

УДК 29.35.47

Бортовые твердотельные СВЧ-усилители мощности будущего для командно-измерительных систем

В. Г. Алыбин¹, А. С. Семочкин

¹д. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: otd1741@rniikp.ru

Аннотация. В докладе рассмотрены особенности построения и параметров твердотельных СВЧ-усилителей мощности (УМ) для бортовой аппаратуры командно-измерительных систем (БА КИС). Показаны пути решения общих для космических аппаратов проблем — обеспечения надежности, повышения уровня выходной мощности, КПД, уменьшения массы и габаритов, повышения радиационной стойкости др. Обсуждаются вопросы резервирования и возможности переключения выходной мощности без потери КПД, показаны тенденции развития УМ и облик УМ будущего.

Ключевые слова: усилитель мощности, КПД, масса, командно-измерительная система, монолитная интегральная схема, бортовая аппаратура, непрерывный режим работы

Onboard Microwave Solid-State Power Amplifiers for Future Command and Measurement Systems

V. G. Alybin¹, A. S. Semochkin

¹doctor of engineering science

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: otd1741@rniikp.ru

Abstract. This article deals with development considerations and parameters of solid-state power amplifiers (SSPA) for onboard command and measurement systems (OCMS). The paper suggests solutions of problems common for spacecraft: reliability control, input power increase, efficiency, reduction of weight dimension characteristics, improvement of radiation resistance, etc. Matters of redundancy and output power switching without efficiency loss are discussed; trends of SSPA development and the image of future SSPA are formulated.

Keywords: SSPA, efficiency, weight, command and measurement system, monolithic integrated circuit, onboard equipment, continuous operation

Введение

Твердотельные СВЧ-усилители мощности (УМ) являются одними из самых массовых классов электронных СВЧ-устройств, будучи основными узлами передатчиков на Земле, в авиации, в космосе. Они имеют неоспоримые преимущества по сравнению с ЛБВ по надежности на большом сроке активного существования (САС), стоимости, габаритам и массе. Достоинства УМ обеспечили им монополию в их использовании в АФАР для авиации, а в последнее время стали существенными и в космических применениях, в частности для бортовой аппаратуры командно-измерительной системы (БА КИС) КА. В настоящее время к УМ БА КИС предъявляются новые требования, что побуждает разработчиков УМ к поиску новых технических решений. Рассмотрению перспектив развития УМ для БА КИС посвящена данная работа.

Требования к усилителям мощности БА КИС

К УМ для БА КИС предъявляются требования, перечисленные в табл. 1. В отличие от наших широкого применения в наземных связных, авиационных и специальных передатчиках, к бортовым УМ для КА не предъявляется требований ширины полосы рабочих частот более 3 % от средней частоты рабочего диапазона. Средние частоты для различных применений УМ для БА КИС находятся в одном из S-, C-, X-, Ku-, а в перспективе и Ka-диапазонов частот.

Выходные мощности УМ БА КИС — не менее заданной из ряда 2–40 Вт в непрерывном режиме в течение сеансов связи, хотя в будущем может появиться требование увеличения выходной мощности в 2 раза, связанное с необходимостью увеличения скорости передачи информации.

Переключение $P_{\text{вых}}$ УМ для БА КИС с номинального уровня на меньший (без существенной потери КПД) целесообразно для сокращения энергопотребления и увеличения надежности УМ в ориентированном режиме полета КА, который имеет место практически на всем САС. Выходной мощности при этом требуется примерно в 5–7 раз меньше.

Необходимо обеспечить сохранение работоспособности после обрыва или короткого замыкания выходной СВЧ-цепи или появления в ней реактивности произвольного знака или величины. При этом отпадает необходимость отключения УМ перед переключениями антенных переключателей АФУ и гарантируется сохранение работоспособности УМ при наземных испытаниях.

Требование высокой надежности УМ для БА КИС является одним из важнейших, т.к. от этого зависит нахождение КА на заданной орбите. Максимальный САС современных КА превышает 15 лет и требуемая вероятность безотказной работы (ВБР) УМ должна быть не менее 0,999. При этом общий срок службы УМ должен быть не менее 19 лет.

Для УМ, расположенных на КА, необходимо обеспечение в течение САС определенного теплового режима при их расположении на термостатированной плите. Средняя плотность теплового потока от основания УМ в настоящее время не превышает значения 0,2 Вт/см².

Специфическим является рекомендация обеспечения площади основания УМ, не превышающей необходимую для обеспечения его теплового режима. Уменьшение площади основания необходимо для сокращения площади термостатированной плиты космической платформы, следовательно, габаритов и массы КА. Например, для УМ с выходной мощностью 10 Вт и КПД 40 % площадь основания необходимо иметь не менее и желательно не более 125 см².

Требование радиационной стойкости на САС особенно важно для УМ, устанавливаемых на КА для работы на низких и высокоэллиптических орбитах, когда им и, следовательно, УМ приходится либо постоянно находиться в зоне радиационных поясов Земли, либо пересекать их несколько раз в сутки. Приемлемой величиной стойкости к дозовым эффектам является способность сохранять работоспособность УМ при величине дозового облучения за САС порядка 100 крад.

Требования к механической прочности важны при запуске КА, а требования к климатическим воздействиям — в течение САС.

Значимым требованием является необходимость на САС иметь данные об их работоспособ-

Таблица 1. Требования к твердотельному усилителю мощности для БА КИС КА

Параметр	Значение параметра
Диапазон рабочих частот	Один из L-, S-, C-, X-, Ku-, Ka- с шириной рабочей полосы частот 1–3 %
Выходная мощность	Не менее заданной из ряда 5–40 Вт
Входная мощность	2–30 мВт
Возможность переключения выходной мощности	На один из 2 уровней
САС	Не менее 15 лет при ВБР не менее 0,999 и общем сроке службы не менее 19 лет
Средний тепловой поток через поверхность основания	Не более 0,2 Вт/мм ²
Площадь основания	Не больше требуемой по условиям среднего теплового потока через основание
Диапазон температур термостабилизированной плиты	–20–50 °С
Радиационная стойкость по дозовым воздействиям за САС	Не менее 100 крад
Стойкость к механическим воздействиям	Широкополосная вибрация — 20 g; удары — 150 g; акустические воздействия — 130 g
Напряжение питания	27 ± 3 В, 100 В
Группа исполнения	Открытый космос
Нагрузка на выходе	Любая (КЗ, ХХ)
КПД	Максимальный
Габариты, масса	Минимальные
Датчики	$P_{вх}$, $P_{вых}$, ток, напряжения, температура

ности для того, чтобы в случае нештатной ситуации перейти на работу резервного комплекта. С этой целью на УМ БА КИС должны быть предусмотрены датчики. Необходимы температурный датчик, а также датчики входной и выходной мощности, тока и напряжения.

Наличие унифицированных УМ с минимальным количеством приборов в унифицированном ряду при условии удовлетворения требованиям для всех возможных применений важно для уменьшения стоимости БА КИС и сроков их поставки.

Кроме требований, являющихся специфическими для изделий космического применения и УМ для БА КИС, существует хорошо известный комплекс требований для УМ, независимо от его назначения:

- КСВ входа и выхода менее 1,5;
- отсутствие самовозбуждения;

– воспроизводимость характеристик от комплекта к комплекту УМ;

– общим требованием к УМ БА КИС является выполнение УМ на ЭКБ ОП.

Устройство современных твердотельных усилителей мощности для КА

На рис. 1 представлена типичная структурная схема нерезервированного УМ. Для выполнения требований назначения, приведенных выше, она содержит: усилительные каскады, заграждающий фильтр гармоник (Ф), автоматическую регулировку мощности (АРМ), включающую направленный ответвитель (Н.О.), детектор (ДЕТ), операционный усилитель (О.У.) и управляемый аттенуатор (АТТ).

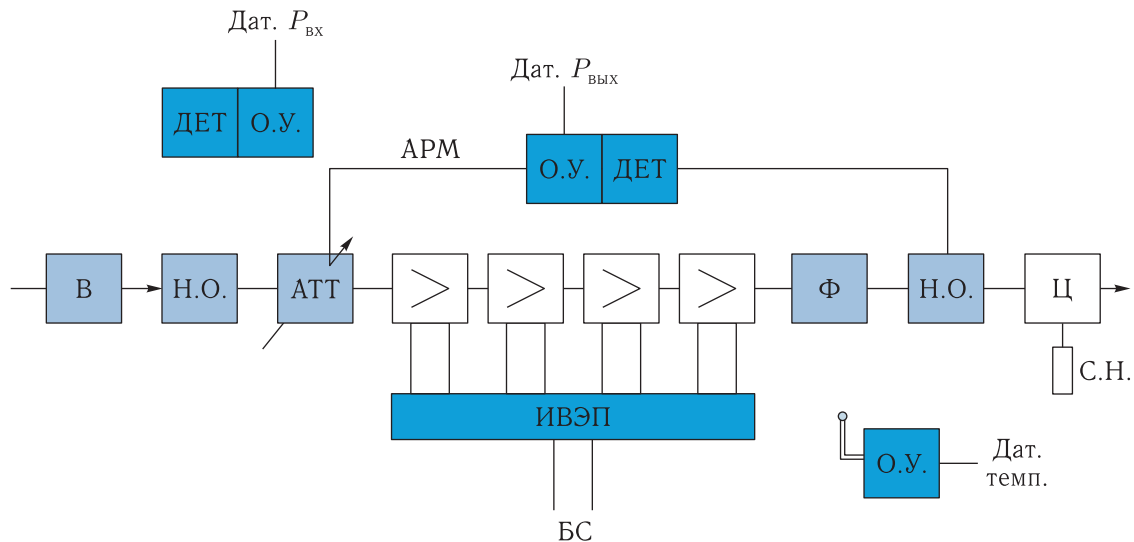


Рис. 1. Структурная схема одиночного твердотельного СВЧ-усилителя мощности

Гарантируемое согласование по входу обеспечивается вентилем (В), а хороший КСВ выхода и защита выходной цепи — циркулятором (Ц) на выходе УМ с подключенной к одному из его плеч относительно мощной согласованной нагрузкой (С.Н.).

Имеются температурный датчик (Дат. темп.) и датчики входной и выходной (Дат. $P_{\text{вх}}$ и Дат. $P_{\text{вых}}$) мощностей на ДЕТ и О.У. Датчики тока и напряжения предусмотрены в источниках вторичного электропитания (ИВЭП), через которые напряжение от бортсети (БС) подается на транзисторные каскады.

Существующие УМ выполняются либо в виде нерезервированного прибора, и тогда резервирование осуществляется с помощью внешнего устройства перекрестного резервирования — распределителя мощности, либо в виде резервированного (дублированного или троированного) УМ (РУМ), размещенного в одном корпусе в виде ансамбля из 2 или 3 УМ и распределителя мощности, что позволяет минимизировать площадь основания УМ и его массу [1].

Проблемные вопросы совершенствования УМ и пути их решения

Современные УМ для КА удовлетворяют большей части предъявляемых к ним требований и обеспечивают функционирование большинства

БА КИС КА, тем не менее остается немало возможностей для улучшения параметров УМ. Ключевые ЭРИ, необходимые для УМ, — ЭРИ промежуточных и выходных каскадов усиления. Вместо применявшихся ранее транзисторных усилителей на арсениде галлия (GaAs) целесообразно использовать транзисторные усилители на нитриде галлия (GaN), имеющие более высокий КПД.

ЭРИ отечественного производства (ЭРИ ОП) на GaN в настоящее время начинают использоваться в РФ. Ведущими по производству подложек для GaN-транзисторов являются: Институт полупроводниковой СВЧ-электроники РАН (г. Москва) [2], Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург) [3–5], ЗАО «Элма-Малахит» (г. Зеленоград, г. Москва) [6], а производителями ЭРИ ОП на GaN — НПО «Пульсар» (г. Москва) [7, 8], ООО «Октава» (г. Новосибирск) [5, 9].

Освоение более высоких диапазонов рабочих частот (Ку и Ка) успешно решается с использованием схем сложения мощностей одиночных транзисторов. На рис. 2, 3 показаны монолитные интегральные схемы (МИС) Ка-диапазона, разработанные в РФ [10] и за рубежом [11].

Резерв в улучшении параметров УМ заключается в отыскании путей повышения КПД, увеличения выходной мощности, снижения перегрева активного слоя транзисторных структур, увеличения САС и уменьшения габаритов и массы УМ для КА.

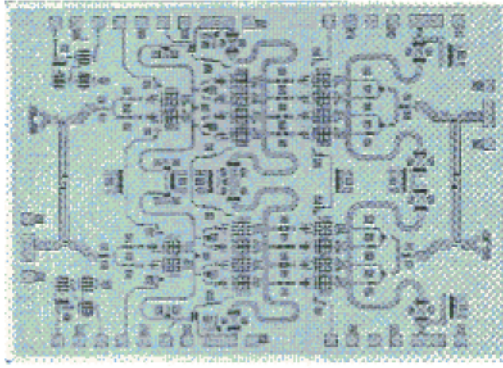


Рис. 2. МИС УМ Ка-диапазона, созданная в РФ [10] (длина затвора 0,25 мкм)

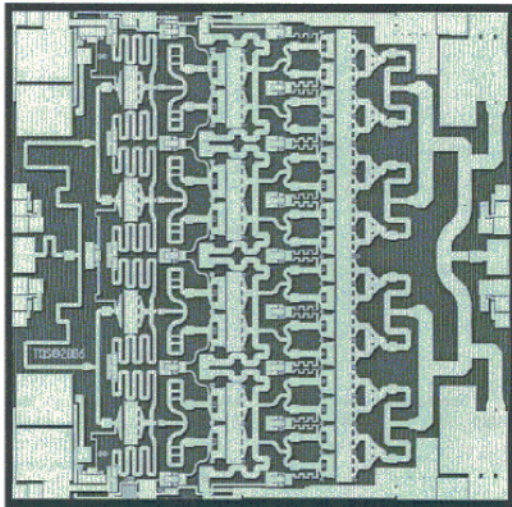


Рис. 3. МИС УМ Ка-диапазона, созданная за рубежом [11] (длина затвора 0,15 мкм, $P_{\text{вых}} = 4$ Вт)

Это — взаимосвязанная система параметров УМ, по существу определяющая облик УМ будущего для КА.

Большинство УМ работают в режиме АВ [11], при котором имеет место относительно слабая компрессия коэффициента усиления в рабочей точке вольтамперной характеристики транзистора. При этом теоретический предел значения КПД не превышает 50 %, а на практике КПД при номинальном уровне $P_{\text{вых}}$ достигает значений 40–42 %.

Для передачи информации с используемыми в радиолиниях «Борт–Земля» структурами сигнала, в которых отсутствует амплитудная модуляция, работа в режиме АВ не обязательна и, следовательно,

но, можно использовать более эффективные нелинейные режимы, получившие название Е и F, при этом теоретический предел КПД увеличивается до 100 % путем рационального использования энергии гармоник [11]. Несмотря на определенные трудности реализации таких режимов в УМ, уже в настоящее время имеются положительные результаты [12]. В режиме класса Е при моделировании УМ в L-диапазоне получены расчетные значения КПД 77,9 % при выходной мощности 7,46 Вт для УМ на GaN. В режиме класса F, соответственно, КПД в L-диапазоне 59 % при $P_{\text{вых}} = 6$ Вт.

Учитывая возрастающие трудности реализации работы УМ в режимах классов Е и F с ростом частоты, можно прогнозировать в будущем зависимость КПД от частоты, показанную на рис. 4.

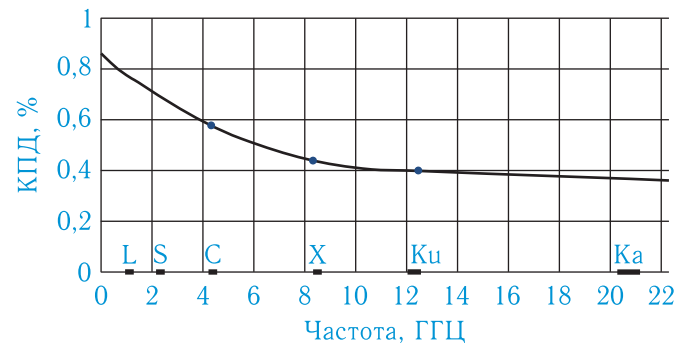


Рис. 4. Прогноз зависимости КПД УМ от частоты

Реализация требуемой выходной мощности при САС 15 лет решается рациональным сложением мощностей многих транзисторов, обеспечением хорошего теплоотвода от них и распределением транзисторов по площади основания УМ. При этом ограничение по мощности в непрерывном режиме наступает из-за возрастания плотности теплового потока с единицы площади кристалла МИС, что приводит к увеличенному перепаду температур между основанием УМ и активным слоем транзисторов.

На рис. 5 показана зависимость срока службы мощного усилительного каскада от температуры рабочего слоя транзистора на GaAs [11].

Из рис. 5 видно, что зависимость срока службы от температуры активного слоя транзистора очень сильная: ее повышение на 8 °С в 2 раза уменьшает срок службы, а на 30 °С — в 10 раз. Поэтому при проектировании УМ важно избегать

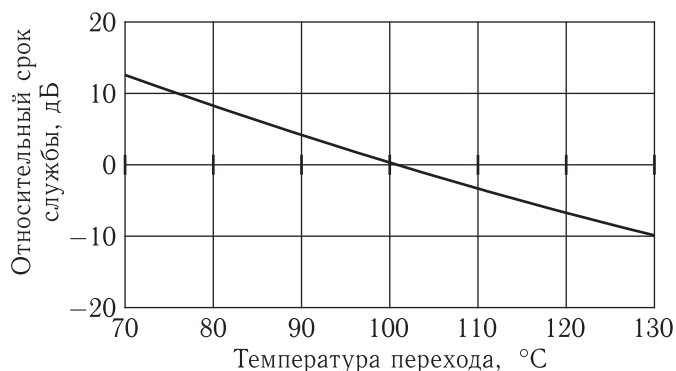


Рис. 5. Зависимость относительного срока службы от температуры активного слоя транзистора на GaAs

применения в МИС режимов, рассчитанных на сильное нагружение транзисторов (например, более 0,4), а необходимо $P_{\text{вых}}$ достигать путем сложения $P_{\text{вых}}$ МИС по гибридно-монокристаллической (ГМИС) или гибридной технологии, распределяя тепловые потоки от МИС по площади основания УМ. Таким образом, рациональным путем построения мощных УМ БА КИС является создание системы на нескольких кристаллах вместо «системы на кристалле».

Желательно также свести к минимуму ширину канала каскада большой мощности, чтобы иметь возможность весь УМ располагать в отрезке заперделного волновода, снижая вероятность его самовозбуждения. Перспективной представляется топология УМ на направленных ответвителях с разными переходными ослаблениями [13]. Такое построение позволяет располагать один за другим несколько транзисторов или МИС с одинаковым рассеянием тепла в узком канале и на любом желаемом расстоянии один от другого, обеспечивая при этом возможность введения между ними корректирующих фазовращателей.

В такой конструкции системы обеспечивает дополнительное преимущество, проявляющееся при объединении резервируемых УМ в одном корпусе, т. к. ансамбль из двух или трех УМ благодаря их малой ширине не потребует увеличения ширины и площади основания больше требуемой для одного УМ по условиям температурного режима.

На рис. 6 показан общий вид УМ [13]. При реализации ГМИС на многослойной керамике LTTC существенно сокращаются габариты УМ.

Если в УМ их ИВЭП располагать в одноэтажной конструкции, то требуется большая площадь основания, чем необходимо по условиям соблюдения температурного режима. При этом возрастает масса прибора и появляются проблемы в обеспечении малой неплоскостности основания (требуемое значение $\leq 0,1$ мм на длине 20 см). Для преодоления этого недостатка целесообразно делать как минимум двухэтажную конструкцию УМ, при этом на первом этаже-основании размещать мощные СВЧ-каскады УМ и выходные МОП-транзисторы ИВЭП с относительно большим тепловыделением, а все остальные узлы, в которых тепловыделение мало, — на втором этаже. Примеры реализации двухэтажных УМ для космических применений приведены на рис. 7.

В схеме, показанной на рис. 8, а [1], с помощью включения/отключения ИВЭП соответствующих цепей УМ в РУМ включается либо один из мощных УМ (УМ1 или УМ3), либо маломощный (УМ2). При этом маломощный УМ2 с большей ВБР на САС работает в течение практически всего САС. Два мощных УМ1 или УМ3 требуются для работы БА КИС в неориентированном режиме полета и в случае нештатных ситуаций, связанных с системой ориентации КА, а также при отказе УМ2.

Переключение выходной мощности УМ $P_{\text{вых}}$ можно достичь путем переключения, например, одного, мощного УМ, на другой, маломощный УМ.

Такой РУМ имеет самую высокую надежность, прост в реализации и управлении, его недостаток заключается в том, что при отказе маломощного УМ2 все остальное время на САС РУМ работает в режиме максимальной $P_{\text{вых1}}$ или $P_{\text{вых3}}$ и что комплект РУМ троированный, а не дублированный.

В схеме, показанной на рис. 8, б [14], благодаря введению маломощного переключателя (П 2×3) и разделению каждого из двух усилителей РУМ на мощный (УМ2) и маломощный (УМ1) каскады, можно осуществлять как переключение выходной мощности РУМ, так и переключение резервируемых каскадов РУМ в случае отказа одного из них. Преимуществом этого типа РУМ является возможность в ориентированном режиме всегда работать на малом уровне $P_{\text{вых2}}$ и при этом содержать не троированный, а дублированный РУМ.

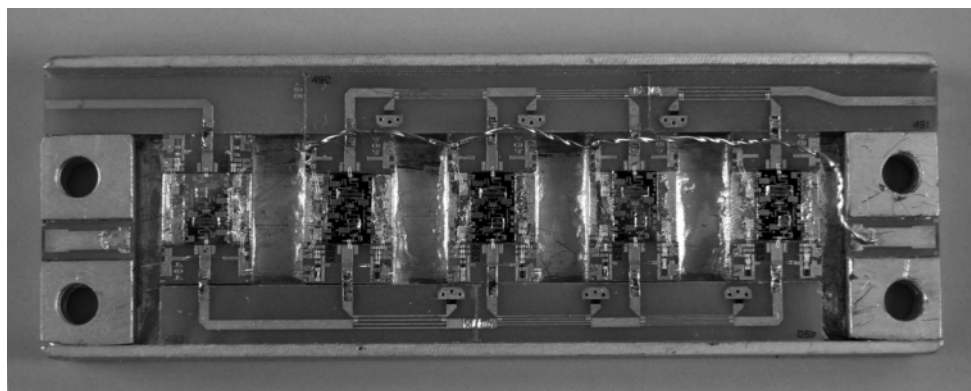
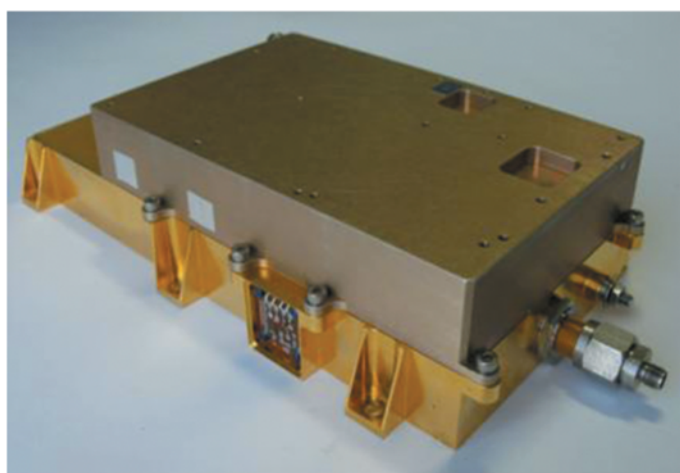
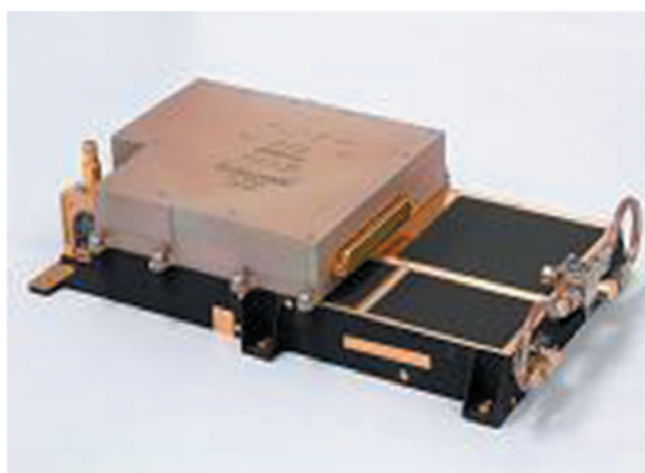


Рис. 6. Общий вид выходного каскада УМ в гибридно-монокристаллическом исполнении



S-диапазон GaN, 80 Вт



С-диапазон

Рис. 7. Двухэтажные конструкции УМ

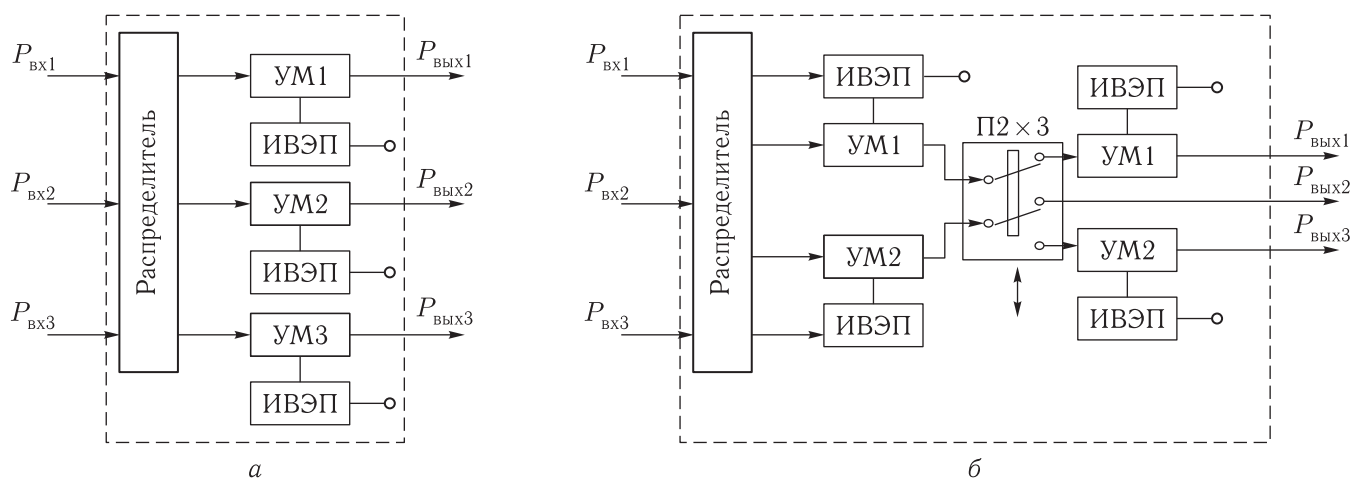


Рис. 8. Структурные схемы РУМ с переключением одного из двух уровней мощности с троированными УМ (а) и с дублированными УМ (б)

При переходе на GaN-транзисторы возможна регулировка $P_{\text{вых}}$ (P_{out}) изменением положения рабочей точки на вольтамперной характеристике транзисторов выходного каскада путем выбора постоянного смещения на их стоках и затворах [15]. Тем самым можно менять $P_{\text{вых}}$ в пределах 5 дБ без существенного изменения КПД (рис. 9).

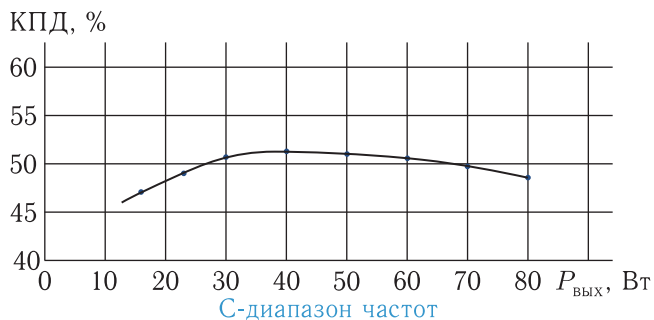


Рис. 9. Зависимость КПД УМ на GaN от $P_{\text{вых}}$

В данном решении при всей его простоте имеется недостаток — ограничение по диапазону изменяемой $P_{\text{вых}}$ (порядка 5 дБ). Достоинство такого изменения номинальной мощности УМ может проявиться при создании унифицированного ряда УМ БА КИС, когда изменение ее номинального значения только за счет выбора рабочей точки транзисторных усилителей позволяет примерно в 2–3 раза сократить число конструктивов УМ в пределах унифицированного ряда каждого из частотных диапазонов.

В табл. 2 показаны прогнозные параметры унифицированного ряда дублированных РУМ будущего для КА.

Из прогнозных оценок параметров РУМ будущего, приведенных в табл. 2, следует возможность для РУМ уменьшить существующие в настоящее время:

- массу и габариты — в 2–2,5 раза;
- энергопотребление — в 2 раза.

Заключение

В работе дан детальный анализ требований к УМ для БА КИС, показаны возможности их выполнения и пути совершенствования твердотельных СВЧ-усилителей мощности для БА КИС.

Таблица 2. Прогнозные параметры дублированных РУМ

$P_{\text{вых}}$, Вт		5		10		40	
F ¹⁾	КПД	S ²⁾	M ³⁾	S ²⁾	M ³⁾	S ²⁾	M ³⁾
S	0,7	15	0,2	25	0,3	90	0,5
C	0,5	25	0,3	50	0,5	200	1,4
X	0,4	40	0,5	75	0,6	300	1,6
Ku	0,35	50	0,7	100	0,8	400	1,8
Ka	0,3	60	0,8	120	1,0	460	2,5
¹⁾ — F — диапазон частот ²⁾ — S — площадь основания, см ² ³⁾ — M — масса, кг							

Сделан прогноз создания унифицированных рядов резервированных усилителей мощности нового поколения, в 2–2,5 раза превосходящих ключевые параметры современных усилителей мощности для БА КИС.

Список литературы

1. Коновалов С. Д., Тазигов А. А., Алыбин В. Г. Повышение надежности и улучшение массогабаритных параметров усилителя мощности СВЧ для бортовой аппаратуры командно-измерительных систем // Будущее российской космонавтики в информационных разработках молодых ученых и специалистов предприятий ракетно-космической промышленности Московской области. Сб. материалов. Королев. 2012. Часть 1. С. 118–120.
2. Федотов Ю. В., Мальцев П. П., Гнатюк Д. Л., Матвеев О. С., Крапунин Д. В., Гамкрелидзе С. А. Создание СВЧ монолитных интегральных схем 5-миллиметрового диапазона длин волн для применения в перспективных космических системах // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, вып. № 2. С. 72–78.
3. Лундин и др. Гетероструктуры AlGaIn/GaN с высокой подвижностью электронов, выращенные методом газовой эпитаксии из металлических соединений // ФТП, 2004, т. 38, вып. № 11. С. 1364–1367.
4. Раков Ю. Н., Мончарес Н. В., Бобкова Т. П., Щепкина Л. В., Узельман Г. Ф., Мякишев Ю. Б., Бондарева Т. К., Цацунников А. Ф., Свешиников Ю. Н. Мощные интегральные гетероструктурные полевые транзисторы на нитриде галлия //

- Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2010, т. 1. С. 101–102.
5. Гуляев В.И., Мякишев Ю.Б., Раков Ю.Н., Добуш И.М., Кокотов А.А., Бабак Л.И. *GaN* К-диапазона на базе 0,25 мкм // 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2012. С. 66–67.
 6. Торхов Н.А., Божков В.Г. Мощные *GaN/AlGaN* *HEMT* Ка-диапазона на подложках из карбида кремния // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2013. Т. 1. С. 62–63.
 7. Колковский Ю.В., Миннебаев В.М. Многофункциональные блоки высокого уровня мощности сантиметрового диапазона на *GaN* *HEMT* // 12-я Всероссийская научно-техническая конференция «Пульсар-2013» — «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013. С. 23–28.
 8. Арендаренко А.А., Орешкин В.А., Свешников Ю.Н. и др. Первые отечественные СВЧ-транзисторы на основе гетероэпитаксиальных структур *AlGaIn/GaN*, выращенных на подложках кремния // 12-я Всероссийская научно-техническая конференция «Пульсар-2013» — «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013. С. 38–42.
 9. Гуляев В.И., Глазунов В.В., Зыкова Г.С., Мякишев Ю.Б., Мончарес Н.В. Усилитель с выходной мощностью 15 Вт диапазона 8,5–12,5 ГГц на *GaN* КМИС // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2012, с. 72–73.
 10. Шишкин Д.А., Арыков В.С., Ерофеев Е.В., Степаненко М.В. Микросхема усилителя мощности Ка-диапазона частот // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2015, т. 1. С. 103–104.
 11. Сечи Ф., Буджатти М. Мощные твердотельные СВЧ-усилители // Перевод с англ. В.О. Султанова под ред. А.А. Борисова. М.: Техносфера, 2015. 416 с.
 12. Крыжановский В.Г., Рассохина Ю.В., Колантонио Паоло. Выходная цепь усилителя класса *F-1* с щелевыми резонаторами в микрополосковой линии передачи // Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2011, т. 1. С. 141–142.
 13. Гуляев В.И., Глазунов В.В. Усилитель *S*-диапазона на *GaN* КМИС с выходной мощностью 25 Вт // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2011, т. 1. С. 129–130.
 14. Патент РФ № 2541891. Алыбин В.Г., Зарапин С.А., Семочкин А.С., Коновалов С.Д. Резервированный усилитель мощности бортовой аппаратуры командно-измерительной системы. 2015. Бюлл. «Изобретения. Полезные модели» № 5-2015, 20.02.2015.
 15. *C-Band HSDL Transmitter CDL-MS01 COM DEV* Europe. March 2010, www.comdev.co.uk