

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ СВЧ-ДИАПАЗОНА СО СВЕРХОКТАВНОЙ ПОЛОСОЙ

Представлен анализ технических и технологических решений, применяемых при конструировании сверхширокополосных транзисторных усилителей мощности СВЧ-диапазона. Рассмотрены современные технологии и схемы построения монолитных интегральных усилителей мощности, достигнутые в промышленности и в разработках параметры, обсуждаются конструкции высокоомощных усилителей. Приведены результаты ряда практических разработок, выполненных под руководством автора.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к применению усилителей мощности с полосой частот более октавы (такую полосу для определенности будем называть сверхширокой полосой частот) не ослабевает. Это связано с интенсивным развитием технологии активных фазированных антенных решеток (АФАР), как радиолокационных, так и противорадиолокационных, с применением короткоимпульсных и шумоподобных сигналов, требующих большой мгновенной полосы передающего тракта, переходом к многофункциональным и многодиапазонным радиосистемам.

Успех в создании высокоэффективных сверхширокополосных усилителей мощности (СШУМ) определяется сочетанием оптимальной схемотехнической реализации, рациональной конструкции и передовой технологии активных приборов. Технические решения и параметры приборов в данной работе рассматриваются применительно к диапазону частот 2–18 ГГц, охватывающему все основные радиолокационные (S-, C-, X-, Ku-) диапазоны и наиболее востребованные (2–6, 6–18, 4–18 ГГц) противорадиолокационные диапазоны частот.

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Сравним качественные параметры транзисторного СВЧ-усилителя мощности, имеющего различные полосы рабочих частот. Рабочей полосой частот будем считать такой участок частотного диапазона, в котором строго выполняются все заданные технические характеристики усилителя. Рассмотрим таблицу 1 применительно к элементарному транзисторному усилительному каскаду.

Таблица 1. Классификация усилителей мощности СВЧ

| Параметры и показатели | Узкополосный усилитель | Широкополосный усилитель | СШУМ |
|---|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Перекрытие по частоте | < 1,2:1 | 1,2:1–2:1 | > 2:1 |
| Сложность согласующих цепей | Простые, 2–3 элемента | Средней сложности, 3–5 элементов | Сложные, 5–11 элементов |
| Реализуемый КСВН входа | Менее 2,0 | Высокий | Высокий |
| Возможность полезного управления нагрузками на гармониках | Развитая | Ограниченная | Практически отсутствует |
| Достижимый электронный КПД, % | 80% | 45–50% | 20–30% |
| Неравномерность АЧХ | Практически нет | Средняя | Высокая |
| Аппаратурный КПД | Близок к электронному | Меньше электронного | Значительно меньше электронного |

При этом «аппаратурный КПД» [1] определим как:

$$\eta_a = P_{\text{вых.мин}} / P_{\text{потр.макс}} \quad (1)$$

где $P_{\text{вых.мин}}$ — минимальная в рабочей полосе частот выходная мощность усилителя; $P_{\text{потр.макс}}$ — максимальная в рабочей полосе частот мощность потребления усилителя от источника питания.

Параметр η_a важен для проектирования системы, оценки энергопотребления системы при эксплуатации, предельной выходной мощности источника питания. При высокой неравномерности выходной мощности и равномерном электронном КПД аппаратурный КПД СШУМ может быть в несколько раз меньше электронного, а искусство проектирования СШУМ сегодня оценивается результатами повышения как первого, так и второго параметров.

Совершенствование параметров СШУМ в значительной степени связано с прогрессом в параметрах СВЧ-транзисторов и технологий их производства, а они в свою очередь — с развитием технологии СВЧ-интегральных схем

и дискретных транзисторов на нитриде галлия (GaN). Далее остановимся на результатах, полученных в последнюю пятилетку.

КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА СШУМ

Основой конструкции СШУМ сантиметрового диапазона остаются дискретные транзисторы в виде кристаллов и монолитные интегральные схемы (МИС) на основе GaN-технологий. Рассмотрим современный рынок дискретных GaN-транзисторов в виде кристаллов, коммерчески доступные типы (серии) и параметры приборов приведены в таблице 2.

Номенклатура и разнообразие освоенных в последние годы дискретных GaN-транзисторов значительно выросли, к традиционным изготовителям кристаллов Qorvo (TriQuint) и Wolfspeed (Cree) присоединились французская UMS и южнокорейская WavePia, предлагаются также транзисторы, выпускаемые по фондрити-технологии NP25-00 на производстве Win Semiconductor компаниями AMCOM Communications (США) и ООО «Резонанс» (Россия).

В стадии тестирования кристаллы, изготавливаемые АО «Светлана-Рост» и АО «Светлана-Электронприбор». Ряд российских компаний развивает технологии СВЧ-приборов на нитриде галлия, однако коммерчески доступные кристаллы на отечественном рынке отсутствуют.

Для конструирования СШУМ сантиметрового диапазона наибольший интерес представляют относительно низковольтные технологии с длиной затвора 0,15–0,25 мкм и рабочим напряжением 20–28 В. Это связано с тем, что при повышении рабочего напряжения пропорционально увеличивается активная часть оптимального импеданса нагрузки, требуемого для обеспечения максимума выходной мощности или КПД. При этом его реактивная часть, определяемая паразитными емкостями сток–исток и сток–затвор транзистора, изменяется мало. В результате собственная эквивалентная добротность виртуальной выходной цепи также растет, что увеличивает трудности при реализации выходной согласующей цепи СШУМ.

Конструкции усилительных элементов (каскадов) СШУМ можно условно разделить на три класса: гибридно-интегральные (ГИС), монолитно-интегральные (МИС) и квазимонолитные (КМИС), их основные свойства отражены в таблице 3.

Выбор конструктивного исполнения усилительных элементов диктуется спецификой требований, предъявляемых к СШУМ, предполагаемым объемом выпуска изделий, лимитами затрат на разработку. С точки зрения схемного построения большинство СШУМ (имеются в виду оконечные каскады усиления) выполняются трех основных типов: балансные усилители, многокаскадные усилители с непосредственными связями и усилители с распределенным усилением (УРУ).

Достоинствами балансной схемы, широко применяемой в ГИС-усилителях, являются хорошее согласование входа и выхода, малая неравномерность АЧХ, улучшенная устойчивость. К недостаткам можно отнести ограничения полосы частот, накладываемые габаритами и сложностью квадратурных мостов, большие габариты каскадов. Параметры таких усилителей существенно зависят от искусства конструирования широкополосных квадратурных мостов, обзору некоторых конструкций таких устройств посвящена работа [2].

Сводные данные по достигнутым параметрам коммерчески доступных монолитных GaN УРУ в диапазоне частот 2–18 ГГц приведены в таблице 4. Выходные мощности и КПД усилителей соответствуют компрессии усиления

Таблица 2. Параметры коммерчески доступных GaN-транзисторов в виде кристаллов

| Тип транзистора | Производитель | $f_{гр}$, ГГц | $P_{вых}$, Вт | КПД _{добр} , % | Длина затвора, мкм | $U_{ср}$, В |
|---|---------------|----------------|----------------|-------------------------|--------------------|--------------|
| Транзисторы, освоенные в производстве до 2012 года | | | | | | |
| TGF2023-2-xx | Qorvo | 18 | 6–50 | 60 | 0,25 | 28 |
| CGH600xxD | Wolfspeed | 6 | 8–120 | 65 | 0,5 | 28 |
| CGHV1JxxD | Wolfspeed | 18 | 6, 25, 70 | 60 | 0,25 | 40 |
| Транзисторы, освоенные в производстве в 2013–2018 годах | | | | | | |
| CG2H80xxD | Wolfspeed | 8 | 15–60 | 65 | 0,25 | 28 |
| CGHV40320D | Wolfspeed | 4 | 320 | 65 | 0,5 | 50 |
| CGHV60xxxD | Wolfspeed | 6 | 40–170 | 65 | 0,5 | 50 |
| TGF293x | Qorvo | 25 | 2–11 | 50 | 0,15 | 28 |
| TGF295x | Qorvo | 12 | 7–70 | 55 | 0,25 | 32 |
| CHK901x-99F | UMS | 12 | 55, 85 | 50 | 0,25 | 30 |
| CHK8015-99F | UMS | 18 | 20 | 68 | 0,25 | 30 |
| AMxxxWN | AMCOM | 15 | 2–40 | 50 | 0,25 | 28 |
| RT10–RT70 | Резонанс | 15 | 5–35 | 45 | 0,25 | 28 |
| TA284 (разр) | Светлана-Рост | 6 | 15 | – | 0,5 | 28 |
| WP48xxxxxx | WavePia | 5–10 | 15–340 | – | 0,45 | 48 |
| WP28xxxxxx | WavePia | 15 | 15–60 | – | 0,25 | 28 |

в 3–5 дБ относительно условий линейного режима, что, впрочем, характерно для любых типов GaN-усилителей.

Очевидными достоинствами схем УРУ являются очень широкая потенциальная полоса рабочих частот, хорошее согласование входа и выхода, малая неравно-

мерность АЧХ. Основным недостатком следует признать относительно низкий КПД, над увеличением которого интенсивно трудятся лучшие умы зарубежной СВЧ-микроэлектроники. Для усилителей этого класса минимальный в полосе частот КПД по добавленной мощности

Таблица 3. Виды конструкций каскадов СШУМ

| Параметры и показатели | ГИС | МИС | КМИС |
|---|------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Габариты | Большие | Малые | Малые |
| Возможность настройки параметров | Есть | Нет | Ограниченная |
| Стоимость компонентов | Малая | Высокая | Малая |
| Возможность реализации элементов с сосредоточенными параметрами | Нет | Есть | Есть |
| Активные элементы | Дискретные транзисторы | Интегральные транзисторные структуры | Дискретные транзисторы |
| Практический частотный предел использования | 12 ГГц | Не ограничен | 14 ГГц |
| Затраты на отработку параметров | Малые | Высокие | Средние |

Таблица 4. Параметры монолитных GaN УРУ в диапазоне частот 2–18 ГГц

| Тип МИС | Производитель | $P_{вых}$, Вт | $K_{ус.лин}$, дБ | КПД _{добр} , % | $U_{ср}$, В |
|-----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------------|--------------|
| NC11647C-218P2 | METDA | 2 | 11 | 10–15 | 28 |
| ASL 4046 | Aelius | 3 | 9,0 | 13–20 | 25 |
| CMD-184 | Custom MMIC | 3–5,5 | 13 | – | 28 |
| TGA2214 | Qorvo | 5–6 | 22–25 | 22 | 22 |
| HMC1087-Die | Analog Devices | 8 | 11–12 | 20–24 | 28 |
| NC11651C-218P8 | METDA | 8 | 12 | 20–25 | 28 |
| GNM-2203 | SIWI | 9 | 9 | 22 | 28 |
| TGA2573 | Qorvo | 10 | 9 | 22–30 | 30 |
| NC11688C-218P10 | METDA | 10 | 20 | 20 | 28 |
| NDNC01056 | NEDITEK | 10 | 12 | 20 | 28 |

Таблица 5. Параметры монолитных GaN-усилителей с реактивным согласованием в диапазоне частот 6–18 ГГц

| Тип МИС | Производитель | $P_{\text{вых}}$ Вт | $K_{\text{ус. лин}} \text{ дБ}$ | $KПД_{\text{доб}}$ % | $U_{\text{ср}}$ В |
|-----------------|---------------|---------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------|
| TGA2501 | Qorvo | 2,5 | 26±2 | 18–30 | 8 |
| [3] | | 6–10 | 11–15 | 17–27 | 8 |
| GNM2305 | SIWI | 5 | 16 | 18 | 8 |
| NC116137C-618P6 | METDA | 6–8 | 28±3 | 22–25 | 28 |
| NC11669C-618P10 | METDA | 10–16 | 20 | 20–25 | 24 |
| TGA2963 | Qorvo | 20–35 | 32±4,5 | 20–28 | 22 |
| [4] | | 16–20 | 12±1 | 22–40 | 24 |
| [5] | | 30–53 | 17–25 | 13–30 | 25 |

в 20% считается очень хорошим результатом.

Усилители с реактивным согласованием, в частности многокаскадные, — это самые распространенные представители ГИС, МИС и КМИС усилителей мощности, в том числе со сверхоктавной полосой. В данном случае электрические характеристики достигаются совершенствованием выходной согласующей цепи, трансформирующей стандартное волновое сопротивление тракта (50 Ом) к оптимальному нагружающему импедансу выходного транзистора (или линейки синфазно возбуждаемых транзисторных структур), обеспечивающему на всех частотах диапазона максимальную выходную мощность, либо максимальный КПД, либо требуемый компромисс между этими параметрами.

Теоретически данная схема построения должна обеспечивать наилучшие энергетические характеристики, для узкополосных и субоктавных усилителей это действительно так. Однако для СШУМ преимущества не столь велики, что иллюстрируется данными таблицы 5, в которой приведены параметры промышленных МИС СШУМ диапазона 6–18 ГГц, выполненных по многокаскадным схемам с реактивным согласованием.

В таблице для сравнения указаны также параметры трех типов МИС, выполненных по технологии GaAs-pHEMT с мощностью 2,5–6 Вт, и видно, что КПД этих приборов на 3–5% (всего лишь) ниже, чем у GaN-усилителей. Также следует отметить, что площадь кристалла GaAs МИС составляет 16–32 мм², в то время как GaN-усилители той же мощности размещаются на площади кристалла 5–6 мм².

При высоком усилении и высокой выходной мощности (в 2–3 раза большей, чем достигнута в схемах УБВ), многокаскадные СШУМ на основе схем с реактивным согласованием имеют два серьезных недостатка: высокую неравномерность АЧХ (2–3 дБ на каскад) и высокий КСВН выхода, сильно затрудняющие

применение таких МИС. При этом заметного улучшения достигнутых значений КПД по сравнению со схемами GaN УБВ не наблюдается.

ОСОБЕННОСТИ СХЕМОТЕХНИКИ СШУМ

Традиционным и достаточно хорошо изученным для узкополосных усилителей методом повышения КПД является (обобщенно) метод управления нагрузками на гармониках основной частоты [6]. До 2009 года трудности расширения полосы частот усилителя при сохранении возможности оптимального управления нагрузками на гармониках считались непреодолимыми. Однако авторы опубликованной в 2009 году статьи [7] дали старт наступлению на низкий КПД СШУМ, предложив использовать принцип комбинации известных высокоэффективных режимов усиления, с ростом частоты плавно переходящих из одного в другой. Следует отметить, правда, что действительно весомые результаты (табл. 6) получены для схем одиночного каскада с реак-

тивным согласованием и для относительно низких частот (до 2,5–4 ГГц), на которых собственные реактивности мощных GaN-транзисторов еще позволяют им демонстрировать свойства идеальных ключей, необходимые для реализации высокоэффективных нелинейных режимов колебаний. На более высоких частотах результаты для СШУМ пока более скромные.

Одним из эффективных способов построения СШУМ является использование для повышения либо понижения оптимального импеданса нагрузки противофазных делителей мощности (мостов) и последовательно включенных (stacked) транзисторных структур, что позволяет в ряде случаев вообще отказаться от ограничивающих полосу частот реактивных элементов и трансформаторов в выходной согласующей цепи. Фактически в этом случае не цепь трансформирует импеданс к оптимальному для активного элемента, а активный элемент «трансформируется» к заданному волновому сопротивлению линии передачи. Этот прием применен в работе [12] для суммирования четырех 25-Вт интегральных GaN-МИС, при этом усилители, спроектированные для работы в 50-Ом тракте, включаются попарно параллельно, а требуемое для них при этом волновое сопротивление 25 Ом формируется коаксиальным противофазным мостом на ферритовом сердечнике. Такое решение позволило получить в полосе частот 0,1–1,8 ГГц выходную мощность усилителя 94–142 Вт при КПД стока 41–74%.

ПАРАМЕТРЫ СОВРЕМЕННЫХ СШУМ

Для иллюстрации современного технического уровня СШУМ приведем па-

Таблица 6. Результаты разработок выходных каскадов СШУМ с высоким КПД

| Публикация | Тип использованного транзистора | Δf , ГГц | $P_{\text{вых}}$ Вт | $KПД_{\text{ср}}$ % | $KПД_{\text{доб}}$ % |
|------------|---------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| [7] | Cree, 10W | 1,4–2,6 | 10 | 60–65 | 50–60 |
| [8] | CGH60015D | 0,4–4,1 | 10–16 | 40–62 | 38–58 |
| [9] | CGH40010F | 1,4–2,5 | 12–18 | 68–82 | 65–80 |
| [10] | CGH40120F | 0,6–2,6 | 80–115 | 49–65 | 44–55 |
| [11] | CGH40025F | 0,2–1,8 | 16–32 | – | 60–82 |

Таблица 7. Параметры модулей СШУМ высокой мощности в диапазонах частот 2–18 ГГц и 6–18 ГГц

| Тип СШУМ | Производитель | Δf , ГГц | $P_{\text{вых}}$ Вт | $K_{\text{ус. лин}} \text{ дБ}$ | $\eta_{\text{ср}}$ % | Объем, см ³ |
|----------------|---------------|------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|
| MRH020180G5041 | Meuro | 2–18 | 13 | 50 | – | 187 |
| AMP1070 | Exodus | 2–18 | 30 | 50 | 5,2 | 552 |
| RFLUPA0618GC | RF Lambda | 6–18 | 20–40 | 56–62 | 6,2 | 889 |
| PA1062 | Mitron PTI | 6–18 | 40 | 46 | 7,4 | 1134 |
| RCA60180H46A | RFCore | 6–18 | 40–45 | 29 | 5,0 | 31400 |
| AMP1122 | Exodus | 6–18 | 100 | 60 | 7,8 | 1846 |
| L0618-50-T523 | Microsemi | 6–18 | 100 | 55 | – | 3934 |
| MRH060180G5053 | Meuro | 6–18 | 200 | 50 | – | 10080 |

Таблица 8. Параметры новых СШУМ разработки АО «Микроволновые системы»

| Тип СШУМ | ДФ, ГГц | $P_{\text{вых}}$, Вт | Функции | $\eta_{\text{ар}}$, % | Объем, см ³ | Масса, кг |
|------------|---------|-----------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| «Взлет-1» | 1–4 | 2×12 | А, Т, Д, ДТ, М, Ф | 17 | 155 | 0,3 |
| УМ1535Б | 2–4 | 40 | А, Т, Д, ДТ, М | 22 | 253 | 0,5 |
| УМ1612С | 2–8 | 15 | А, Т, Д, ДТ, М | 16 | 124 | 0,24 |
| УМ1620С | 1–6 | 30 | А, Т, Д, ДТ, М | 14,2 | 280 | 0,51 |
| УМ1520Б | 4–12 | 20 | А, Т, Д, ДТ, М | 16 | 207 | 0,35 |
| УМ1710Б | 5–18 | 12 | А, Т, Д, ДТ, М | 10 | 157 | 0,3 |
| «Взлет-2» | 4–12 | 2×15 | А, Т, Д, ДТ, М, Ф | 12,5 | 172 | 0,3 |
| «Взлет-3А» | 8–18 | 2×6 | А, Т, Д, ДТ, М, Ф | 10 | 147 | 0,3 |

Встроенные функции: А — цифровой аттенуатор управления усилением; Т — термокомпенсация усиления; Д — детектор выходной мощности; ДТ — датчик температуры корпуса; М — быстрый модулятор силового питания; Ф — нормированные ФЧХ.

параметры твердотельных усилителей в диапазонах частот 2–18 ГГц и 6–18 ГГц (табл. 7).

Отдельные применения СШУМ, например, АФАР непрерывного режима, требуют не столько наращивания выходной мощности усилителя, сколько повышения удельных параметров (КПД, удельной массы и объема на ватт выходной мощности). Этому направлению уделяют большое внимание разработчики АО «Микроволновые системы», создавая новые СШУМ для отечественного рынка. Основные параметры новых усилителей мощности класса СШУМ, разработанных специалистами предприятия в последние годы, приведены в таблице 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные технологии транзисторов и МИС на нитриде галлия позволяют создавать усилительные элементы со сверхоктавной полосой и выходной мощностью более 100 Вт при КПД 40–60% в дециметровом диапазоне, и более 20–30 Вт при КПД 20–30% в сантиметровом. Твердотельные усилители мощности диапазона 6–18 ГГц уверенно начинают занимать традиционную нишу ЛБВ 100-Вт класса, однако аппаратный КПД изделий всех категорий оставляет желать лучшего, а именно — для надежного питания 40-Вт усилителя в аппаратуре должен быть предусмотрен как минимум 1-киловаттный источник питания.

Усилители со сверхоктавной полосой частот, разработанные в АО «Микроволновые системы», имеют в 2–3 раза больший аппаратный КПД и меньший удельный (на единицу выходной мощности) объем и, соответственно, массу, чем близкие по классу зарубежные аналоги. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Кищинский А. А. Сверхширокополосные твердотельные усилители мощности СВЧ-диапазона: схемотехника, конструкции, технологии. *Электроника и микро-*

электроника СВЧ. Сборник статей VII Всероссийской конференции. СПб., Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018.

2. Кищинский А. А., Радченко А. В., Радченко В. В. Широкополосные квадратные делители/сумматоры для применения в усилителях СВЧ-мощности. *Материалы 23-й Крымской международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, Вебер, 2013.*

3. Meghdadi M., Medi A. Design of 6–18GHz HighPower Amplifier in GaAs pHEMT Technology. *IEEE Transactions on MTT, 2017, Vol. 65. Iss. 7.*

4. Tran P. et al. 2 to 18 GHz HighPower and High Efficiency Amplifiers. *2017 IEEE International Microwave Symposium, 2017.*

5. Litchfield M., Komiak J. A 6–18GHz 40W Reactively Matched GaN MMIC Power Amplifier. *2018 IEEE International Microwave Symposium, 2018.*

6. Крыжановский В. Г. Транзисторные усилители с высоким КПД. *Донецк, Анекс, 2004, — 448 с.*

7. Wright P. et al. A Methodology for Realizing High Efficiency Class J in a Linear and Broadband PA. *IEEE Transactions on MTT, vol. 57, 2009, №12*

8. Andersson C. et al. Decade Bandwidth High Efficiency GaN HEMT Power Amplifier Designed With Resistive Harmonic Loading. *2012 IEEE International Microwave Symposium, 2012.*

9. Yang M. et al. Highly Efficient Broadband Continuous Inverse ClassF Power Amplifier Design Using Modified Elliptic LowPass Filtering Matching Network. *IEEE Transactions on MTT, Vol. 64, № 3, 2016.*

10. Arnous T. et al. MultiOctave GaN High Power Amplifier Using Planar Transmission Line Transformer. *Proceedings of the 46th European Microwave Conference, 2016.*

11. Zhuang Y. et al. Design of Multioctave HighEfficiency Power Amplifiers Using Stochastic Reduced Order Models. *IEEE Transactions on MTT, VOL. 66, № 2, 2018.*

12. Krishnamurthy K. et al. A 0.1–1.8 GHz, 100 W GaN HEMT Power Amplifier Module. *Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2010.*