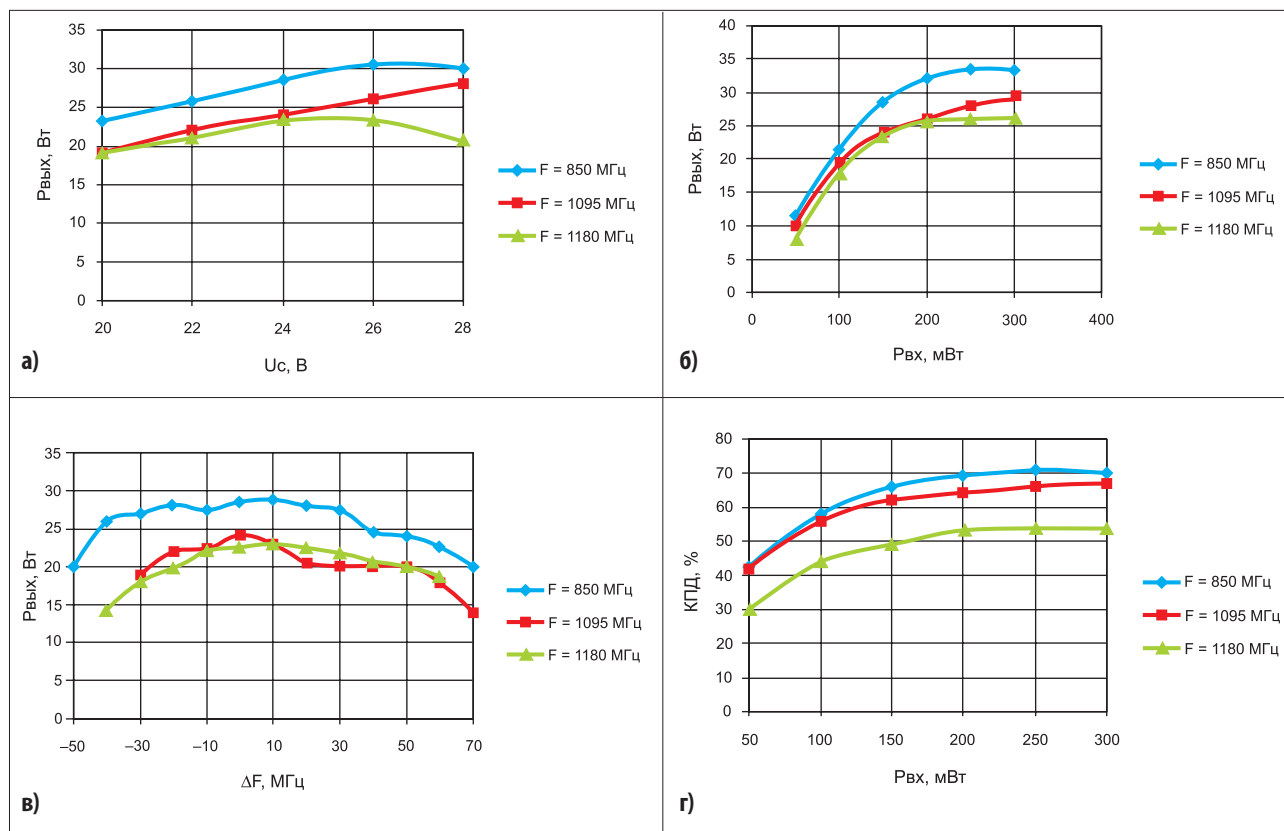
Разработку GaN-транзисторов осуществляет ряд отечественных производителей. Наибольших успехов в этом направлении добилось АО «НИИЭТ» (Воронеж).

Предприятие по техническим условиям АДКБ.432140.540 выпускает нитрид-галлиевые эпитаксиально-планарные полевые *n*-канальные мощные транзисторы с затвором Шоттки в металлокерамических корпусах, предназначенные для работы в усилителях мощности в диапазоне частот до 6000 МГц.

Основные и некоторые классификационные характеристики GaN-транзисторов приведены в таблице 1.

В настоящее время АО «НИИЭТ» заканчивает разработку GaN-транзисторов с категорией качества ВП, которые выполнены по современной технологии и заменяют импортные комплектующие. Высокая выходная мощность, стойкость аппаратуры к космической радиации, стабильная работа при температурах  $-60 \dots +125$  °С позволит широко внедрять эти транзисторы в авиационное, космическое и военное оборудование.

Разработчики прогнозируют, что потребность в мощных СВЧ GaN-транзисторах только на отечественном рынке составляет более 100 тыс. штук в год [3].



▲ Рис. 3. Основные результаты проведенных исследований с 25-Вт транзистором — зависимости: а) выходной мощности макета усилителя от напряжения стока; б) выходной мощности макета усилителя от мощности на входе; в)  $P_{\text{вых}}$  макета усилителя от частоты; г) КПД макета усилителя от входной мощности

После получения опытных образцов мощных GaN-транзисторов ПП9136 А, ПП9138 Б и ПП9139 А в НИИИСе были проведены предварительные исследования макетов усилителей.

Результаты исследования работы GaN-транзисторов в макете усилителя показали полное соответствие заявленных параметров по основным параметрам на частотах в С-диапазоне.

Наибольший интерес представляют результаты предварительных испытаний работы 25-Вт транзистора ПП9138 Б в выходном каскаде усилителя, определяющем основное потребление от бортового источника питания.

Основные результаты проведенных исследований с 25-Вт транзистором представлены в рис. 3.

В таблице 2 указаны основные ключевые импортные ЭК, используемые в вы-

пускаемом РПДУ, и отечественные ЭК, запланированные к эксплуатации в разрабатываемом корпорацией «Росатом» в НИИИСе РПДУ с фазовой манипуляцией.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие основные положения и результаты:

- проведен анализ и показана возможность замены импортных комплектующих в РТС бортовых РПДУ на отечественные ЭК, разработанные и выпускаемые в России ЗАО «ПКК Миландр», АО НПЦ «Элвис», АО «НИИМА «Прогресс» и ОАО «НПП «Пульсар»;
- выполнено предварительное исследование и показана возможность разработки СВЧ-усилителя с высоким коэффициентом полезного действия на GaN-транзисторах,

созданных и выпускаемых АО «НИИИТ»;

- полученные результаты дают возможность после проведения полного цикла разработки и всех необходимых испытаний приступить к серийному производству РПДУ с заданными техническими требованиями полностью на отечественных ЭК. —

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вороховский Я., Ильичев В. *Высокостабильные малошумящие кварцевые генераторы российского производства// ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 1.*
2. *Инженеры российского экспорта//Эксперт. 2016. № 11.*
2. *Время электроники. 15.11.2016. www.russianelectronics.ru/leader*